

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. АЛЕКСЕЕВА»

**ПРОГРАММА СТРАТЕГИЧЕСКОГО АКАДЕМИЧЕСКОГО
ЛИДЕРСТВА «ПРИОРИТЕТ 2030»**

ОБРАЗОВАТЕЛЬНО-НАУЧНЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

Нижегород 2023

УДК 550.534.524

А 437

А 437 Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. науч.-техн. конф. / Нижегород. гос. техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. – 410 с.

Изложены проблемные вопросы современных преобразователей параметров электрической энергии, элементов электрооборудования промышленных установок и систем автоматизированного электропривода, а также эффективности систем электроэнергетики.

Содержит научно-технические результаты и разработки регионального центра развития распределенной энергетики на основе возобновляемых источников энергии НГТУ и предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

В сборник включены материалы IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». Конференция проведена в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

доц. А.Б. Дарьенков (отв. редактор), **проф. А.Б. Лоскутов**,
доц. А.А. Кралин, **доц. А.А. Севостьянов**,
доц. Е.В. Крюков

УДК 550.534.524

ISBN 978-5-502-01737-4

**© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2023**

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ..... | 6 |
| Алешин Д.А., Трофимов И.М., Ширшин К.А., Мурашов А.Д. Реализация имитационной модели электрического генератора напряжения волновой энергетической системы..... | 6 |
| Дарьенков А.Б., Соколов В.В., Храмов А.Е., Петухов Н.М., Слузов А.П., Бердников И.Е. Имитационное моделирование однофазного выпрямителя с корректором коэффициента мощности..... | 12 |
| Загляднов А.С., Мурашов А.Д., Трофимов И.М. Способ управления затворами силовых транзисторов в инверторе напряжения..... | 22 |
| Серов А.В., Андрюхин М.В., Титов В.Г. Сравнение драйверов управления стойкой силового инвертора с помощью среды схемотехнического моделирования MICROCAP | 28 |
| Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Формирование постоянного тока бестрансформаторным непосредственным преобразователем частоты..... | 36 |
| Ульянов Д.А., Константинов М.А. Исследование качества потребляемого тока и формируемого напряжения в цепи двойного преобразования энергии с промежуточным аккумуляторным звеном..... | 43 |
| Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД..... | 50 |
| Абузяров Т.Х. Алгоритм расчета тока задания сдвоенного преобразователя в составе шагового электропривода..... | 50 |
| Агапов А.А., Крылов Ю.М., Литвиненко А.М. Исследование электропривода поворотной-лопастной системы с учетом влияния внешних факторов среды..... | 58 |
| Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Система сбора и передачи данных о текущем состоянии работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором..... | 64 |
| Дарьенков А.Б., Бердников И.Е., Храмов А.Е. Экспериментальный стенд дизель – генераторной установки переменной частоты вращения..... | 72 |
| Доценко В.В., Литвиненко А.М., Багрянцев И.А. Разработка алгоритма для определения участков перегрузки обмоток двигателя методом эквивалентных токов..... | 82 |
| Леликов М.А., Мещеряков В.Н., Музылева И.В. Разработка человеко-машинного интерфейса моталки в программной оболочке «TIA Portal»..... | 89 |
| Мещеряков В.Н., Муравьев А.А., Бойков А.И., Боженко Ф.А. Улучшение энергетических и динамических показателей асинхронного двигателя с фазным ротором путем применения векторной коррекции сигнала управления | 96 |
| Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И., Улитин Н.П., Воскобойников Е.К. Оценка энергоэффективности способов регулирования давления на нефтеперегонной станции..... | 104 |
| Попов С.В. Модернизация силовой части пароконвектомата для снижения влияния на питающую сеть..... | 111 |
| Ребенков Е.С., Майорова Н.Д. Регулятор демпфирования упругих деформаций в частотно-управляемом электроприводе..... | 119 |
| Сбитнев Н.А. Алгоритм оценки эффективности применения искусственных нейронных сетей в задачах ранней диагностики неисправностей..... | 126 |

| | |
|---|-----|
| Федотов В.В., Рожков В.В. Синтез регулятора углового положения для обработки перемещений в широком диапазоне..... | 137 |
| Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Билялетдинов Т.З. Оценка топливных показателей электростанций на базе асинхронного генератора переменной частоты вращения | 143 |
| Храмов А.Е., Плехов А.С. Разработка и исследование виброзащитной системы дизель-электростанции переменной частоты вращения..... | 152 |
| Языкова Л.Н., Музылева И.В., Мещеряков В.Н., Митин Е.Г. Коррекция колебаний в электромеханической системе асинхронного электродвигателя..... | 160 |

Секция 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....

| | |
|---|-----|
| Гринев Н.В. К вопросу об архитектуре энергосистем будущего | 171 |
| Данилов А.Д., Ширяев Д.А., Зимин И.А., Дружаев А.А. Анализ методов контроля и диагностики турбогенераторов на примере энергоблоков поколения «3+» с реакторами ВВЭР-1200..... | 179 |
| Джерриу А.С. Моделирование коротких замыканий для дифференциально-логической защиты силовых трансформаторов с помощью PSCAD/EMTDC..... | 186 |
| Дьяконов А.А., Семенова Н.Г. Структура процесса принятия решения по ликвидации нарушений нормального режима | 193 |
| Золотухин К.И., Котов В.С., Барсков, Карпов И.А. Новые методы оптимизации работы газораспределительной станции (исследование ГРС «Никольское») | 198 |
| Ибатуллин Э.Э., Грачева Е.И. Исследование потерь холостого хода трансформатора за период эксплуатации..... | 206 |
| Карпов И.П. Стенд для определения токов короткого замыкания межподстанционной зоны тяговой сети | 211 |
| Ливенцов В.С. Оценка влияния величины питающего напряжения и длины линии электропередачи на погрешность расчета совокупных потерь активной мощности в распределительных электрических сетях..... | 217 |
| Лоскутов А.А., Куликов А.Л., Петров И.А., Кошелев В.А., Жафяров А.Р., Илларионов Р.И. Разработка киберфизической модели с обменом данными по МЭК 61850 для проверки функции дифференциальной защиты ЛЭП..... | 223 |
| Лоскутов А.А., Куликов А.Л., Петров И.А., Шмелева Н.М., Кринкин А.А. Функциональные испытания микропроцессорного терминала релейной защиты ТОР 200 В системе электроснабжения с объектом распределенной генерации..... | 247 |
| Папков Б.В., Симачкова М.С., Стрелкова М.А. Особенности оценки надежности оперативного персонала в системах электроэнергетики..... | 264 |
| Петров А.Р., Грачева Е.И. Расчетно-экспериментальное исследование сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов..... | 271 |
| Петрова Р.М., Грачева Е.И. Выбор оптимального закона распределения при моделировании надежности схем цехового электроснабжения..... | 276 |
| Платонов Д.Ю., Кротков Е.А. Развитие системы электроснабжения морских портов..... | 282 |
| Романов Л.Р., Шарыгин М.В. Способы улучшения эффективности цифровых токовых защит в распределительных сетях 6–35 кВ..... | 288 |
| Слузова А.В., Куликов А.Л. Задача распознавания поврежденного участка линии при ОМП..... | 294 |
| Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Кулаков В.Н. Разработка нормативных требований для расчета электрических нагрузок жилых комплексов на примере городской агломерации «г. Москва – Московская область»..... | 300 |

| | |
|---|-----|
| Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. , Исследование электрических нагрузок жилых и общественных зданий с последующей разработкой нормативных требований с учетом региональных особенностей..... | 305 |
| Убасева М.В., Воробьев Е.С., Антонов В.И., Солдатов А.В. Распознавание слагаемых электрической величины на малом числе отсчетов сигнала..... | 312 |
| Фитасов А.Н., Петрицкий А.С., Мамонов С.А. Применение карт Шухарта для анализа отклонения частоты..... | 319 |
| Шевченко А.А., Чернова А.Д. Способы аппроксимации рангового распределения концентраций водорода в изоляционном масле силовых трансформаторов.... | 327 |
| Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ..... | 333 |
| Ахметбаев А.Д. Применение независимых токов в расчетах установившихся режимов сложной электрической сети | 333 |
| Бедретдинов Р.Ш., Гусев Д.А., Крюков Е.В. Имитационная модель электрической сети с тиристорным регулятором мощности и возобновляемыми источниками энергии..... | 342 |
| Благушин И.А., Шалуха А.В. Применение локальных источников энергии в системах электроснабжения очистных сооружений (на примере твердооксидных топливных элементов)..... | 350 |
| Георгиевский И.Д. Повышение эффективности функционирования ветровых электростанций в составе энергосистем за счет создания ветроэнергетического комплекса..... | 356 |
| Голобоков С.В., Агеев В.А., Ушаков К.С., Стеняев И.К. Оценка эффективности применения солнечной электростанции в Поволжье | 363 |
| Голобоков С.В., Душутин К.А., Буйнов Д.А., Клейменов А.В. Повышение эффективности ветровой электростанции в Пензенской области | 369 |
| Кралин Ал.А., Крюков Е.В., Петухов Я.И., Кралин Ан.А. Имитационная модель повышающего DC-DC преобразователя в составе автономного гибридного энергетического комплекса..... | 375 |
| Погодаева И.Н., Шакиров В.А. Многокритериальный выбор состава оборудования гибридного энергокомплекса для удаленных районов | 385 |
| Попов М.М., Лукутин Б.В. Интеллектуальные технологии генерирования и стабилизации электроэнергии в микрогидроэлектростанциях | 393 |
| Ростовский В.В., Серебряков А.В., Серебряков Н.А. Анализ функциональных схем и разработка алгоритмов работы автономных источников питания..... | 397 |
| Шалуха А.В., Липужин И.А., Бедретдинов Р.Ш., Шувалова Ю.Н. Разработка системы управления мультистеком на основе топливных элементов, работающих на водороде..... | 403 |

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

УДК 621.314

DOI: 10.46960/apeen_2023_6

Д.А. Алешин, И.М. Трофимов, К.А. Ширшин, А.Д. Мурашов**РЕАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ
ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье представлена имитационная модель электрического генератора напряжения для отладки системы управления волнового энергетического комплекса. Приведены законы изменения и временные диаграммы формируемого напряжения переменной частоты и амплитуды. Представлены достоинства и недостатки модели, а также дальнейшие рекомендации для оптимизации ее работы.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, волновая генерация, переменная частота вращения, имитационное моделирование.

В настоящее время большое внимание уделяется возобновляемой и альтернативной энергетике. С развитием энергетической отрасли появляются и ее новые направления, к примеру волновая генерация. Данное направление является актуальным для России из-за существенной протяженности береговой линии [1].

По оценкам исследователей мощность волн Мирового океана составляет примерно 90 млрд. кВт. Волновая энергия обладает более высокой по сравнению с ветром и солнцем плотностью энергии. По параметру удельной плотности энергии морские волны занимают одно из лидирующих положений среди возобновляемых источников энергии. При относительно спокойном море волны характеризуются средней удельной мощностью до 50 кВт/м.

Для максимальной эффективности генерации электрической энергии с помощью волновой энергии требуется реализация ряда органов управления и датчиков слежения как параметров волны, так и электрических параметров системы [2, 3].

На рис. 1 приведена структура электрической части волнового энергетического комплекса, который состоит из:

G – низкооборотный синхронный генератор;

AC/DC – мостовой выпрямитель;

$DC/DC1$ – преобразователь, обеспечивающий заряд аккумуляторной батареи;

AB – аккумуляторная батарея;

$DC/DC2$ – преобразователь, стабилизирующий входное напряжения инвертора;

DC/AC – инвертор напряжения;

Нагр – нагрузка в цепи переменного тока;

ПЛК – программируемый логический контроллер, управляющий электрической и механической частями системы.

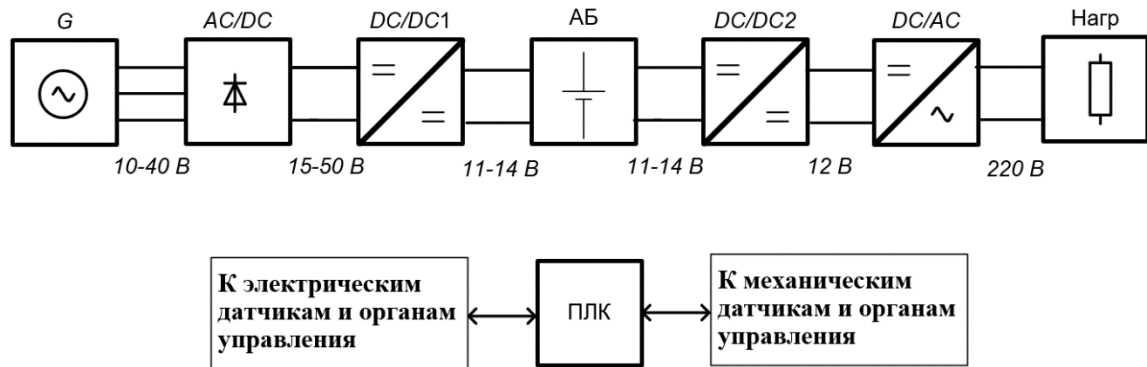


Рис. 1. Структура электрической части волнового энергетического комплекса

На начальном этапе разработки волнового комплекса требуется отладка основных узлов и системы управления на базе имитационной модели [4]. Современные программы имитационного моделирования в своих стандартных библиотеках содержат все компонентные структуры, представленной на рис. 1, кроме генератора. Это связано с тем, что энергия волны непостоянна и имеет явные интервалы максимума и минимума энергии, следовательно, генератор должен иметь переменную частоту вращения и амплитуду выходного напряжения, связанные с изменением скорости вращения ротора. Простейшая схема замещения синхронного генератора содержит источник ЭДС и последовательное RL – сопротивление. Закон изменения напряжения источника ЭДС с переменной частотой вращения можно описать в следующем виде:

$$U(\omega, t) = U_m * e^{-\delta t} * \sin(\omega t), \quad (1)$$

где U_m – максимальное значение напряжения генератора; δ – коэффициент затухания напряжения, ω – круговая частота.

Для удобства работы с блоком должны задаваться следующие параметры (рис. 2): максимальная и минимальная частоты; время изменения частоты от минимума до максимума; время изменения частоты от максимума до минимума; фазовый угол напряжения (для конфигурации трехфазных систем); максимальное и минимальное напряжение в результате изменения частоты.

Для исключения возможных ошибок при моделировании используется решение с фиксированным шагом, который требуется прописывать в маске блока.

Для согласования перечисленных параметров и формулы (1) используется система уравнений (2) и (3). В зависимости от текущего промежутка времени выбирается одна из систем уравнений.

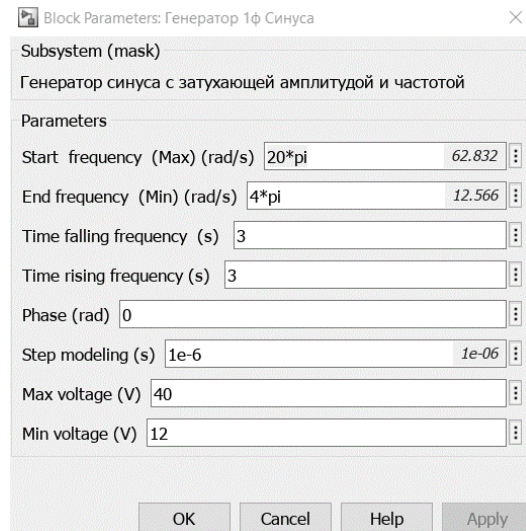


Рис. 2. Маска источника с переменной частотой

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{cp} = \frac{(\omega_H - \omega_K) \cdot t_c \cdot 2}{\omega_H} \\ \delta = \frac{\ln U_{max}/U_{min}}{t_c} \\ \omega_c(t) = \omega_H - \frac{(\omega_H - \omega_K) \cdot t}{t_{cp}} \\ K_{Ac} = \left(\omega_H - \frac{(\omega_H - \omega_K) \cdot t_c}{t_{cp}} \right) \cdot t_\phi \\ U(t) = U_m \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_c(t) \cdot t + \varphi + K_{Ac}) \end{array} \right. , \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\phi p} = \frac{(\omega_H - \omega_K) \cdot t_\phi \cdot 2}{\omega_H} \\ \delta = \frac{\ln U_{max}/U_{min}}{t_c} \\ \omega_\phi(t) = \frac{(\omega_H - (\omega_H - \omega_K) \cdot t_c/t_{\phi p}) \cdot t_\phi}{t_c} \\ K_{A\phi} = \left(\omega_H - \frac{(\omega_H - \omega_K) \cdot t_\phi}{t_{\phi p}} \right) \cdot t_c \\ U(t) = U_m \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_\phi(t) \cdot t + \varphi + K_{A\phi}) \end{array} \right. \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3): ω_H – начальная (максимальная) частота источника ЭДС; ω_K – конечная (минимальная) частота напряжения источника ЭДС; t_c –

время уменьшения частоты источника ЭДС от максимума до минимума; t_{ϕ} – время увеличения частоты источника ЭДС от минимума до максимума; t_{cp} – точка экстремума времени уменьшения частоты источника ЭДС; $t_{\phi p}$ – точка экстремума времени увеличения частоты источника ЭДС; U_{max} – максимальное амплитудное напряжение источника ЭДС; U_{min} – минимальное амплитудное напряжение источника ЭДС; $\omega_c(t)$ – зависимость уменьшения частоты источника ЭДС; $\omega_{\phi}(t)$ – зависимость увеличения частоты источника ЭДС; K_{Ac} и $K_{A\phi}$ – добавочные коэффициенты, обеспечивающий непрерывность функции при использовании последующей системы уравнений.

На рис. 3 приведены временные диаграммы работы источника ЭДС с переменной частотой и амплитудой напряжения 40 В.

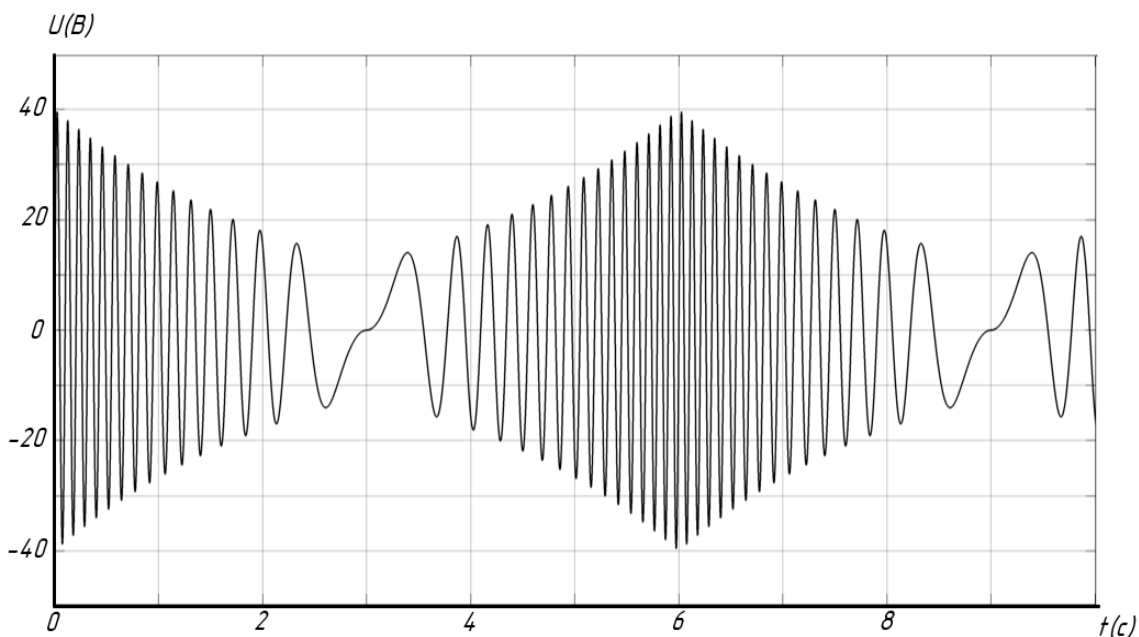


Рис. 3. Временные диаграммы работы ЭДС источника с переменной частотой

К недостаткам модели можно отнести невозможность динамического изменения заданных параметров и отсутствие задания величины напряжения в начальный момент времени.

С помощью данной модели возможны дальнейшее имитационное моделирование и отладка волновой энергетической системы. А именно, исследование работы генератора совместно с неуправляемым выпрямителем, содержащим емкостной фильтр на предмет прогнозирования величины накопленной энергии при работе волновой энергетической системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00424.

Библиографический список

1. **Мысленков, С.А.** Исследование ресурсов энергии волн в акватории Баренцева моря / С.А. Мысленков, М.Ю. Маркина, С.В. Киселева, Е.В. Столярова, В.С. Архипкин, П.М. Умнов // Теплоэнергетика. – 2018. – № 7. – С. 5-15.
2. **Кушнерев, А. А.** Структурное моделирование электроэнергетических систем: учебное пособие / А. А. Кушнерев, А. Н. Алуюнов. – Вологда: ВоГУ, 2017. – 72 с.
3. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника /В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
4. **Герман-Галкин, С.Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2010. – 320 с.

D.A. Aleshin, I.M. Trofimov, K.A. Shirshin, A.D. Murashov

**IMPLEMENTATION OF THE SIMULATION MODEL
OF THE ELECTRIC GENERATOR OF THE WAVE ENERGY SYSTEM**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The article considers a simulation model of an electric generator for debugging the control system of a wave energy complex. The laws of change and time diagrams of the generated voltage of variable frequency and amplitude are given. The advantages and disadvantages of the model are presented, as well as further recommendations for optimizing its performance.

Key words: renewable energy, wave generation, variable speed rotation, simulation modeling.

References

- [1] S.A. Mislenkov, M.U. Markina, S.V. Kiselev, E. V. Stolyarova, V.S. Arhipkin, P. M. Umnov “Issledovanie resursov energii voln v ekvatorii Barenceva morya [Study of wave energy resources in the Barents Sea]”, *Teploenergetica [Thermal power engineering]* (7), 2018, pp. 5-15 (in Russian).
- [2] A.A. Kushnerev, A. N. Alunov “Strukturnoe modelirovanie electroenergeticheskikh system: ychebnoe posobie [Structural Modeling of Electric Power Systems: Tutorial]”, Vologda: VoGU, 2017, pp. 72 (in Russian).
- [3] V.I. Meleshin, “Tranzistornay preobrazovatel'nay tehnika [Transistor converter technology]”, Moscow: Technosfera, 2005, pp. 632 (in Russian).
- [4] S. G. German-Galkin, “Komputernoe modelirovanie poluprovodnikovih system v Matlab [Computer simulation of semiconductor systems in Matlab]”, KORONA print, 2010, pp 320 (in Russian).

**А.Б. Дарьенков, В.В. Соколов, А.Е. Храмов,
Н.М. Петухов, А.П. Слuzов, И.Е. Бердников**

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Выполнено имитационное моделирование однофазного выпрямителя с активным корректором коэффициента мощности посредством среды математического анализа *MatLab / Simulink*. Актуальность исследования заключается в повышении интереса к данному типу преобразовательных устройств на фоне их активного распространения. Приведены результаты исследования различных алгоритмов управления преобразователем с использованием имеющихся возможностей *MatLab*.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, коэффициент мощности, активный корректор коэффициента мощности, математическое моделирование, *MatLab*.

В настоящее время количество потребителей с нелинейными характеристиками велико. К первым можно отнести компьютерную технику, промышленное оборудование (сварочные машины, преобразователи частоты), бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи). Питание данного класса устройств производится через сетевой выпрямитель от звена постоянного тока [1]. Если мощность нелинейных нагрузок не превышает (10 ... 15) % от полной мощности источника, то не возникает значительных искажений кривых питающего напряжения. В случае превышения указанного диапазона наблюдаются значительные искажения формы питающего напряжения. В дальнейшем это приводит к негативным последствиям, которые подробно рассмотрены в [2].

Уменьшить нежелательное воздействие таких потребителей на питающую сеть возможно за счет установки устройств пассивной или активной коррекции. Методы пассивной коррекции широко используются в современной технике и глубоко исследованы различными группами ученых [3-5]. Методы активной коррекции появились позднее и могут быть реализованы с помощью активных выпрямителей, резонансных преобразователей [6, 7], либо корректоров коэффициента мощности (ККМ) [8].

Однофазный активный выпрямитель позволяет не только потреблять синусоидальный ток из питающей сети, но и регулировать фазовый угол между потребляемым током и напряжением. Однако такое устройство содержит в себе четыре транзистора. Для реализации алгоритма работы однофазного ККМ достаточно одного транзистора, это значительно упрощает как силовую схему, так и логику управления. В настоящее время ряд иностранных фирм [9, 10] выпускают драйверы для активной коррекции коэффициента мощности. Однако на россий-

ском рынке отечественная продукция такого вида отсутствует, что делает актуальной задачу разработки и исследования алгоритмов управления устройствами активной коррекции.

В данной статье рассматриваются различные алгоритмы управления корректором коэффициента мощности путем имитационного моделирования в программе *MatLab*.

Корректор коэффициента мощности в составе неуправляемого однофазного выпрямителя показан на рис. 1. ККМ включает в себя накопительный дроссель L , силовой транзистор VT , быстродействующий диод $VD5$, фильтрующий конденсатор C .

Микропроцессорная система управления (МСУ) получает информацию о трех параметрах звена постоянного тока: выходное напряжение мостового выпрямителя $VD1$ - $VD4$ через датчик напряжения ДН1, напряжение нагрузки Z_H посредством ДН2, а также ток дросселя с датчика тока ДТ. Форма потребляемого преобразователем тока определяется входным током индуктивности L . Таким образом, управляя транзистором VT , можно обеспечить синусоидальное потребление тока из питающей сети [2].

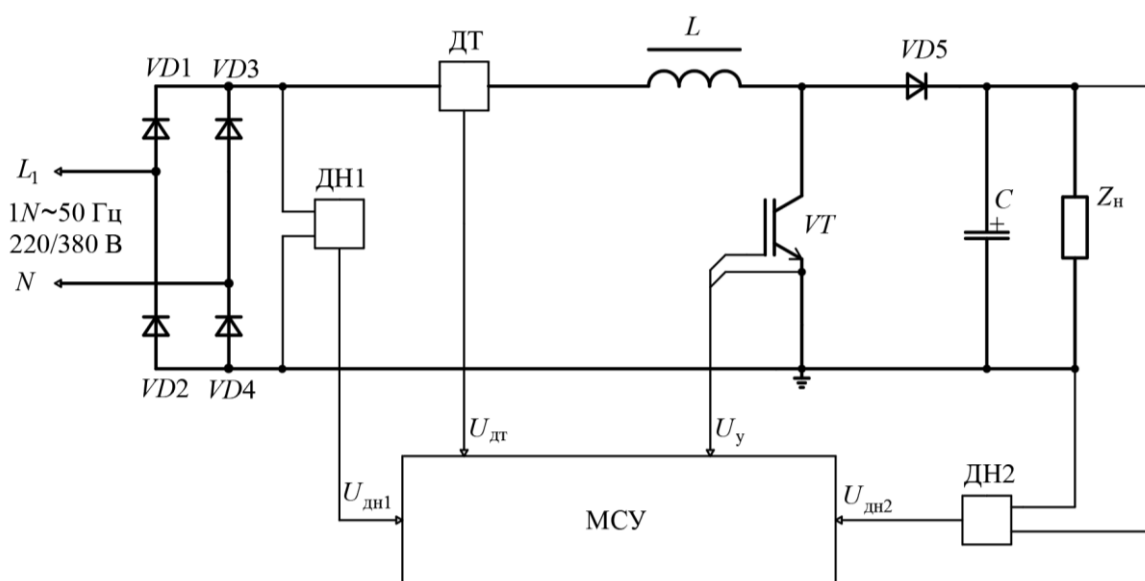


Рис. 1. Функциональная схема однофазного выпрямителя с корректором коэффициента мощности

Рассмотрим математическое описание однофазного выпрямителя с корректором коэффициента мощности. Напряжение на выходе мостовой схемы на диодах $VD1$ - $VD4$ (рис. 1), а также ток через дроссель L в установившемся режиме работы в случае малых пульсаций на периоде коммутации транзистора VT представляют собой несинусоидальную периодическую функцию $f(\omega t)$, которую можно разложить в ряд Фурье [11]:

$$f(\omega t) = a \cdot |\sin \omega t| = \frac{4 \cdot a}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cdot \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cdot \cos 4\omega t + \dots \right), \quad (1)$$

где a – амплитуда сигнала, ω – круговая частота, t – время.

Электромагнитные процессы, которые протекают в корректоре коэффициента мощности на основе обратногоповышающего широтно-импульсного преобразователя, можно определить как [12]

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di_d(t)}{dt} + r \cdot i_d(t) = U_{d0} - (1 - \gamma_0) \cdot u_H(t), \\ C \cdot \frac{du_H(t)}{dt} + \frac{u_H(t)}{R} = (1 - \gamma_0) \cdot i_d(t), \end{cases} \quad (2)$$

где L – индуктивность дросселя, $i_d(t)$ – средний ток в дросселе, r – активное сопротивление дросселя, $U_{d0} = 2/\pi \cdot U_{max}$ – среднее напряжение на выходе выпрямителя, $\gamma_0 \in [0; 1]$ – относительная длительность проводящего состояния транзистора, $u_H(t)$ – напряжение на нагрузке, C – емкость выходного конденсатора, R – активное сопротивление нагрузки.

По системе (2) можно получить дифференциальное уравнение относительно напряжения на нагрузке

$$L \cdot C \cdot \frac{d^2 u_H(t)}{dt^2} + \left(\frac{L}{R} + r \cdot C \right) \cdot \frac{du_H(t)}{dt} + \left[\frac{r}{R} + (1 - \gamma_0)^2 \right] \cdot u_H(t) = (1 - \gamma_0) \cdot U_{d0}. \quad (3)$$

Из выражения (3) определяются средние значения выходного напряжения и тока дросселя

$$U_H = \frac{(1 - \gamma_0) \cdot U_{d0}}{\left[\frac{r}{R} + (1 - \gamma_0)^2 \right]}, \quad (4)$$

$$I_{d0} = \frac{U_{d0}}{r} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{\frac{r}{R} + (1 - \gamma_0)^2}. \quad (5)$$

Для анализа работы однофазного преобразователя (ОП) с корректором коэффициента мощности в программном обеспечении *MatLab / Simulink* выполнено построение двух имитационных моделей с разными алгоритмами управления силовым транзистором. Общая структура моделей одинакова и показана на рис. 2.

Согласно рис. 2, неуправляемый выпрямитель *VZ* получает питание от источника переменного напряжения *ACV* с амплитудой 311 В. Учитывается внутреннее сопротивление источника напряжения r_0 . Токоограничивающий резистор $R_{огр}$ с управляемым контактом *K* обеспечивает снижение броска зарядного тока конденсатора *C* при пуске преобразователя. На выходе ОП подключена активная нагрузка *R*. Параметры основных элементов схемы сведены в табл. 1.

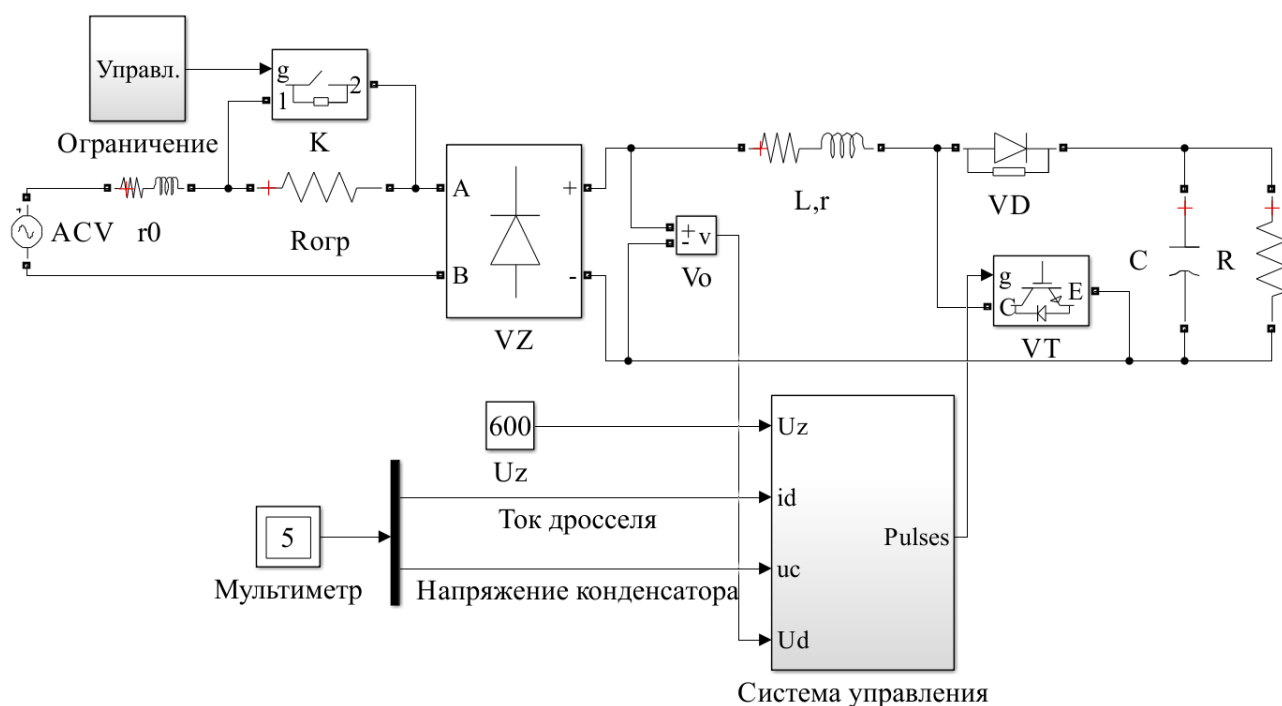

 Рис. 2. Схема однофазного выпрямителя с ККМ в *MatLab / Simulink*

Таблица 1

Параметры основных элементов ОП с ККМ

| Наименование параметра | Значение |
|---|----------|
| Амплитуда переменного питающего напряжения, В | 311 |
| Индуктивность проводов, Гн | 0.00001 |
| Активное сопротивление проводов, Ом | 0.1 |
| Сопротивление токоограничивающего резистора, Ом | 10 |
| Индуктивность накопительного дросселя, Гн | 0.002 |
| Емкость выходного конденсатора фильтра, Ф | 0.001 |
| Сопротивление нагрузки, Ом | 300 |

Система управления ККМ строится по подчиненному принципу с внутренним контуром тока и внешним контуром напряжения и при асинхронном способе управления ККМ структура системы управления показана на рис. 3.

По рис. 3 видно, что сигнал задания выходного напряжения ККМ U_z поступает на задатчик интенсивности, который включает в себя элемент сравнения, нуль-орган *Relay1* и интегрирующее звено И. Затем U_z сравнивается с текущим напряжением на конденсаторе U_c и результат поступает на пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор. Выходное напряжение выпрямителя U_d задает форму потребляемого тока, а сигнал с ПИ регулятора корректирует его амплитуду в зависимости от нагрузки преобразователя. Сигнал задания на ток I_z срав-

нивается с током дросселя I_d , и результирующий сигнал рассогласования поступает на релейный элемент *Relay*. Сигнал с последнего поступает на вход установки *S* триггера и через инверсию – вход установки *R* (сброс).

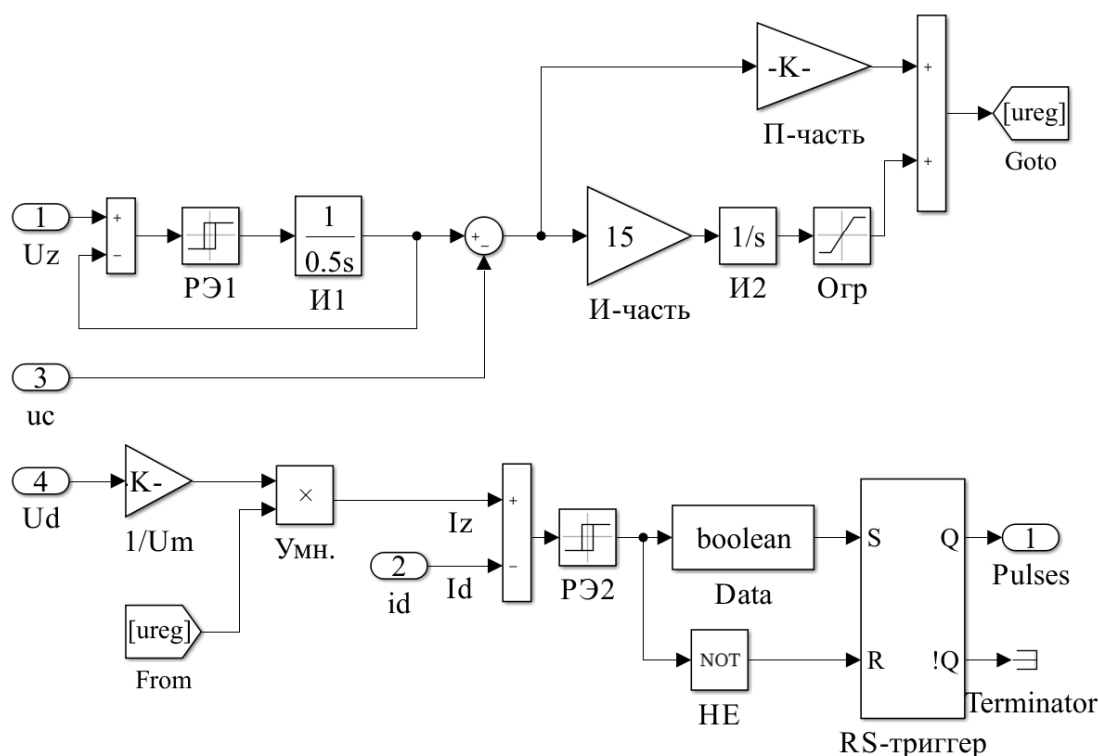


Рис. 3. Система асинхронного управления ККМ

Результаты имитационного моделирования при данном способе управления отражает рис. 4.

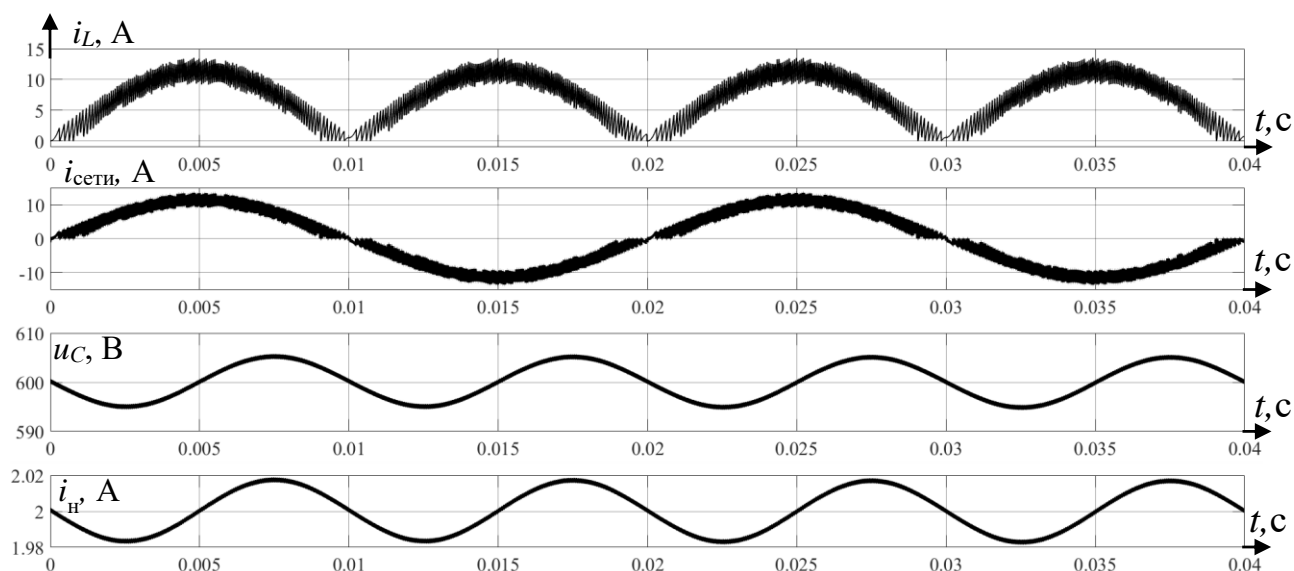


Рис. 4. Осциллограммы работы ОП с ККМ при асинхронном способе управления

Рис. 4 показывает, что ток дросселя i_L , А, имеет вид синусоидальной кривой, взятой по модулю. Его форма определяет потребляемый ток $i_{\text{сети}}$, А. Напряжение на конденсаторе (нагрузке) u_C , В имеет среднее значение 600 В, что в 1.9

раза больше, чем амплитуда входного напряжения. Пульсации тока нагрузки i_H, A , составляют $\pm 1\%$. На рис. 5 для наглядности изображен ток дросселя i_L, A , в увеличенном масштабе.

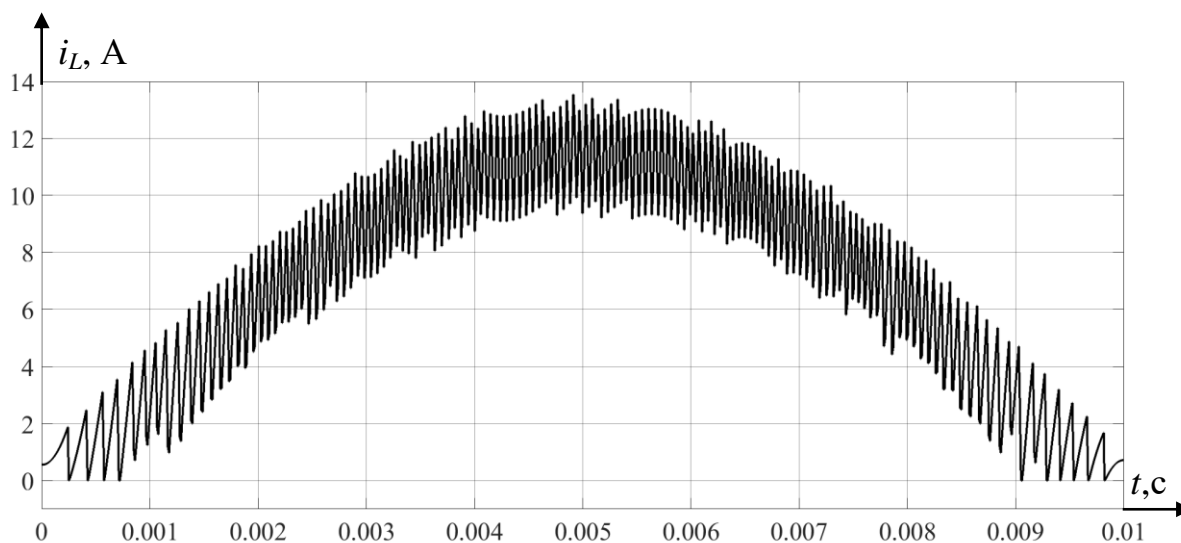


Рис. 5. Оциллограмма тока дросселя в увеличенном масштабе

Рассмотрим второй способ управления ККМ – синхронный. В этом случае система регулирования примет вид, приведенный на рис. 6.

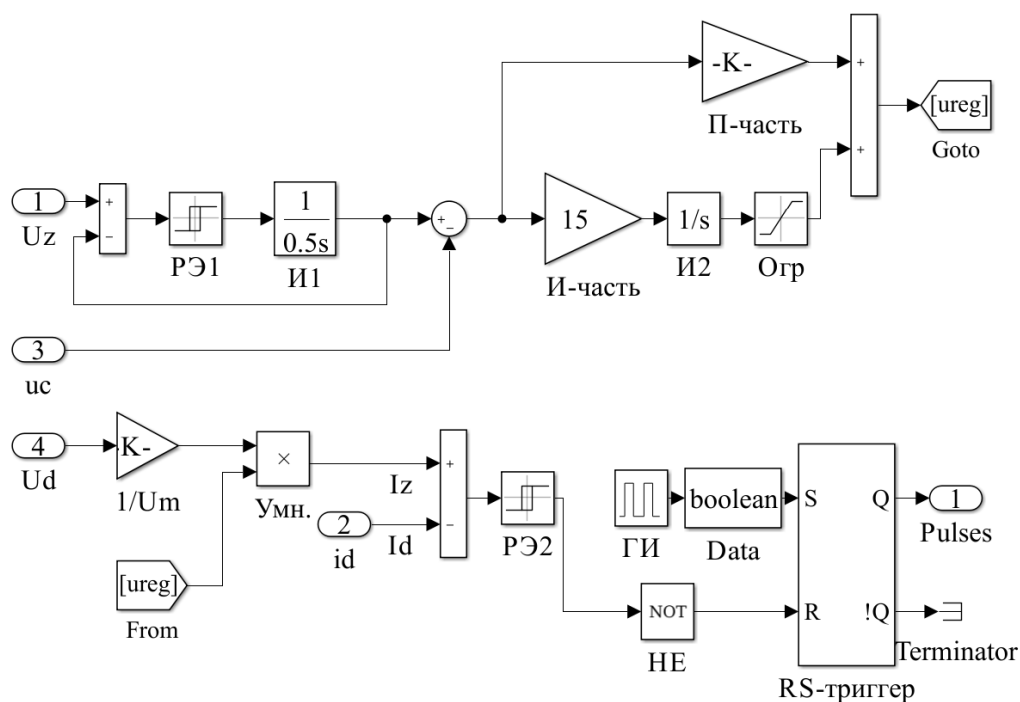


Рис. 6. Система синхронного управления ККМ

Как видно из рис. 6, в систему управления добавлен генератор импульсов (ГИ), который настроен на частоту в 20 кГц. В этом случае оциллограммы токов дросселя, питающей сети, нагрузки и напряжения на конденсаторе отражены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что пульсации тока дросселя, по сравнению с асинхронным управлением, увеличились. Это объясняется тем, что частота переключения транзистора при асинхронном управлении определяется гистерезисной петлей релейного элемента, а при синхронном управлении – генератором импульсов. Отметим, что повышение частоты следования импульсов в ГИ снижает пульсации i_L , А.

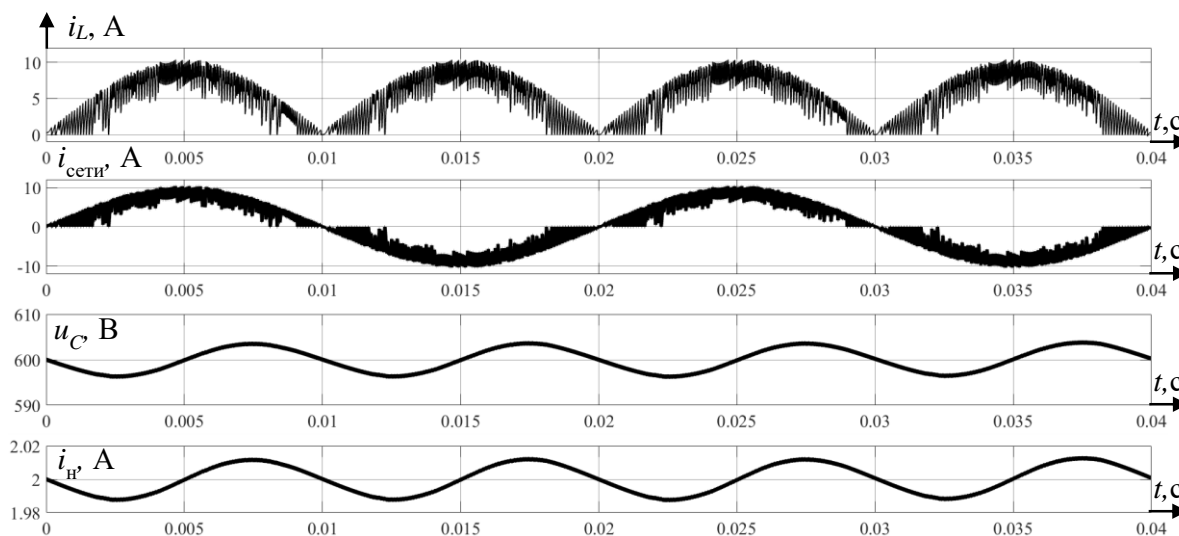


Рис. 7. Осциллограммы работы ОП с КМ при синхронном способе управления

Разработанные имитационные модели однофазного выпрямителя с корректором коэффициента мощности позволили исследовать протекающие электромагнитные процессы. В установившемся режиме по задающему сигналу ОП с КМ обеспечивает выходное напряжение $U_C = 600$ В с пульсациями $\pm 1\%$. При нагрузке $R_H = 300$ Ом выходной ток составлял $I_{\text{вых}} = 2$ А с пульсациями $\pm 1\%$.

Реализовано два алгоритма управления силовым транзистором корректора коэффициента мощности – асинхронный и синхронный. Выявлено, что при первом способе управления, где частота переключения транзистора определяется элементом с гистерезисом, потребляемый из сети ток является более гладким. Синхронный способ позволяет изменять частоту включения или выключения силового ключа путем увеличения / уменьшения длительности и периода следования импульсов в тактовом генераторе. Определение суммарного коэффициента гармонических искажений THD показало, что при асинхронном способе управления $THD_{\text{ар}} = 15.41\%$, а при синхронном методе $THD_{\text{ср}} = 23.63\%$ (частота ГИ составляет 20 кГц). Представленные значения показывают, что применение асинхронного способа управления предпочтительнее.

Полученные результаты подтверждают корректность выбранных элементов, их параметров, и будут использованы при создании макета однофазного выпрямителя с КМ, который позволит улучшить электромагнитную совместимость полупроводниковых преобразовательных устройств.

Библиографический список

1. **Бердников, И.Е.**, Дарьенков, А.Б., Лабутина, А.А., Слuzов, А.П., Соколов, В.В. Электромагнитная совместимость частотно-регулируемого электропривода с питающей сетью // Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2020. – С. 58-67.
2. **Ваняев, В.В.** Преобразовательная техника: учеб. пособие. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 135 с.
3. **Коверникова, Л.И.**, Суднова, В.В., Шамонов, Р.Г. [и др.] Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
4. **Ismael, M., Abdel-Aleem, H.E., Abdelaziz, Y., Bendary, M.A.** *Optimal harmonic passive filters for power factor correction, harmonic mitigation and electricity bill reduction using dragonfly algorithm // 25th International Conference on Electricity Distribution, Madrid. 2019.*
5. **Егоров, Д.Э.**, Довгун, В.П., Боярская, Н.П., Ян, А.В., Слюсарев, А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №6, с. 3-15.
6. **Strelkov, V.F., Sosnina, E. N., Dar'enkov, A. B., Shalukho, A. V., Lipuzhin, I. A.** *Switched-mode power supply for control system // 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Paris, France. 2019, pp. 500-505.*
7. **Стрелков, В.Ф.**, Дарьенков, А.Б., Ваняев, В.В. Квазирезонансный преобразователь с улучшенными характеристиками // Интеллектуальная электротехника. – НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. – №1(9). – С. 98-107.
8. **Venkata, S.** *Power Factor Correction by Boost Converter // International Journal of Science and Research (IJSR). 2020. Vol. 9. No. 1, pp. 787-791.*
9. Контроллеры для корректоров коэффициента мощности [Электронный ресурс] // *STMicroelectronics*. URL: <https://www.st.com/en/power-management/pfc-controllers.html> (Дата обращения: 24.04.2023).
10. Контроллеры для корректоров коэффициента мощности [Электронный ресурс] // *ON Semiconductor*. URL: <https://www.onsemi.com/products/power-management/ac-dc-power-conversion/power-factor-controllers#products=fnN0YXR1c352YWx1ZX4zfiF+TGFzdCBTaGlwbWVudHN+IX5MaWZldGltZX4hfk9ic29sZXRIfg==> (дата обращения: 24.04.2023).
11. **Герман-Галкин, С.В.** Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде *Matlab-Simulink*: учебно-методическое пособие. – СПб: Лань, 2021. – 448с.
12. **Kanaan H. Y., Al-Haddad K.** *A Comparative Study of Single-Phase Power Factor Correctors: Modeling, Steady-State Analysis, Tracking Ability and Design Criteria // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy. 2012.*

**A.B. Dar'enkov, V.V. Sokolov, A.E. Khramov, N.M. Petukhov,
A.P. Sluzov, I.E. Berdnikov**

SIMULATION OF A SINGLE-PHASE RECTIFIER WITH A POWER FACTOR CORRECTOR

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. Simulation modeling of a single-phase AC-to-DC converter with an active power factor corrector was done via an interactive MatLab / Simulink mathematical analysis. This study is relevant due to increasing interest in this type of converter devices and their active distribution, as well as the domestic products of power factor correctors is unavailable. In addition to it, the results of approbation and comparison of various converter control algorithms using the available capabilities of the MatLab computer programs are presented.

Keywords: electromagnetic compatibility, power factor, active power factor corrector, mathematical modeling, MatLab.

References

- [1] I.E. Berdnikov, A.B. Dar'enkov, A.A. Labutina, A.P. Sluzov, V.V. Sokolov. Electromagnetic compatibility of a frequency-controlled electric drive with a supply network // Actual problems of electric power industry. – 2020. - pp. 58-67. (in Russian).
- [2] Vanyaev V. V. Transformative technology: textbook. stipend. - Nizhny Novgorod: NSTU named after R.E. Alekseev, 2020. – 135 p. (in Russian).
- [3] Kovernikova L.I., Sudnova V.V., Shamonov R.G. [et al.] Quality of electric energy: current state, problems and proposals for their solution. – Novosibirsk: Nauka, 2017. – 219 p.
- [4] M. Ismael, H.E. Abdel-Aleem, Y. Abdelaziz, M.A. Bendary. Optimal harmonic passive filters for power factor correction, harmonic mitigation and electricity bill reduction using dragonfly algorithm // 25th International Conference on Electricity Distribution, Madrid. 2019.
- [5] Egorov D.E., Dovgun V.P., Boyarskaya N.P., Yan A.V., Slyusarev A.S. Correction co-power efficiency in power supply systems with multiphase nonlinear loads // Izvestiya vuzov. Energy problems. 2020. No. 6, pp. 3-15. (in Russian)
- [6] Strelkov V.F., Sosnina E. N., Dar'enkov A. B., Shalukho A. V., Lipuzhin I. A. Switched-mode power supply for control system // 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Paris, France. 2019, pp. 500-505.
- [7] Strelkov V.F., Dar'enkov A.B., Vanyaev V.V. Quasi-resonant converter with improved characteristics // Intelligent electrical engineering. – NSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2020. - №1(9). - pp. 98-107. (in Russian)
- [8] S. Venkata. Power Factor Correction by Boost Converter // International Journal of Science and Research (IJSR). 2020. Vol. 9. No. 1, pp. 787-791.
- [9] Controllers for power factor correctors [Online] // STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/power-management/pfc-controllers.html> (Accessed: 04/24/2023).
- [10] Controllers for power factor correctors [Online] // ON Semiconductor. URL: <https://www.onsemi.com/products/power-management/ac-dc-power-conversion/power-factor-controllers#products=fnN0YXRlc352YWx1ZX4zfiF+TGFzdCBTaGlwbWVu-dHN+IX5MaWZldGltZX4hfk9ic29sZXRIfg==> (Accessed: 04/24/2023).

- [11] Herman-Galkin S.V. Virtual laboratories of semiconductor systems in the Matlab-Simulink environment: an educational and methodical manual. - St. Petersburg: Lan', 2021. – 448p. (in Russian)
- [12] H. Y. Kanaan, K. Al-Haddad. A Comparative Study of Single-Phase Power Factor Correctors: Modeling, Steady-State Analysis, Tracking Ability and Design Criteria // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, and Automation, Sorrento, Italy. 2012.

А.С. Загляднов, А.Д. Мурашов, И.М. Трофимов

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЗАТВОРАМИ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ИНВЕРТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрены способы ограничения сквозного тока транзистора в стойке полумостового или мостовом инвертора, выполнен обзор принципов построения драйверов затворной емкости МДП и БТИЗ транзисторов, предложено устройство и его описания для реализации источника тока в затворе МДП и БТИЗ транзистора.

Ключевые слова: полумостовой инвертор напряжения, силовые полупроводниковые приборы, драйвер затвора транзистора, источник тока в затворе.

Стабильность работы высокочастотных импульсных преобразовательных устройств во многом определяется созданием благоприятных условий для работы силовых транзисторных ключей. В настоящее время наиболее популярными являются ключи на МДП транзисторах и на БТИЗ, однако они имеют особенность – паразитные емкости, которые определяют быстродействие транзистора, а также величину динамических потерь. Величины емкостей $C_{зи(зэ)}$ и $C_{зс(зк)}$ зависят от структуры транзисторного ключа. Контроль заряда этих емкостей, а значит, и скорость переключения транзистора осуществляется драйвером, чьи возможности во многом определяют работу преобразователя.

Ключевыми параметрами БТИЗ-транзисторов, определяющими потенциал применения, являются их быстродействие, величина пробивного напряжения и рабочие токи [1]. Однако номинальные характеристики таких полупроводниковых ключей доступны при реализации специальных условий режима работы.

В зависимости от области применения транзистора «благоприятные условия» могут отличаться для конкретной задачи.

Для автономных инверторов напряжения популярными схемотехническими решениями являются топологии полумостового или мостового инверторов напряжения. В зависимости от системы управления инверторы напряжения данной топологии способны формировать переменное напряжение прямоугольной формы или любой заданной (например, синусоидальной). В подобных устройствах помимо реализации высокой скорости переключения транзистора возникает задача – исключение или ограничение сквозного тока через стойку инвертора.

При построении полумостовых и мостовых инверторов, формирующих прямоугольное выходное напряжение, отсутствие сквозных токов может достигаться за счет реализации квазирезонансных инверторов напряжения, позволяющих работать транзисторам в режиме «мягкой коммутации».

Под «мягкой коммутацией» понимают переключение транзисторов в нуле тока или напряжения для исключения динамических потерь. Примером такого инвертора является квазирезонансный инвертор NEON.

Мягкая коммутация квазирезонансного инвертора NEON реализуется за счет системы управления, которая обеспечивает слежение за мгновенными, амплитудными значениями тока через ключи, их фазой момента перехода через ноль, формируя безупречную траекторию переключения транзисторов. Переключение происходит при нулевом токе и нулевом напряжении (ZCZVS), а запираение - при нулевом напряжении (ZVS). Данное решение исключает наличие сквозных токов, однако подобные инверторы подходят для задач, где нет требований к форме выходного напряжения, а сам инвертор работает в режиме прерывного тока дросселя [2].

Однако для полумостовых и мостовых инверторов, формирующих синусоидальное выходное напряжение, наиболее распространен режим работы при непрерывном токе дросселя, что накладывает ограничения на использование квазирезонансного инвертора.

В режиме работы непрерывного тока дросселя возникает необходимость ограничения или контроля сквозного тока через стойку инвертора.

На сегодняшний день существует ряд решений этой задачи, например, в патенте [3] ограничение сквозного тока достигается тем, что в последовательную цепь каждого транзистора введены токоограничивающие резисторы, зашунтированные дросселями насыщения.

Это серьезно повышает надежность устройства, но введение дополнительных пассивных элементов значительно увеличивает массогабаритные показатели.

Альтернативным решением является возможность реализовать ограничение тока путем управления затвором транзисторного ключа.

Сейчас можно выделить следующие способы контролировать заряд затворных емкостей: сопротивлением затвора (скорость и время коммутации задаются сопротивлением при фиксированном напряжении управления), напряжением (скорость коммутации в этом случае определяется du/dt приложенного к затвору), током (определяет скорость заряда затвора) [4].

В рамках анализа драйвера транзистора был реализован полумостовой инвертор напряжения, который работал на частоте коммутации 30кГц, сопротивление нагрузки Z_n было равно 5 Ом. Напряжение питания 300 В.

Осциллограмма напряжения затвора транзистора в режиме «жесткой коммутации» с ограничением di/dt затворным резистором представлена на рис. 1, а. В момент достижения уровня плато Миллера, из-за высокого значения di/dt при наличии индуктивностей в цепи нагрузки, на затворе наблюда-

ются колебания на перезаряд проходной емкости, что вызывает дополнительные динамические потери из-за попыток транзистора закрыться. Напряжение затвора транзистора в режиме «мягкой коммутации» представлен на рис. 1, б. На рис 1, в представлена осциллограмма напряжения затвора при использовании источника тока в качестве управляемого сигнала. Изменяя ток заряда затворных емкостей, можно изменять время открывания транзистора и, соответственно, время нарастания коллекторного тока. В преобразователях с режимом непрерывного тока дросселя возможный сквозной ток будет ограничен по величине и не приведет к существенным динамическим потерям или выходу из строя ключа.

Предлагаемая схемотехническая реализация источника тока в затворе транзистора представлена на рис. 2.

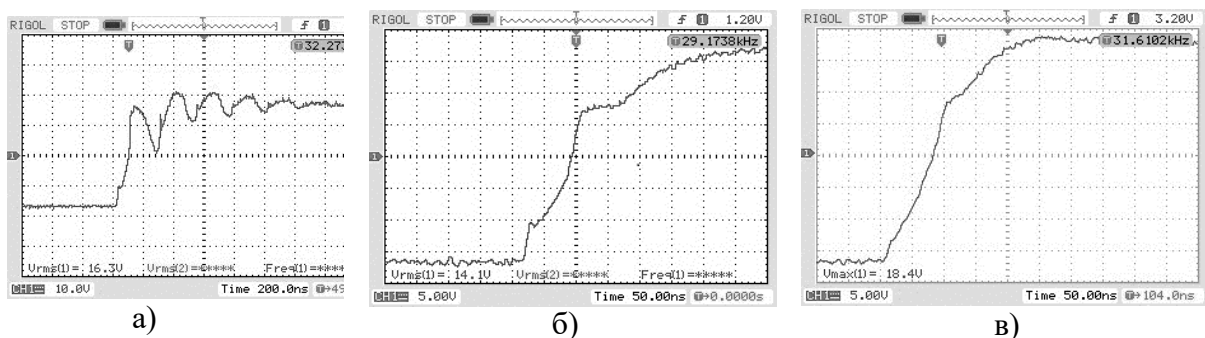


Рис. 1. Напряжение на затворе транзистор:

а) драйвер напряжения с затворным резистором и жесткой коммутацией; б) драйвер напряжения с затворным резистором и мягкой коммутацией; в) драйвер с источником тока

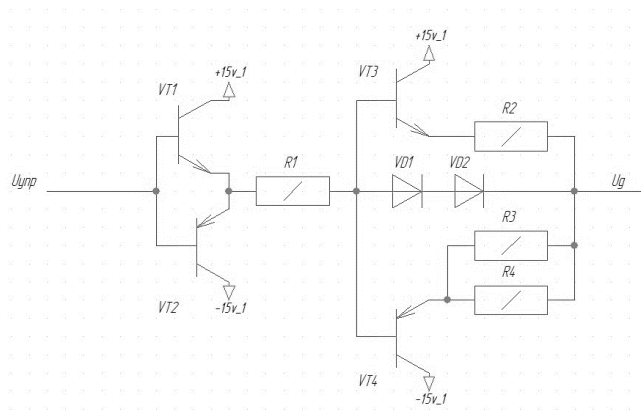


Рис. 2. Предлагаемая принципиальная схема токового драйвера

На схеме, приведенной на рис. 2, транзисторы VT1 и VT2 усиливают ток управления с выхода микросхемы с опторазвязкой. Сопротивлением R1 определяется ток базы выходного транзисторного каскада и ограничивается ток через последовательно включенные диоды VD1 и VD2.

В данном случае драйвер как источник тока работает на отпираии ключевого элемента и состоит из VT3, VD1, VD2, R2. Диоды VD1 и VD2 стабилизируют напряжение цепи последовательного включения БЭ VT3 и резистора R2, величина этого напряжения определяется суммой падений напряжения на

р-п переходе двух диодов. Учитывая падение напряжения на переходе БЭ, постоянный ток заряда можно определить по формуле (1).

$$I = \frac{VD_1 + VD_2 - VT_3}{R_2} \quad (1)$$

Во время разряда затворной емкости VD1 и VD2 не пропускают ток, так как включены в встречном направлении, и скорость разряда определяется сопротивлениями R3 и R4.

Помимо физического макета была разработана имитационная модель (рис. 3), позволяющая оценить форму и величину тока затвора (рис. 4), в соответствии с реализованной схемой.

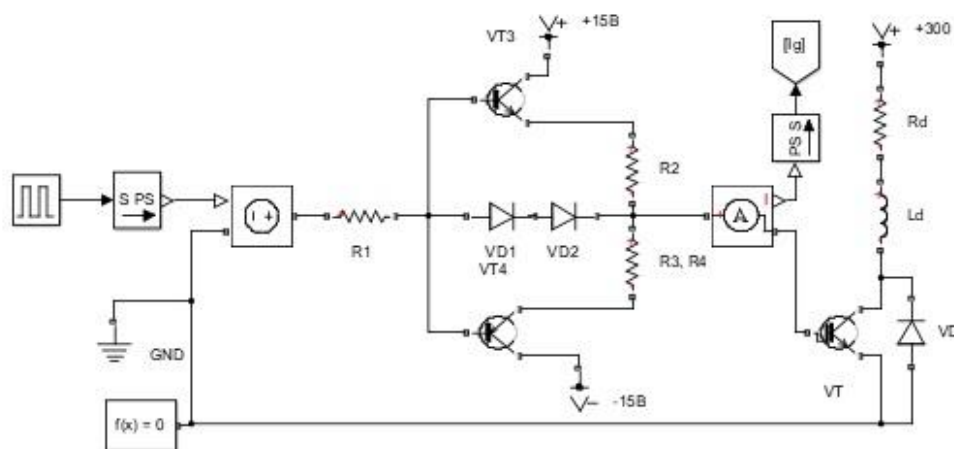


Рис. 3. Имитационная модель драйвера с источником тока в затворе

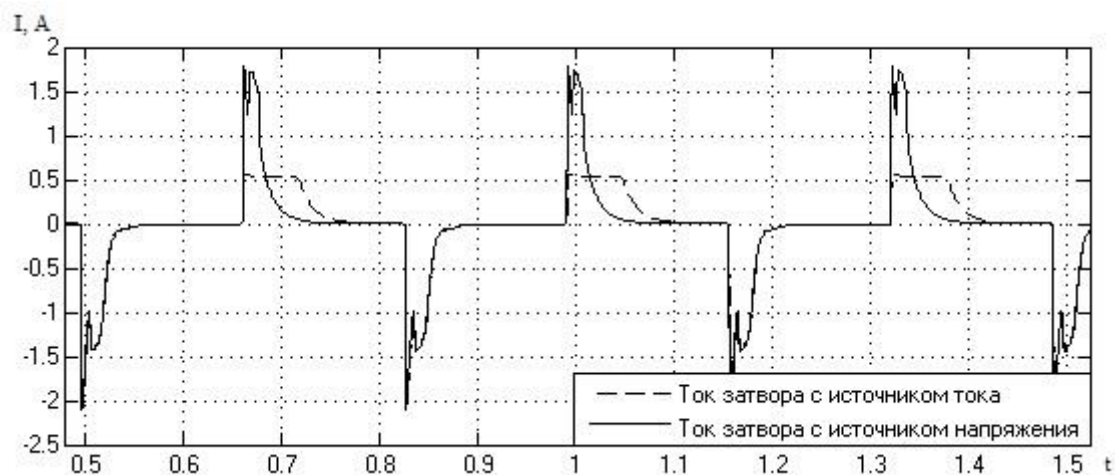


Рис. 4. Форма и величина тока затвора транзистора

В качестве параметров имитационной модели прямое падение на диодах VD1, VD2 указано 0,7 В, падение на VT3 – 0,55В, сопротивление R2 – 1.5 Ом. Величина тока затвора соответствует теоретической и равна 0,56 А (выражение 1).

Реализованный источник тока затворной емкости транзистора позволяет контролировать величину di/dt транзистора, позволяя ограничить сквозной ток

так, чтобы его величина не приводила к существенным динамическим потерям или выходу из строя ключа.

Ограничение скорости изменения тока позволяет не допустить колебательных процессов, вызванных наличием индуктивности, как показано на режиме жесткой коммутации.

Построенная имитационная модель позволяет оценить форму тока заряда затворной емкости и соответствует теоретическому расчету.

Библиографический список

1. **Самарин, А.** Новые семейства IGBT 6-го поколения от International Rectifier / А. Самарина, М. Соломатин // Компоненты и технологии. – 2014. – № 6. – С. 95-98.
2. **Гладышев, О.М.** Особенности топологии инверторных преобразователей NEON™ и способов их управления / О.М. Гладышев, Е.И. Медведев, И.М. Трофимов, В.И. Гребенщиков, А.С. Загляднов // Интеллектуальная Электротехника. – 2022. – № 1. – С. 61-76.
3. Пат. 183603 Российская Федерация, МПК H02M 1/34 (2007.01), СПК H02M 1/34 (2006.01). Устройство ограничения тока силовых транзисторов в инверторе напряжения / Вихорев Николай Николаевич, Гладышев Олег Маратович, Трофимов Иван Михайлович, Чивенков Александр Иванович; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ) – №2018121141; заявл.07.06.2018; опубл.27.09.2018, Бюл. № 27. – 7 с.
4. **Винтрих, А.** Управление изолированными затворами MOSFET/IGBT, базовые принципы и основные схемы / А. Винтрих, У. Николаи, В. Турски и др. // Силовая электроника. – 2013. – Том 5. – № 44. – С. 50-58

A.S. Zaglyadnov, A.D. Murashov, I.M. Trofimov

METHOD FOR CONTROL OF POWER TRANSISTOR GATES IN VOLTAGE INVERTER

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The paper discusses ways to limit the through current of a transistor in the rack of a half-bridge or bridge inverter, an overview of the principles for constructing gate capacitance drivers of MOSFET and IGBT transistors is made, a device and its descriptions for implementing a current source in the gate of an MOSFET and IGBT transistor are proposed.

Key words: half-bridge voltage inverter, power semiconductors, transistor gate driver, gate current source.

References

- [1] Samarin, A. New 6th generation IGBT families from International Rectifier / A. Samarina, M. Solomatin // Components and technologies. 2014. No. 6 P. 95-98.
- [2] Gladyshev, O.M. Features of the topology of NEON™ inverter converters and methods of their control / O.M. Gladyshev, E.I. Medvedev, I.M. Trofimov, V.I. Grebenshchikov, A.S. Zaglyadnov // Intelligent Electrical Engineering. 2022. No. 1. P. 61-76.
- [3] Pat. 183603 Russian Federation, IPC H02M 1/34 (2007.01), SPK H02M 1/34 (2006.01). Device for limiting the current of power transistors in a voltage inverter / Vikhorev Nikolay Nikolaevich, Gladyshev Oleg Maratovich, Trofimov Ivan Mikhailovich, Chivenkov Alexander Ivanovich; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev" (NSTU) - No. 2018121141; application 06/07/2018; publ.09.27.2018, Bull. No. 27. – 7 p.
- [4] Arendt W., Ulrich N., Tobias R., Turski V. Control of insulated gates of MOSFET/IGBT, basic principles and basic circuits // Power Electronics. 2013. No. 5

УДК 621.314.571

DOI: 10.46960/apeen_2023_28

А.В. Серов¹, М.В. Андрюхин², В.Г. Титов¹

СРАВНЕНИЕ ДРАЙВЕРОВ УПРАВЛЕНИЯ СТОЙКОЙ СИЛОВОГО ИНВЕРТОРА С ПОМОЩЬЮ СРЕДЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MICROCAP

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Федеральный научно-производственный центр
«Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»²

Аннотация. В статье рассмотрены два драйвера для управления стойкой силового инвертора в программной среде Micro-Cap. Первый из них – это готовое решение фирмы, которой первой в мире удалось соединить полевой и биполярный транзистор в одном корпусе – International Rectifier. Второй драйвер реализован на аналоговой компонентной базе. Определены преимущества и недостатки каждого из этих решений, а также оценена временная задержка между сигналами, подаваемыми на затворы силовых транзисторов и сигналами управления.

Ключевые слова: драйвер управления затвором, аналоговая компонентная база, среда моделирования Micro-Cap.

В управлении силовыми транзисторами инвертора ключевую роль играет корректно разработанный драйвер управления затвором. Целью работы является оценка времени задержки переключения сигналов, подаваемых на затворы силовых транзисторов в разных реализациях исполнения драйвера. Новизна работы заключается в разработке драйвера на аналоговых компонентах, а также сравнение с готовыми решениями, выпускаемыми известными фирмами, поскольку в настоящее время большая трудность заключается с изготовлением цифровых законченных устройств, а также ограничением отечественной элементной базы.

Драйвер – это устройство сопряжения микроконтроллера с затвором силового транзистора, то есть формирователь сигнала управления затвором в функции логического сигнала.

Рассмотрим имитационную модель драйвера IR2113, реализованную в программной среде Micro-Cap [1], для управления силовыми n-канальными транзисторами [2], показанную на рис. 1.

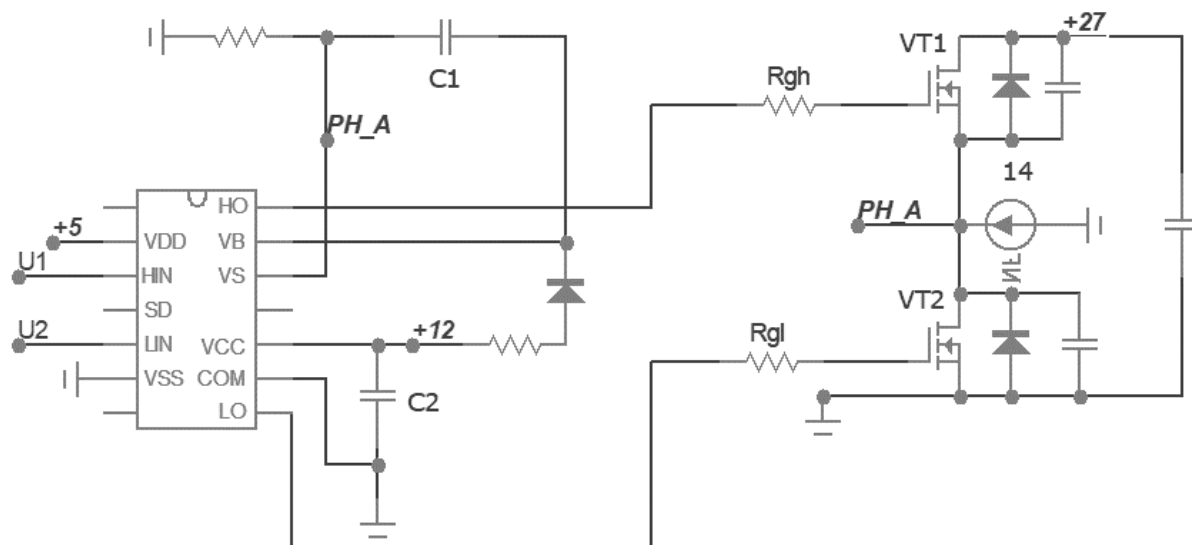


Рис. 1. Драйвер IR2113 управления стойкой силового инвертора

В данной схеме силовое напряжение равняется 27 В. Следует сказать, что данный драйвер не имеет мертвого времени, поэтому создаем RC цепь для создания временной задержки, показанную на рис. 2.

$$\tau = R \times C = 200 \times 10^{-9} = 200 \text{ нс} \quad (1)$$

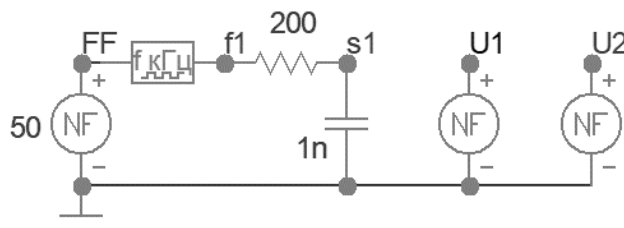


Рис. 2. Реализация генератора сигналов и задание выдержки времени

Частота управляющих сигналов установим 50 кГц. C1 используется для питания цепи управления верхним силовым транзистором, то есть заряд, который накапливает данный конденсатор, используется для питания цепи управления. Заряжается C1, когда открыт нижний силовой транзистор VT2, то есть когда LIN = 1, и VT2 включен, то C1 заряжается до уровня +12В за вычетом падения напряжения на диоде. Емкость C1 выбирается из того, чтобы ее хватило для обеспечения необходимого заряда для транзистора VT1, чтобы оставить его включенным. Чем больше время требуется во включенном состоянии, тем большая требуется емкость [3]. Через диод протекает импульсный ток заряда буферной емкости C1, то есть этот диод должен быть импульсным. По той причине, что транзистор закрывается быстро, диод должен иметь малое время восстановления запирающих свойств и еще быть высоковольтным. Конденсатор C2 нужен для устранения падения напряжения, обусловленного длинной линией от источника питания. То есть данный конденсатор берет на себя ударную нагрузку. Также данный конденсатор обеспечивает защиту от перенапряжения (обеспечивает

протекание тока под действием ЭДС самоиндукции, то есть компенсирует влияние паразитной индуктивности, обусловленной длинной линией от источника питания).

Для анализа работы драйвера выведем осциллограммы переключения силовых транзисторов, сигналов, подаваемых на затвор транзисторов, а также сигналы управления, изображенные на рис. 3 и 4.

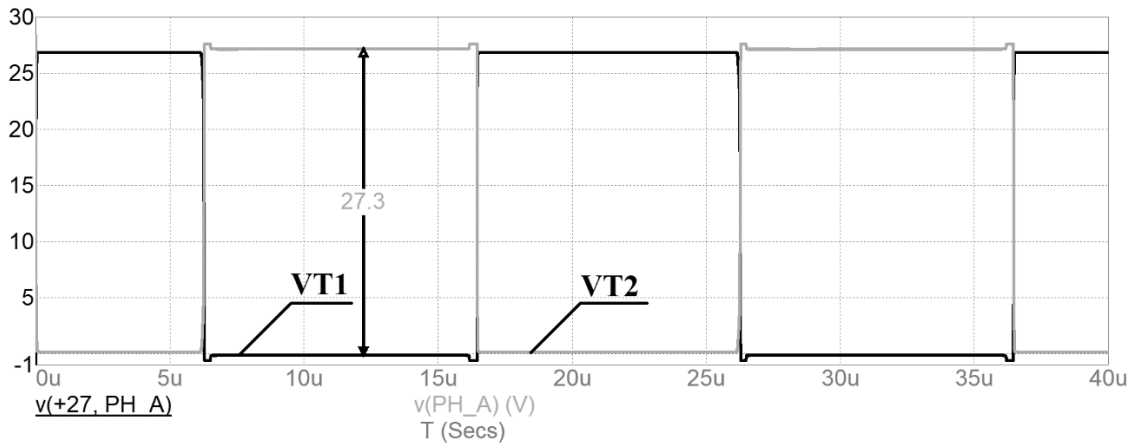


Рис. 3. Осциллограмма переключения силовых ключей

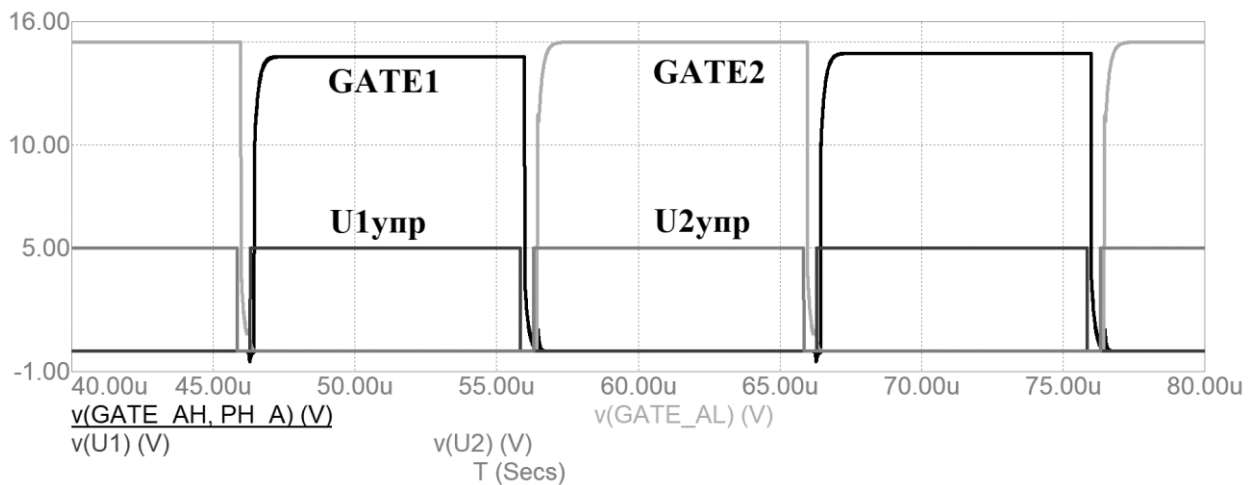


Рис. 4. Осциллограмма сигналов управления и сигналов, подаваемых на затвор силовых транзисторов

Для наглядности вынесем переходный процесс на отдельный график (рис. 5) и оценим время между сигналом управления и импульсом, подаваемым на затвор силового ключа.

На рисунках показаны следующие обозначения:

VT1 – напряжение, прикладываемое к верхнему силовому ключу полумоста;

VT2 – напряжение, прикладываемое к нижнему силовому ключу полумоста;

UGATE1 – напряжение, прикладываемое к затвору верхнего транзистора;

UGATE2 – напряжение, прикладываемое к затвору нижнего транзистора;

U1упр – сигнал управления верхним ключом драйвера;

U2упр – сигнал управления нижним ключом драйвера.

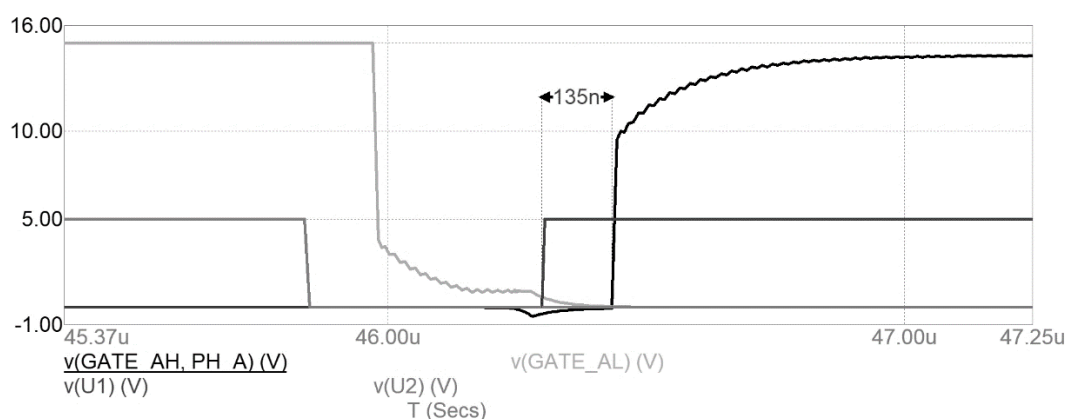


Рис. 5. Осциллограмма для определения времени задержки, между сигналами, подаваемыми на затвор транзистора, и сигналом управления

Видно, что задержка между сигналом управления и сигналом, подаваемым на затвор транзистора, составляет 135 нс.

Следующим этапом создадим имитационную модель драйвера одной стойки инвертора на аналоговых компонентах для управления частотно-регулируемым электроприводом. В качестве силовых ключей применяются n-канальный MOSFET.

Частота переключения ключей задается с помощью генератора импульсов (рис. 2). Для питания логических элементов схемы используется параметрический стабилизатор напряжения на биполярном транзисторе [4], показанный на рис. 6.

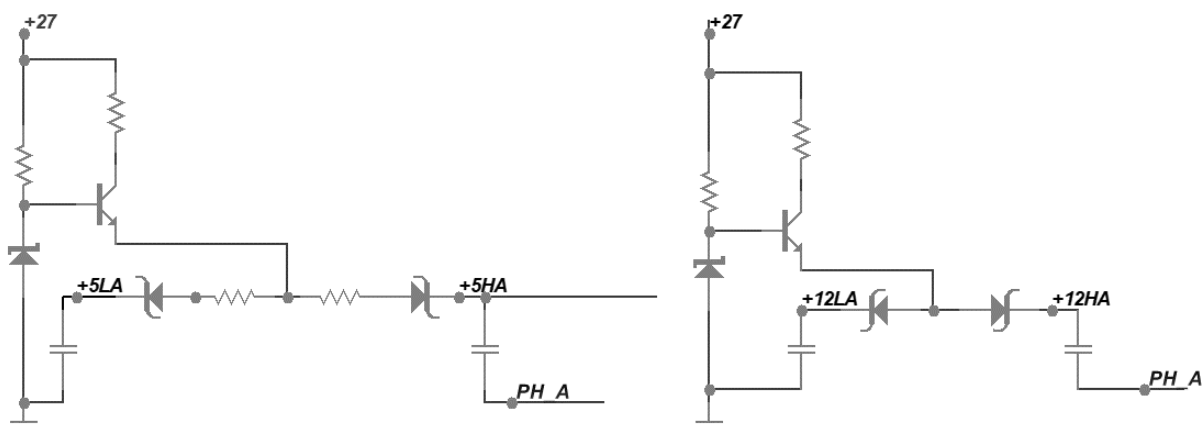


Рис. 6. Параметрический стабилизатор напряжения

Особенностью драйвера является то, что он реализован с гальванической развязкой. Несмотря на то, что схема низковольтная, т.е. уровень напряжения, как упоминалось ранее, составляет всего 27 вольт, данное решение было принято из соображений повышенной надежности и помехоустойчивости к устройству. Импульсы с генератора сигналов приходят через инвертирующие усилители на первичную обмотку трансформатора. Данным способом формируются фронт и спад сигнала управления. Вторичная обмотка разделена на 2 равные части для исключения синфазной помехи, возникающими из-за наличия паразитных емкостей на линии [5]. Далее сигнал с первичной обмотки трансформатора с нужным коэффициентом трансформации поступает на выпрямитель, построенный на

транзисторах. В данной схеме он выступает демодулятором сигнала. Двумя инвертирующими усилителями с обратной связью реализована схема памяти фронтов импульсов, поступающих с демодулятора. Для ограничения тока в данной цепи применен резистор номиналом 100 Ом.

Со схемы памяти через инвертирующие повторители подаем сигнал на полевые транзисторы в цепи управления.

R_{gh} и R_{gl} служат для ограничения начального тока заряда и разряда паразитной емкости затвора на уровне максимально допустимого импульсного тока в цепи управления.

Логическая часть обеспечивает управления двумя транзисторами управления VT3 и VT4. При открытии VT3 начинает протекать заряд паразитной емкости. R_{gh} и R_{gl} выбраны небольшого номинала, чтобы паразитная емкость разряжалась как можно быстрее, иначе будем иметь усилительный режим работы транзисторов. Через VT1 течет ток заряда, через VT4 ток разряда паразитной емкости.

Время запираения силового транзистора – время разряда паразитной емкости затвора, время отпираания – время заряда паразитной емкости.

Транзисторы VT3 и VT4 коммутируют на затвор верхнего транзистора силой стойки напряжение 12 В и потенциал истока. Если открыт VT3, следовательно, получим напряжения 12 В на затворе верхнего силового транзистора по отношению к эмиттеру (при этом VT4 закрыт), следовательно, он открывается. Если закрыть VT1 и открыть VT2, тогда подтягиваем потенциал истока силового транзистора на его затвор, тем самым силовой транзистор закрывается. Схема на аналоговых элементах драйвера управления верхним ключом приведена на рисунке 7. Схема управления нижним ключом строится аналогична, за исключением, что общей точкой будет выступать не « r_{h_a} », а корпус устройства. Стоит заметить, что силовая часть стойки инвертора осталась без изменений, поэтому для простоты на рисунке не показана.

Основной параметр драйвера – допустимый выходной импульсный ток. Требование по схемотехнике – минимизация индуктивности в цепи управления.

Для анализа работы драйвера выведем осциллограмму переключения силовых транзисторов, сигналов, подаваемых на затворы силовых ключей и сигналов управления, представленные на рис. 8,9,10. Видим, что напряжение на силовых транзисторах постоянно и равняется заданному напряжению 27 вольт. На рис. 9 приведены осциллограммы напряжения на затворах верхнего и нижнего ключа, а также сигналов управления. Чтобы открыть верхний ключ силового MOSFET ключа инвертора с N каналом необходимо создать напряжение на затворе большее, чем напряжение питания. Для того, чтобы это реализовать применена схема с кратковременным увеличением потенциала за счет внедрения резистивного делителя 470 Ом и 1 кОм и схемы с общей базой на биполярных транзисторах. Время увеличения потенциала будет определяться сопротивлением в базе силового ключа и его паразитной емкостью. То есть, исходя из этого можем сказать, что работа может обеспечиваться только на высоких частотах. Из рис.

10 видно, что время задержки между сигналом управления и сигналом, подаваемым на затвор транзистора, составляет 66 нс.

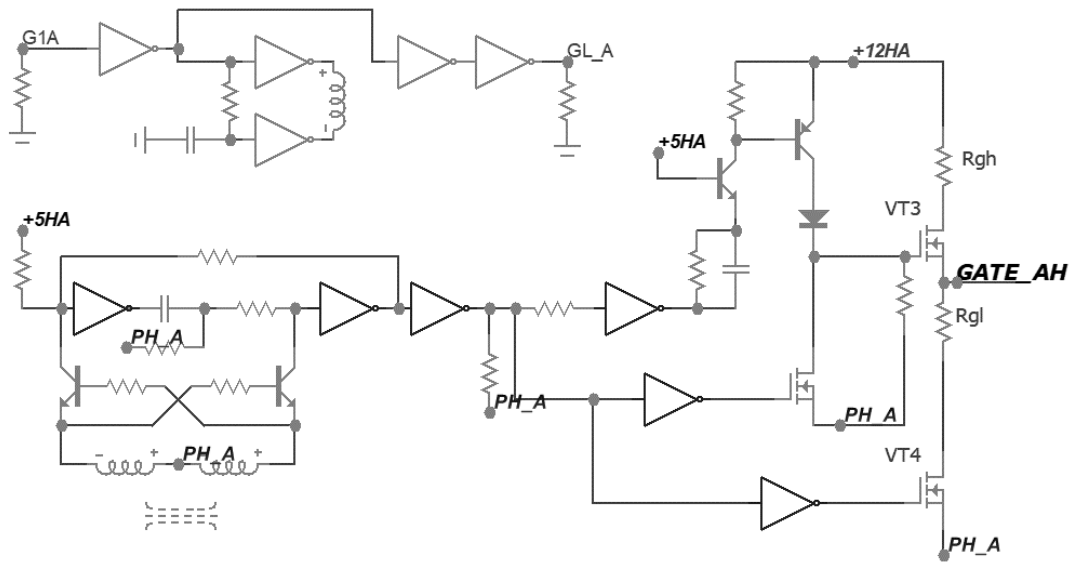


Рис. 7. Драйвер на аналоговых компонентах для управления стойкой силового инвертора

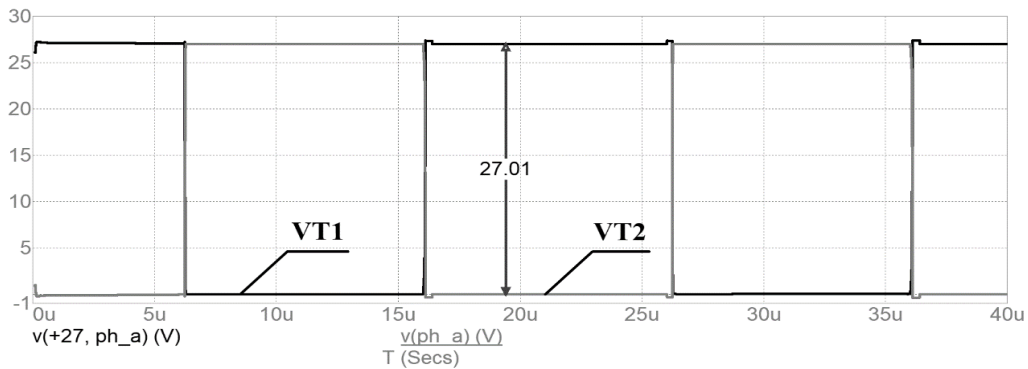


Рис. 8. Осциллограмма переключения силовых ключей при управлении драйвером, реализованным на аналоговых элементах

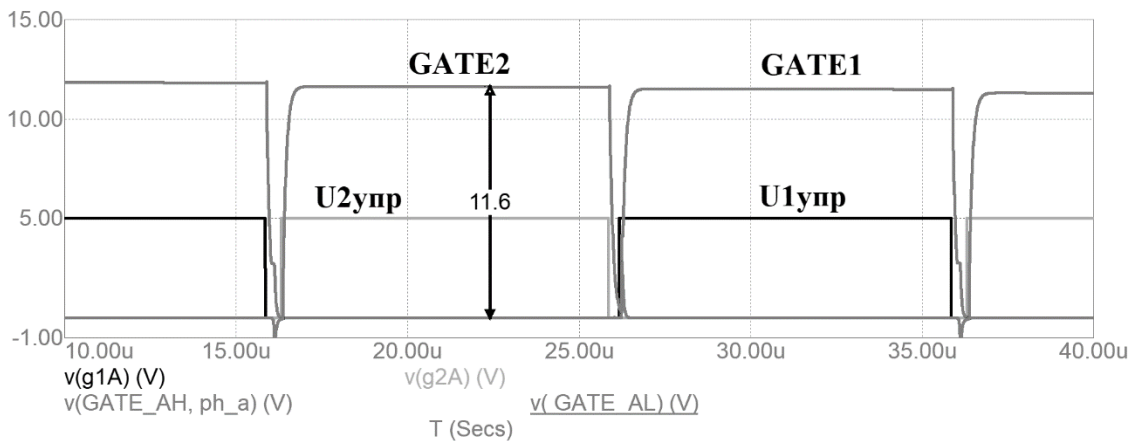


Рис. 9. Осциллограмма сигналов управления и сигналов, подаваемые на затвор силовых транзисторов при управлении драйвером, реализованном на аналоговой элементной базе

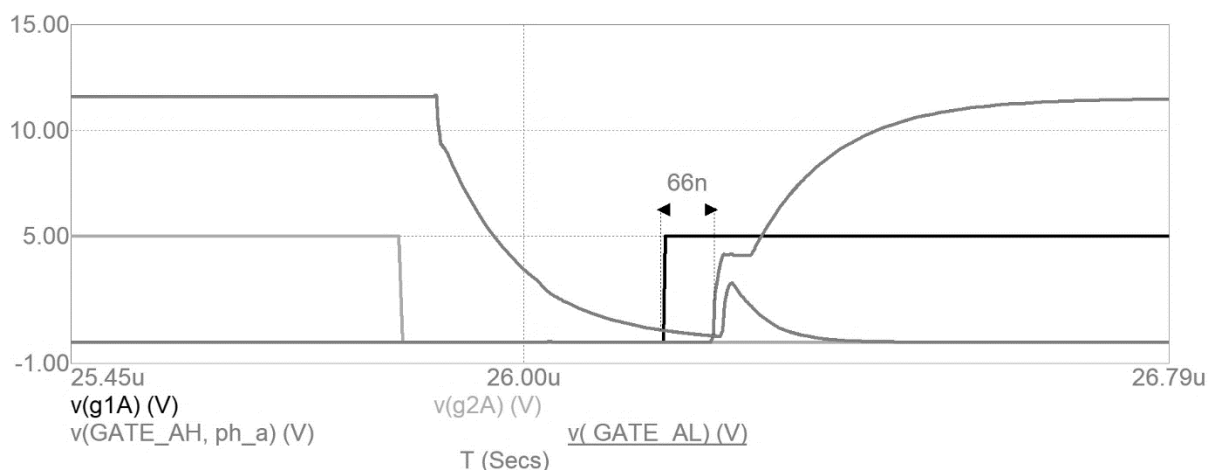


Рис. 10. Осциллограмма для определения времени задержки, между сигналами, подаваемыми на затвор транзистора и сигналом управления при управлении драйвером, реализованном на аналоговой элементной базе

Выводы

В результате были созданы имитационные модели драйверов одной стойки инвертора. Первая модель – готовое решение, предлагаемой фирмой International Rectifier, другая – на аналоговых компонентах. Преимуществом разработанного драйвера является меньшая задержка (разница - 66 нс против 135 нс у IR2113) времени между сигналами управления и сигналами, подаваемыми на затвор силовых транзисторов, наличие гальванической развязки, а также простая элементная база устройства. Недостаток – увеличение габаритов по сравнению с готовым решением. В дальнейшем планируется апробация данной модели на реальном устройстве для управления частотно-регулируемым электроприводом.

Библиографический список

1. **Амелина, М.А.**, Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.
2. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2110-DataSheet-v01_00EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e [Электронный ресурс]: – дата обращения 13.05.2023.
3. <https://habr.com/ru/articles/256353/> [Электронный ресурс]: – дата обращения 23.07.2023
4. **Хоровиц, П.** Хилл, У. Искусство схемотехники. Издательство: М.: Бином, 2009. – 704 с
5. **Ваняев, В.В.** Преобразовательная техника: учеб. пособие / В.В. Ваняев. – Н.Новгород, 2020, Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 135 с.

A.V. Serov¹, M.V. Andryukhin², V.G. Titov¹

COMPARISON OF DRIVERS FOR CONTROLLING A RACK OF POWER INVERTER USING THE MICROCAP CIRCUIT SIMULATION ENVIRONMENT

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev¹
JSC Federal Research and Production Center Nizhny Novgorod Research Institute
of Radio Engineering²

Abstract. The article considers two drivers for controlling a power inverter rack in the Micro-Cap software environment. The first of them is a ready-made solution of the company, which was the first in the world to combine a field-effect and bipolar transistor in one package - International Rectifier. The second driver is implemented on an analog component base. The advantages and disadvantages of each of these solutions are determined, and the time delay between the signals applied to the gates of power transistors and control signals is also estimated.

Keywords: gate driver, analog component base, Micro-Cap simulation environment.

References

- [1] Amelina M.A., Amelin S.A. Circuit simulation program Micro-Cap. Versions 9, 10 - Smolensk, Smolensk branch of NRU MPEI, 2013. - 618 p. ill.
- [2] https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2110-DataSheet-v01_00EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e [Electronic resource]: accessed 05/13/2023.
- [3] <https://habr.com/ru/articles/256353/> [Electronic resource]: - date of access 23.07.2023
- [4] Horowitz, P. Hill, W. The art of circuitry. Publisher: M.: Binom. Binding: soft; 704 pages; 2009
- [5] Vanyaev V.V. Converting technology: textbook. Allowance "Preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. Posobiye" / V.V. Vanyaev; Nizhny Novgorod. state tech. un-t im. R.E. Alekseeva. - Nizhny Novgorod, 2020. – 135 p.

В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев

ФОРМИРОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫМ НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье представлены результаты имитационного моделирования бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты. В качестве результатов исследования приведены графики коэффициента нелинейных искажений и значения выходного напряжения. Показано, что предложенное устройство обеспечивает формирование напряжения постоянного тока заданного значения и полярности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, постоянный ток, коэффициент нелинейных искажений, моделирование.

Формирование выходного напряжения бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты

Полупроводниковые преобразователи электрической энергии нашли широкое применение в объектах водного транспорта (общего судового назначения и электропривода судовых механизмов). В зависимости от типа электрооборудования на судах используется электрическая энергия переменного (якорные, подруливающие и грузоподъемные механизмы) и постоянного тока (рулевая машина, системы зарядки аккумуляторов, питание радиоэлектронной аппаратуры, гребные установки) [1, 2].

Обеспечение стабильных параметров электрической энергии регламентируется правилами Российского классификационного общества и является актуальным для судовой электроэнергетической системы в связи с постоянно увеличивающимся числом электрооборудования и полупроводниковых преобразователей на судах. В особенности в переходных режимах работы электроэнергетической системы, где изменение параметров электрической энергии приводит к изменению режимов работы электрооборудования, в частности, к нарушению устойчивости работы генераторов и турбин электрической станции, к сокращению срока службы электрических машин [3], к отклонению выходных параметров полупроводниковых преобразователей и к снижению эффективности их работы [4].

Для поддержания заданных выходных координат преобразователя в электроэнергетических системах с нестабильными параметрами электрической сети разработан бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты (БНПЧ) [5], однако данное устройство не обеспечивает формирование постоян-

ного напряжения заданной величины для обеспечения динамического торможения электродвигателей или для использования в электроприводах постоянного тока. [6].

Для питания частотно-управляемых электроприводов переменного и постоянного тока постоянное выходное напряжение заданной величины и полярности (рис. 1) БНПЧ формируется из трехфазной системы напряжения с выведенной нулевой точкой, что позволяет создать систему двенадцати напряжений $U_1...U_{12}$, имеющих фазовый сдвиг 30° , без использования согласующих трансформаторов.

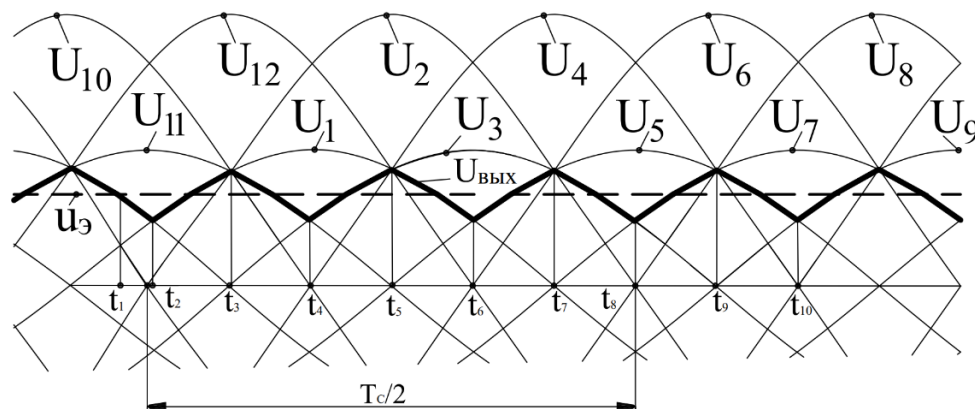


Рис. 1. Выходное напряжение БНПЧ в режиме формирования постоянного тока

Перевод из режима преобразователя частоты в режим управляемого выпрямителя достигается за счет добавления в схему выключателя режима и логического элемента НЕ. Дополнительные n -разрядные электронные ключи и переключатель полярности выходного напряжения обеспечивают работу БНПЧ в режиме управляемого выпрямителя [6].

Имитационная модель и результаты моделирования бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты

Исследование и анализ выходного напряжения $U_{вых}$ БНПЧ осуществлялся на основе модели (рис. 2) [7] и структурной схемы, которая изображена на рис. 1. Данная модель состоит из источника трехфазного напряжения Three-Phase Voltage Source1, измерителя напряжения V1, нагрузки Load1 и БНПЧ.

Через управляющие входы 2 и 3 задаются параметры выходного напряжения (амплитуды и частоты), вход 1 осуществляет ввод в работу БНПЧ, вход 4 обеспечивает выбор режима работы преобразователя, а вход 5 – изменение полярности выходного напряжения в режиме управляемого выпрямителя. Через вход А, В, С и N поступает входное напряжения с источника питания на блок измерения напряжения 8 и коммутатор 10. На выходе А1-А2 формируется выходное напряжение, а на выходе 1 присутствует сигнал с блока формирования эталонного напряжения 4 (рис. 3, а).

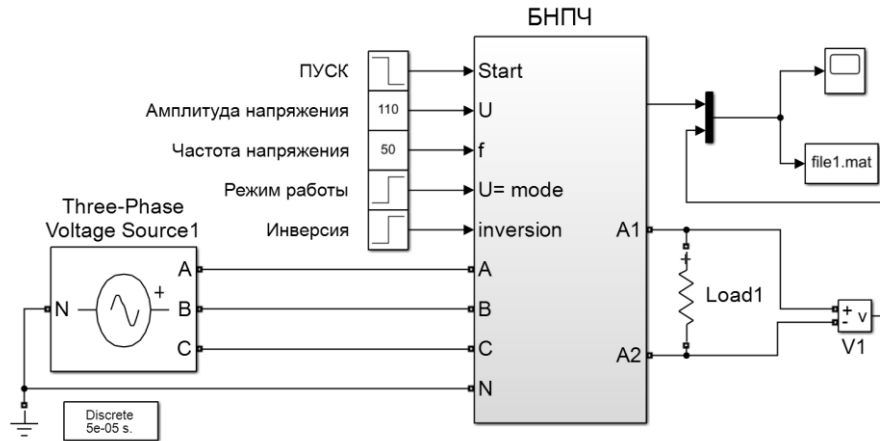


Рис. 2. Имитационная модель БППЧ

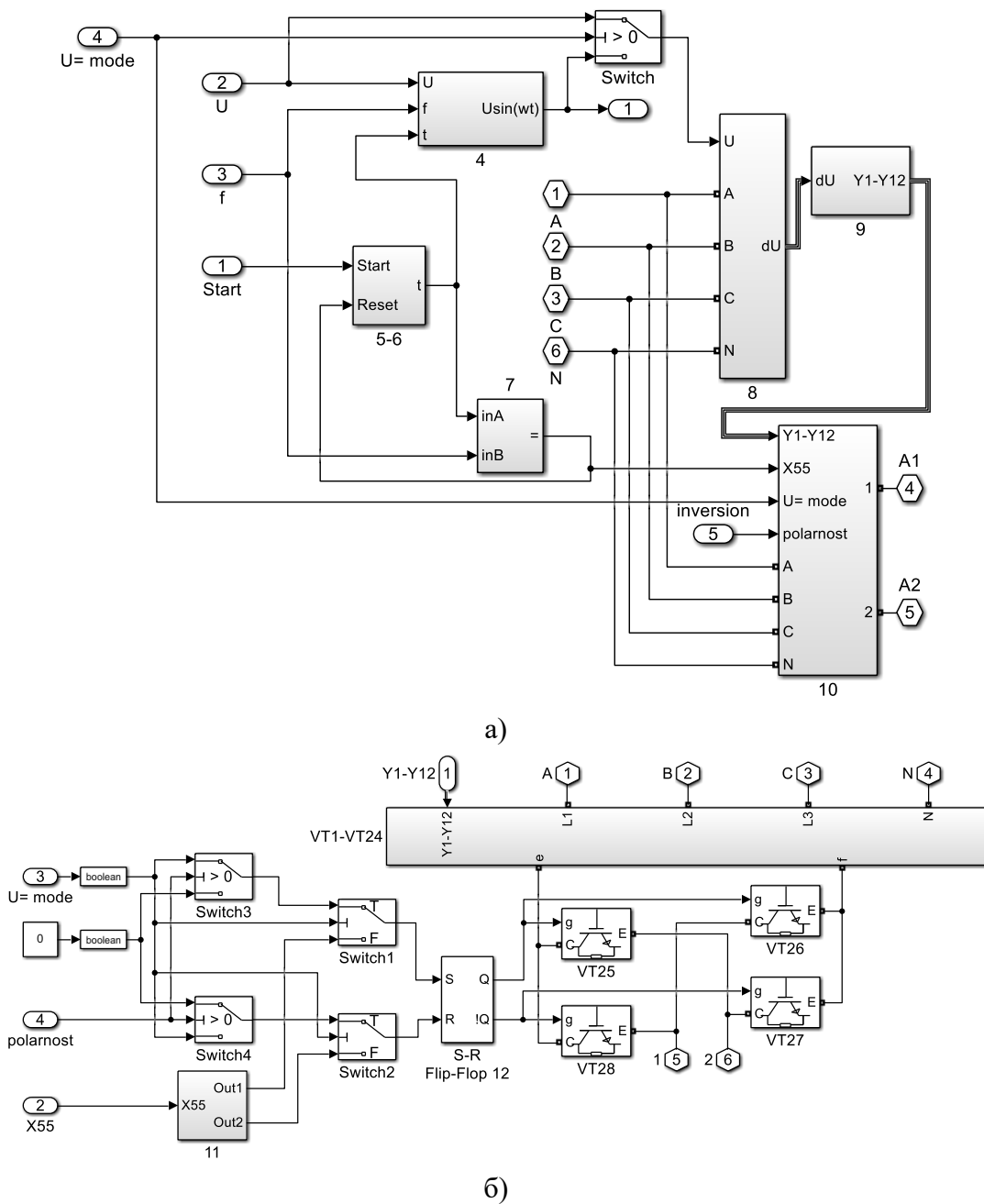


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели БППЧ (а) и блока 10 (б)

Режим управляемого выпрямителя вводится через элемент Switch посредством системы управления. Формирование сигналов управления полупроводниковыми вентилями $Y1-Y12$ обеспечивает блок 8 и 9 на основе входных напряжений $U_1...U_{12}$ и эталонного напряжения, формируемого блоками 4, 5-6 и 7 (описание работы блоков 4-9 и 11 подробно приведено в работе [7]).

Коммутатор 10 содержит 24 полупроводниковых вентиля VT1-VT24 (представлены в виде подсистемы), четыре полупроводниковых вентиля VT25-VT28, блок 11, RS-триггер 12, четыре переключателя Switch1-Switch4. При включении режима управляемого выпрямителя в момент времени t_1 (рис. 1) для формирования выходного напряжения U_e на выходе подсистемы VT1-VT24, имеющего заданный уровень u_e , появляется сигнал $Y9$, который поступает на управляющие входы электронных ключей коммутатора 10. Напряжение U_{ef} через открытые ключи VT28 и VT27 подается на зажимы нагрузки при этом $U_{вых} = U_{ef}$. В моменты времени t_1-t_{10} коммутатор 10 подключает к выходам e и f наиболее подходящее к эталонному сигналу одно из двенадцати напряжений $U_1...U_{12}$ (рис. 1).

Элементы Switch1-Switch4, RS-триггер 12 и блок 11 управляют полупроводниковыми вентилями VT25-VT28, в результате на выходе БНПЧ формируется знакопостоянное напряжение в зависимости от состояния сигнала на входе 4 и режима работы устройства. Таким образом, БНПЧ обеспечивает на выходе формирование переменного напряжения с заданной частотой и амплитудой или постоянного напряжения заданного уровня и полярности.

Результаты моделирования без использования выходного фильтра представлены на рис. 4 и рис. 5 при частоте напряжения источника электроэнергии $f_l=50$ Гц, амплитуде линейного напряжения источника электроэнергии 565.7 В и мощности нагрузки на выходе БНПЧ при $P_n = 4$ кВт.

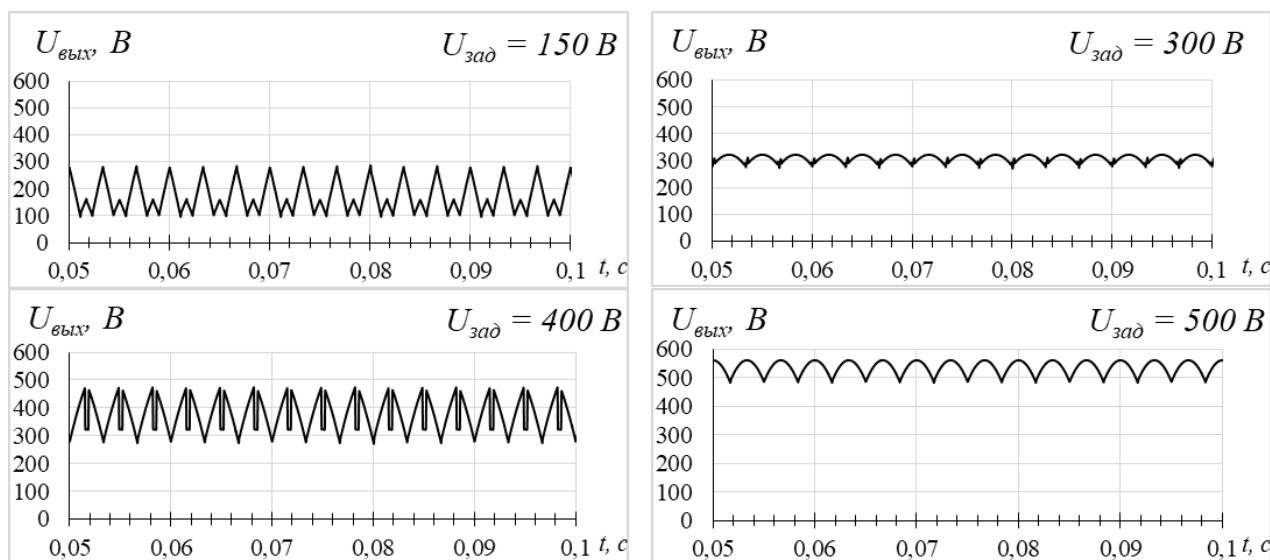


Рис. 4. Диаграммы выходного напряжения БНПЧ

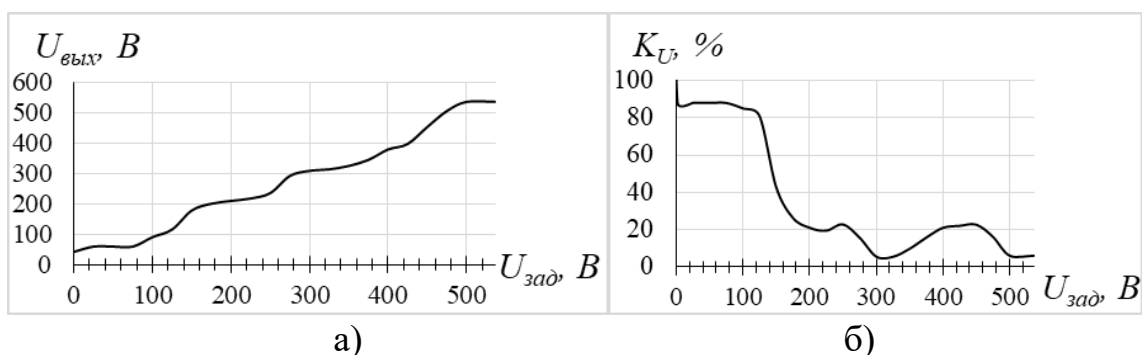


Рис. 5. Результаты моделирования: а – график выходного напряжения; б – график коэффициента нелинейных искажений выходного напряжения

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что БНПЧ обеспечивает формирование выходного напряжения постоянного тока с заданными параметрами в диапазоне от 11% до 100% амплитуды линейного напряжения источника (рис. 4 и рис. 5). В диапазоне $0,57-1 U_{зад}$ формирование выходного напряжения происходит только из линейных напряжений (рис. 4 и рис. 5, а). Коэффициент нелинейных искажений K_U не превышает 26% в диапазоне $0,32-1 U_{зад}$ (рис. 5, б).

При значении заданного напряжения менее 11% от амплитуды линейного напряжения БНПЧ работает в режиме прерывистого тока, что объясняет высокое значение K_U и отсутствие регулирования амплитуды выходного напряжения. Низкое значение K_U наблюдается в случаях, когда заданная амплитуда выходного напряжения наиболее близка по значению с амплитудой входного напряжения, в этом случае практически отсутствуют импульсные составляющие (рис. 4, $U_{зад} = 300$ В и $U_{зад} = 500$ В). В других же случаях в форме выходного напряжения будут присутствовать импульсные составляющие (рис. 4, $U_{зад} = 150$ В и $U_{зад} = 400$ В), которые могут быть снижены при использовании электрического фильтра. Введение в систему управления БНПЧ алгоритмов широтно-импульсной модуляции позволит снизить уровень гармонических составляющих выходного напряжения и регулировать выходное напряжение при низких значениях заданного напряжения.

Таким образом, представленный БНПЧ имеет расширенные функциональные возможности, обеспечивая формирование переменного напряжения с заданной частотой и амплитудой или постоянного напряжения заданного уровня и полярности.

Выводы

Результаты имитационного исследования БНПЧ показали, что разработанное устройство обеспечивает возможность подключения выходных зажимов к наиболее подходящему эталонному напряжению (в режиме формирования постоянного и переменного тока) входного напряжения U_1-U_{12} .

Предложенное устройство имеет расширенные функциональные возможности и может быть использовано для питания электроприводов постоянного и

переменного тока, обеспечивая режимы торможения постоянным током, в автономных электроустановках с переменной частотой вращения привода генератора, однако для обеспечения электромагнитной совместимости требуется применение выходного фильтра.

В рамках данной работы авторами разработан вариант БНПЧ [8], коммутатор которого содержит двенадцать силовых электронных ключей вместо двадцати восьми используемых в [5], что позволит повысить надежность системы и снизить массогабаритные показатели устройства.

Библиографический список

1. **Сугаков, В.Г.** Цифровое фазосмещающее устройство и его области применения на объектах водного транспорта / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. статей. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ. Р. Е. Алексеева, 2017. С. 99-103.
2. **Самулеев, В. И.** Техничко-экономические аспекты и проблемы внедрения роторных гребных установок при модернизации и постройке судов (на примере проектов 1809 и CNF11CPD). / В.И. Самулеев, Ю.П. Мухин // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. № 69. – С. 81-94. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi69.219>
3. **Fuchs, E.** Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. Academic Press, 2015. – 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
4. **Анисимов, Я.Ф.** Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках / Я.Ф. Анисимов. – Л.: Судостроение, 1973. – 227 с.
5. Пат. 2691968, Рос. Федерация, МПК H02M 5/27. Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2018123270; Заявл. 26.06.2018; Опубл. 19.06.2019.
6. Пат. 2784879 Российская Федерация, МПК H02M 5/275. Непосредственный преобразователь частоты и напряжения / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Малышев Ю.С.; — № 2021134841; Заявл. 26.11.2021; Опубл. 30.11.2022; Бюл. № 34.
7. **Сугаков, В.Г.** Влияние изменения параметров источника электроэнергии на выходное напряжение бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления». 2021. № 37. С. 48-68. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.03
8. **Сугаков, В.Г.,** Варламов, Н.С., Малышев, Ю.С. Пат. 2787121 Российская Федерация, МПК H02M 5/27. Непосредственный преобразователь частоты бестрансформаторный / № 2022120275; Заявл. 22.07.2022; Опубл. 29.12.2022; Бюл. № 1.

V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Yu.S. Malyshev

GENERATION OF DIRECT CURRENT WITH A TRANSFORMER-FREE DIRECT FREQUENCY CONVERTER

Volga State University of Water Transport

Abstract. The article presents the results of simulation of transformer-free direct frequency converter. According to the research results, graphs of the total harmonic distortions and the values of the output volt-ages are given. It is shown that the proposed device provides the formation of a DC voltage of a given value and polarity.

Key words: cycloconverters, direct current, total harmonic distortion, modeling.

References

- [1] V.G. Sugakov and N.S. Varlamov “Cifrovoye fazosmeshchayushchee ustrojstvo i ego oblasti primeneniya na obektah vodnogo transporta” [Digital phase-shifting device and its applications at water transport facilities] *Aktual'nye problemy elektro-energetiki sb. nauch.-tekhn. statej [Actual problems of electric power]*, pp. 99-103, 2017 (in Russian).
- [2] Samuleev, V.I.S. and Mukhin, “Tekhniko-ekonomicheskie aspekty i problemy vnedreniya rotnykh grebnykh ustanovok pri modernizacii i postrojke sudov (na primere proektov 1809 i CNF11CPD)” [Techno-economic aspects and problems of the rotary rowing units introduction in the modernization and construction of ships (on the example of projects 1809 and CNF11CPD)] *Russian Journal of Water Transport*, no. 69, pp. 81-94, 2021 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi69.219>.
- [3] Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
- [4] Ya.F. Anisimov “Osobennosti primeneniya poluprovodnikovyykh preobrazovateley v sudovykh elektroustanovka” [Features of the use of semiconductor converters in ship electrical installations], *Sudostroyeniye [Shipbuilding]*, Leningrad, 1973, p. 227
- [5] Pat. 2691968, Ros. Federation, IPC H02M 5/27. Transformerless direct frequency converter / V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, N.S. Varlamov; dec. and patent region. FGBOU VO "Volzhsk. state University of Water Transport", No. 2018123270; Appl. 06/26/2018; Published 06/19/2019.
- [6] Pat. 2784879, Ros. Federation, IPC H02M 5/275. Direct frequency and voltage converter / V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Y.S. Malyshev; dec. and patent region. FGBOU VO "Volzhsk. state University of Water Transport", No. 2021134841; Appl. 11/26/2021; Published 11/30/2022.
- [7] V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Yu.S. Malyshev “Vliyaniye izmeneniya parametrov istochnika elektroenergii na vykhodnoye napryazheniye bestransformatornogo neposredstvennogo preobrazovatelya chastoty” [Influence of changing the parameters of the power source on the output voltage of a transformerless direct frequency converter], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledova-tel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems]*, 2021, no. 37, pp. 48–68, DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.03
- [8] Pat. 2787121, Ros. Federation, IPC H02M 5/27. Direct frequency converter without transformer / V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Y.S. Malyshev; dec. and patent region. FGBOU VO "Volzhsk. state University of Water Transport", No. 2022120275; Appl. 07/22/2022; Published 29/12/2022.

УДК: 621.311.6

DOI: 10.46960/apeen_2023_43

Д.А. Ульянов, М.А. Константинов

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА И ФОРМИРУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПИ ДВОЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ АККУМУЛЯТОРНЫМ ЗВЕНОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Для резервного электропитания ответственных потребителей используются электрохимические аккумуляторные батареи (АКБ) за счет наилучшего времени отклика и широкого диапазона рабочих токов. Зависимость напряжения АКБ от степени заряда является нелинейной, что требует, как стабилизации выходного тока зарядного устройства (ЗУ), оснащенного функцией корректора коэффициента мощности (ККМ), так и стабилизации выходного напряжения инвертора. В статье описан предлагаемый алгоритм работы ККМ и алгоритм формирования выходного напряжения инвертора. Проведено моделирование работы устройства при различной степени заряда АКБ и определены параметры качества потребляемого тока и формируемого напряжения для каждого из них.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, коэффициент несинусоидальности, корректор коэффициента мощности, инвертор напряжения, низкочастотный фильтр.

Согласно [1], потребители первой категории должны питаться от двух независимых источников питания. В качестве резервного источника электроснабжения может выступать АКБ, которая способна обеспечить электроснабжение ответственных потребителей в случаях возникновения сбоев в электрической сети (прерываний, провалов напряжений и т.д.) на время, определяемое количеством запасенной накопителем энергии. Для согласования параметров аккумуляторной батареи с параметрами электросети необходимы преобразователи: зарядное устройство и инвертор напряжения. Структура двойного преобразования энергии с промежуточным аккумуляторным звеном приведена на рис. 1.

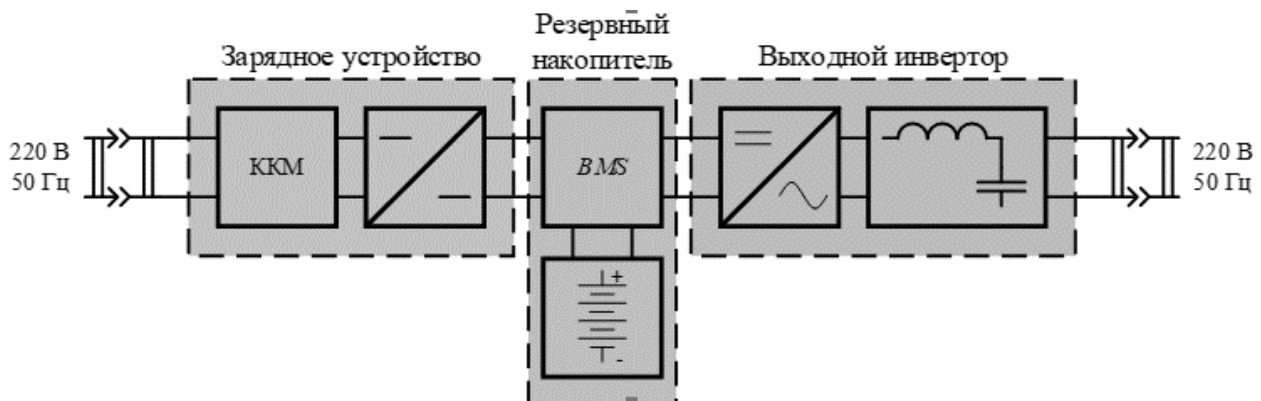


Рис. 1. Структурная схема резервного электропитания на базе АКБ

Напряжение гальванического элемента (ГЭ) литий-ионного типа имеет нелинейную зависимость относительно степени заряда [2,3]. АКБ на высокие мощности набираются из большого числа ГЭ, соединенных последовательно и параллельно. С увеличением количества последовательно соединенных ГЭ растет нестабильность напряжения, зависящая от степени заряда АКБ. Следовательно, ЗУ должно иметь стабилизированный выходной ток, в то время как инвертор напряжения формирует стабилизированное синусоидальное выходное напряжение.

Зарядные устройства в настоящее время выполняются преимущественно по схемотехнике импульсного блока питания, которые оснащаются специальными устройствами коррекции коэффициента мощности (ККМ), которое позволяет приблизить форму потребляемого тока к той, которая наблюдается при включении в сеть чисто-активной нагрузки [4,5]. Существуют пассивные корректоры, основанные на особом включении емкостных и индуктивных элементов, но они обладают недостатками в виде повышенных массогабаритных показателей, а также сильной нестабильности при изменении параметров нагрузки. Поэтому на рис. 2 предлагается структурная схема импульсного ККМ, обладающего меньшими массогабаритными показателями, и позволяющая поддерживать коэффициент мощности на высоком уровне в меньшей зависимости от параметров нагрузки.

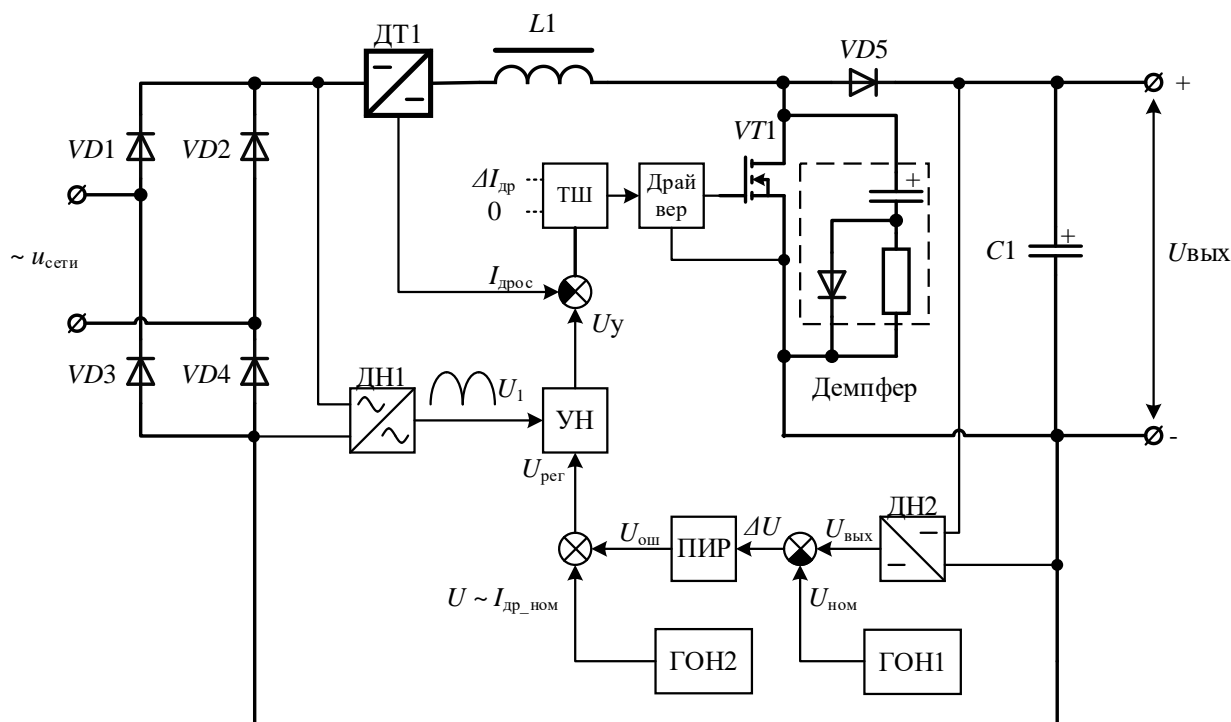


Рис. 2. Импульсный корректор коэффициента мощности на основе повышающего преобразователя постоянного напряжения

Управление транзистором осуществляется за счет сравнения сигнала датчика тока дросселя (ДТ1) и сигнала датчика входного напряжения (ДН1). Когда величина напряжения, снимаемая с ДТ1, сравнивается с величиной напряжения

ДН1, выход триггера шмитта (ТШ) переключается в низкое логическое состояние, и драйвер системы управления закрывает транзистор VT_1 . В момент размыкания транзистора VT_1 ток дросселя L_1 протекает через диод VD_5 в выходную емкость C_1 , линейно убывая, и на нагрузке появляется добавка напряжения. Когда величина тока дросселя станет больше заданного отклонения от номинального значения $\Delta I_{др}$, выход ТШ переключится в высокое логическое состояние – и драйвер системы управления откроет транзистор VT_1 . Стабилизация напряжения на выходе ККМ происходит за счет формирования напряжения регулирования $U_{рег}$ с помощью умножителя напряжения (УН), который перемножает сигналы ДН1 и сигнала регулирования $U_{рег}$ с необходимым коэффициентом пропорциональности. Сигнал регулирования $U_{рег}$ формируется за счет сложения сигнала U , пропорционального номинальному току дросселя $I_{др.ном}$, и сигнала ошибки $U_{ош}$, который в свою очередь представляет собой сравнение сигнала выходного датчика напряжения (ДН2) $U_{вых}$ и номинального напряжения на нагрузке $U_{ном}$. Таким образом, возможно «сдвигать» порог переключения транзистора VT , поддерживая постоянное напряжение на нагрузке.

На рис. 3 приведена структурная схема инвертора напряжения с синусоидальным стабилизированным выходным напряжением.

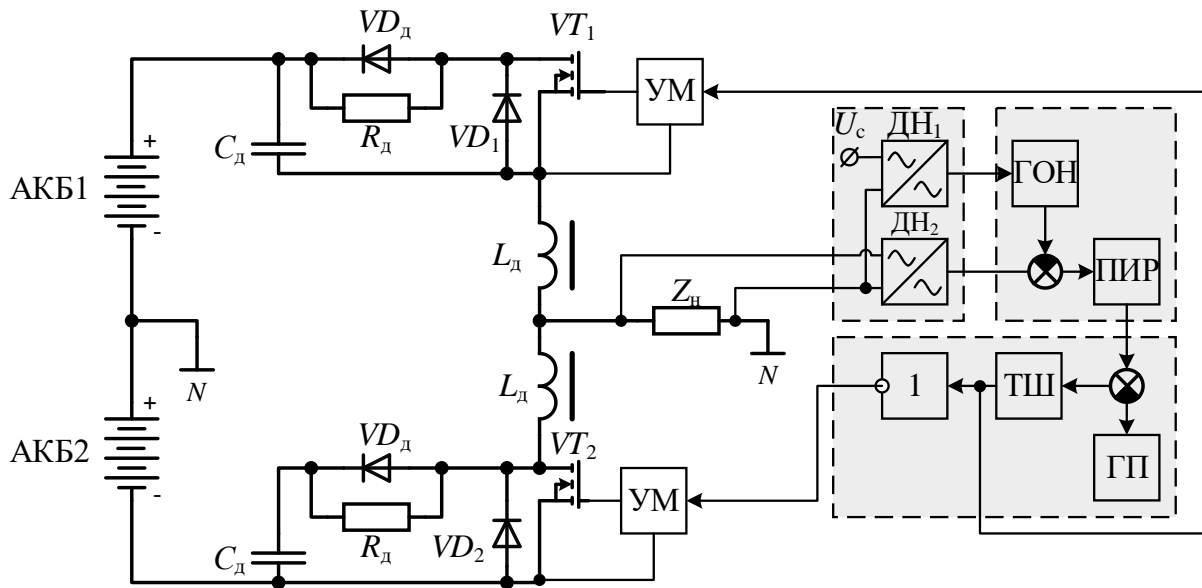


Рис. 3. Инвертор напряжения с синусоидальным стабилизированным выходным напряжением

Демпфирующие цепи, образованные элементами $R_д$, $C_д$, $VD_д$, служат для снижения коммутационных перенапряжений, возникающих в момент переключения силовых транзисторов, и ограничения скорости нарастания напряжения dU/dt .

Индуктивность $L_д$ служит для ограничения скорости нарастания тока (dI/dt) как через силовые транзисторы (VT_1 , VT_2), так и через антипараллельные диоды (VD_1 , VD_2).

Синхронизация опорного синусоидального напряжения с напряжением сети происходит за счет сигнала датчика напряжения сети (ДН1). Опорный синусоидальный сигнал вычитается из сигнала датчика напряжения нагрузки (ДН2). Полученный сигнал ошибки усиливается с помощью ПИР и складывается с пилообразным сигналом тактовой частоты (ГП) с обратным знаком. Полученная разность сигналов поступает на вход ТШ, на выходе которого формируются импульсы управления транзистором верхнего плеча. Сигналы управления транзистором нижнего плеча формируются с выхода ТШ через инвертор. Затем сигналы управления усиливаются с помощью усилителя мощности (УМ) и подаются на управляющие переходы силовых транзисторов.

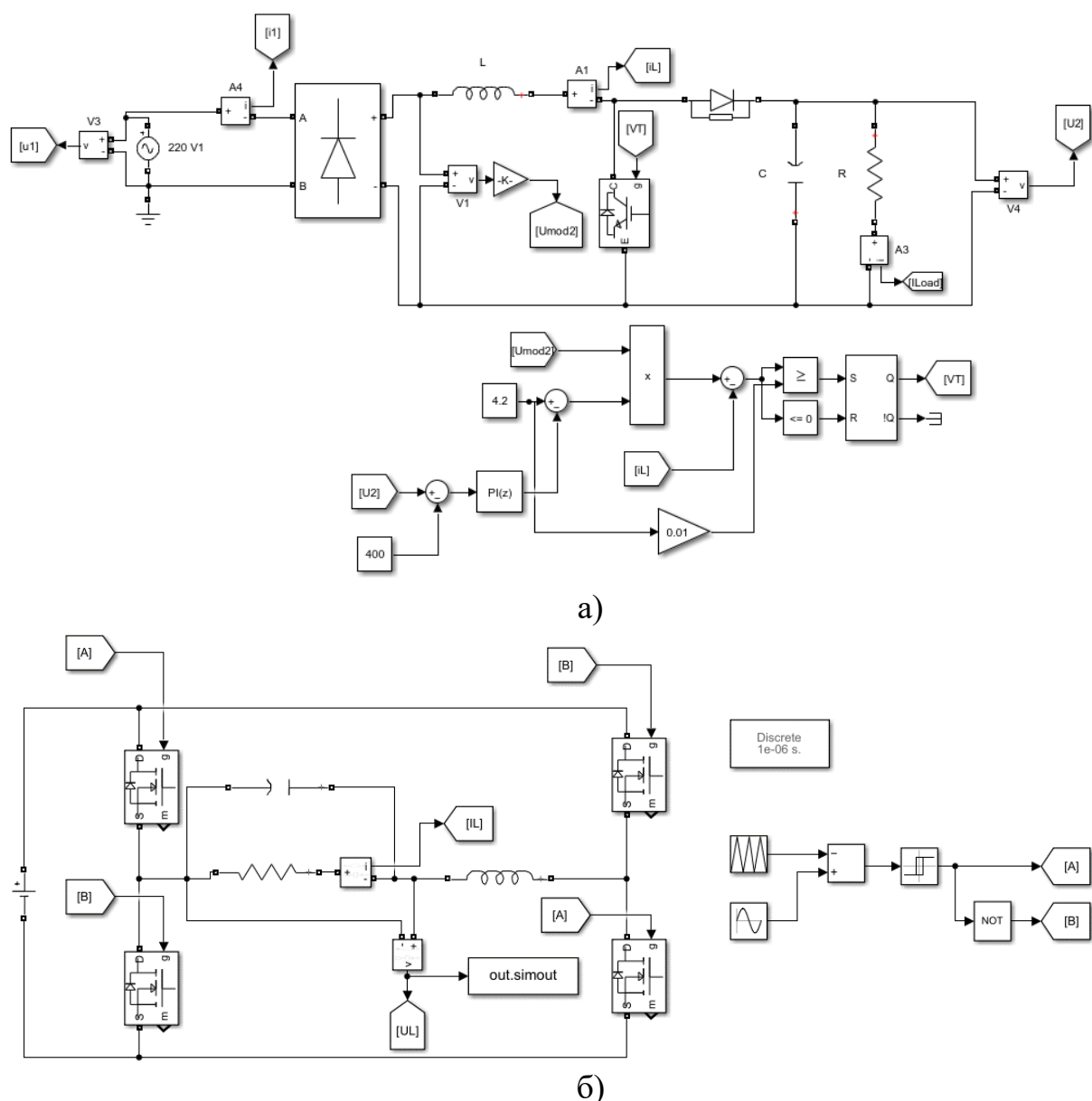
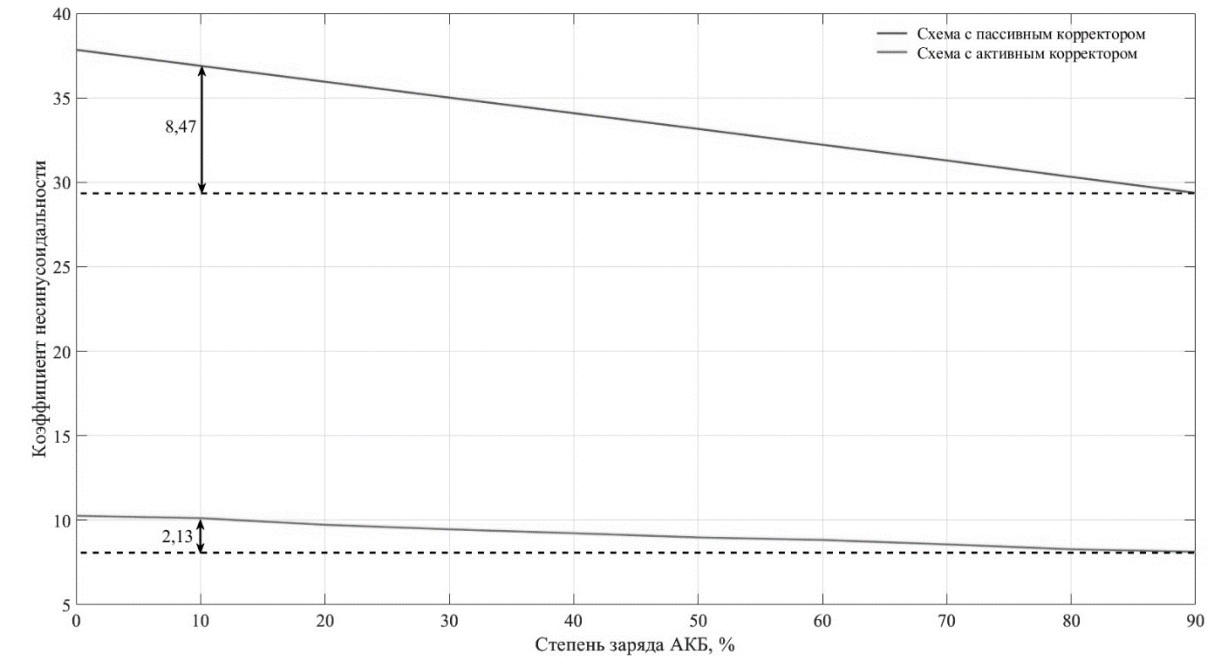


Рис. 4. Имитационная модель для исследования от степени заряда АКБ:

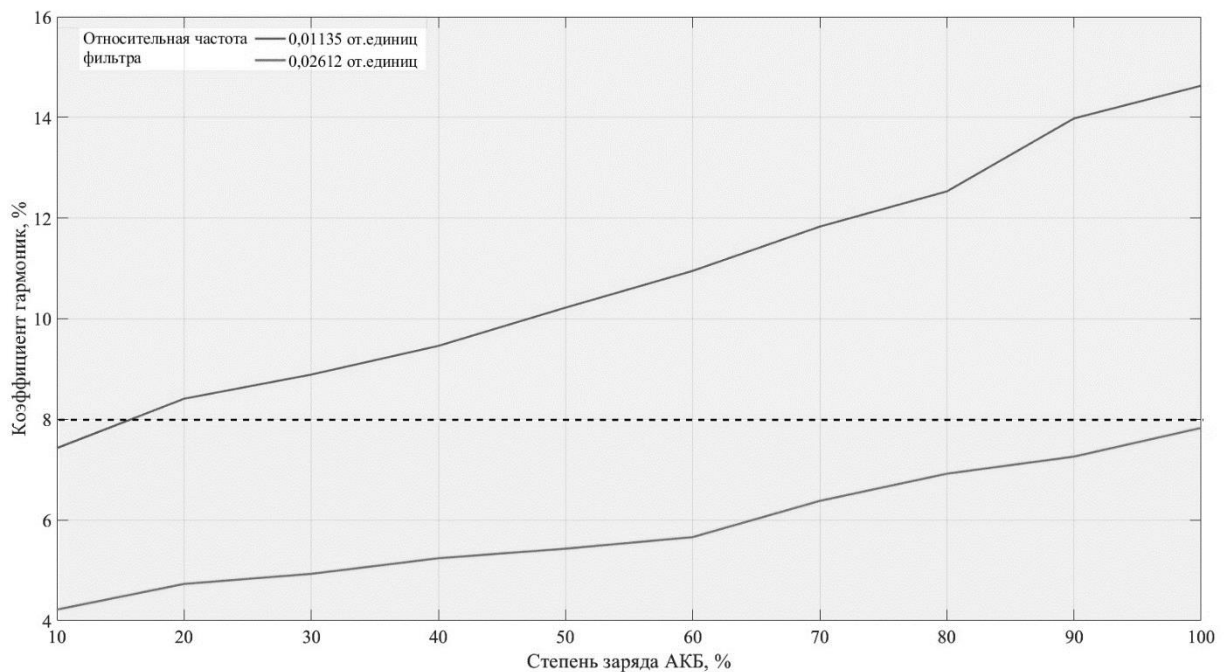
- а) качества потребляемого тока зарядного устройства,
б) несинусоидальности напряжения, формируемого инвертором*

Имитационная модель зарядного устройства представляет собой корректор коэффициента мощности, работающий на нагрузку 1 кВт. Для упрощения

моделирования двухтактный ППН и АКБ заменены активным сопротивлением, значение которого в процессе моделирования изменяется от 316 Ом до 460 Ом. Имитационная модель инвертора напряжения выполняется на нагрузку 1 кВт с изменением напряжения АКБ от 170 В до 270 В; при этом относительная амплитудная величина опорного синусоидального напряжения изменяется от 0,65 до 1. Результаты моделирования показаны на рис. 5.



а)



б)

Рис. 5. Результаты моделирования при изменении степени заряда АКБ:
 а) качества потребляемого тока, б) несинусоидальность напряжения инвертора

При изменении степени заряда АКБ от 0 до 90 % коэффициент несинусоидальности потребляемого тока для схемы с активным ККМ уменьшается с 10,13 до 8 %; в то время как для схемы с пассивным ККМ – с 37,84 до 29,37 %.

При изменении степени заряда АКБ от 10 % до 100 % коэффициент несинусоидальности формируемого напряжения инвертором с фильтром, относительная частота которого 0,01135, изменяется от 7,43 % до 14,63 %; в то время как для фильтра, относительная частота которого 0,02612, коэффициент несинусоидальности изменяется от 4,22 % до 7,83 %.

Таким образом, на всем диапазоне заряда АКБ степень несинусоидальности потребляемого тока активного ККМ не изменяется больше, чем на 2,13 %; в то время как для пассивного ККМ степень несинусоидальности варьируется на 8,47 %. Наилучшее качество формируемого инвертором напряжения наблюдается при минимальной степени заряда АКБ; причем относительная частота выходного фильтра должна быть больше расчетного в 2 раза для сохранения коэффициента несинусоидальности выходного напряжения ниже 8 % на всем диапазоне разряда АКБ.

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок. – Введ. 01.01.2003. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – изд. 7. – 692 с.
2. **Кондратьев, Т.Д.** Современные Модификации литий-ионных аккумуляторов / Т.Д. Кондратьев, Р.В. Каплин // 54-ая научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – 2018. – 54. – С. 160-161.
3. **Вихорев, Н.Н.** Способ динамической балансировки аккумуляторной батареи на основе вычисления эталонной величины напряжения элемента/ Вихорев Н.Н., Куркин А.А., Алешин Д.А., Ульянов Д.А., Константинов М.А., Шалухо А.В. // Energy Science and Engineering. – 2023. – 16. – С. 1-17.
4. **Семенов, Б.Ю.** Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
5. **Ульянов, Д.А., Вихорев, Н.Н.** Анализ коммутационных процессов в гибридном источнике бесперебойного питания / Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2022. – С.50-56.

D.A. Ulyanov, M.A. Konstantinov

**RESEARCH OF THE QUALITY OF THE CONSUMED CURRENT
AND THE GENERATED VOLTAGE IN A DOUBLE ENERGY
CONVERSION CIRCUIT WITH AN INTERMEDIATE BATTERY LINK**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. electrochemical storage batteries are used for backup power supply of responsible consumers due to the best response time and a wide range of operating currents. The dependence of the battery voltage on the degree of charge is nonlinear, which requires both stabilization of the output current of the charger equipped with the function of a power factor corrector (PFC) and stabilization of the output voltage of the inverter. The article describes the proposed algorithm for the operation of the PFC and the algorithm for generating the output voltage of the inverter. The simulation of the device operation at various degrees of battery charge was carried out and the parameters of the quality of the current consumed and the generated voltage for each of them were determined.

Key words: battery, non-sinusoidal coefficient, power factor corrector, voltage inverter, low-frequency filter.

References

- [1] Rules of electrical installations. – Introduction. 01.01.2003. – Moscow: Publishing house of NC ENAS, 2002. – ed.7 – 692 p.
- [2] Kondratiev T.D. Modern Modifications of lithium-ion batteries / T.D. Kondratiev, R.V. Kaplin // 54th Scientific Conference of postgraduates, undergraduates and students of BSUIR. – 2018. – 54. – pp. 160 – 161.
- [3] Vikhorev N.N. Method of dynamic balancing of a battery based on the calculation of the reference value of the cell voltage / Vikhorev N.N., Kurkin A.A., Aleshin D.A., Ulyanov D.A., Konstantinov M.A., Shalukho A.V. // Energy Science and Engineering. - 2023. – 16. – p. 1 – 17.
- [4] Semenov B.Yu. Power electronics: from simple to complex. – M.: SOLON-Press, 2005. – 416 p.
- [5] Ulyanov D.A., Vikhorev N.N. Analysis of switching processes in a hybrid uninterruptible power supply // Actual problem of the electric power industry. – 2022. – с. 50 – 56.

Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.311.1

DOI: 10.46960/apreen_2023_50

Т.Х. Абузьяров

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТОКА ЗАДАНИЯ СДВОЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье предложен алгоритм расчета тока задания, разработанный автором для применения в системе управления сдвоенным инвертором в составе шагового электропривода, и позволяющий достичь заданного значения электромагнитного момента в первой зоне при минимальных потерях в меди (согласно принципу МТРА – максимального момента на ток), а также максимального электромагнитного момента электродвигателя в зоне ослабления поля при заданных параметрах электрической машины, скорости вращения вала и напряжении питания

Ключевые слова: сдвоенный преобразователь, двойная инверторная система, каскадный мостовой инвертор, регулятор ослабления поля, зона ослабления поля, шаговый двигатель, шаговый электропривод

Мостовая схема инвертора напряжения является наиболее распространенным решением силовой части шагового электропривода при организации биполярного управления током фаз электрической машины. Однако на данный момент ряд работ [1-6] указывает на целесообразность применения многоуровневых инверторов в составе преобразовательной техники и электроприводов (в том числе шаговых) малой мощности напряжением до 1 кВ, что обусловлено по большей части текущим состоянием индустрии силовой полупроводниковой техники.

Ранее в работах [3-6] в качестве альтернативы классической мостовой схеме инвертора шагового электропривода предлагалась схема двойной преобразовательной системы. Схема указанного инвертора представлена на рис. 1.

Имитационное моделирование работы данного преобразователя в сравнении с классической мостовой схемой [3] (при заданных в исследовании параметрах серийно выпускаемого шагового электродвигателя и выбранных моделей транзисторов для каждого из преобразователей) указывает на:

- снижение в среднем на 37 % потерь в преобразователе;
- снижение на 33 % величины необходимого напряжения питания, а также размаха пульсаций напряжения фазы электродвигателя;
- увеличение на 20 % диапазона регулирования по скорости в первой зоне;
- увеличение на 18 % максимальной механической мощности на валу шагового двигателя (ШД).

В работе [5] представлен алгоритм работы преобразователя, при котором напряжение конденсаторов звеньев постоянного тока (ЗПТ) дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 (рис. 1) регулируется в пределах от $0,5U_{DC1}$ до U_{DC1} , где U_{DC1} – напряжение питания двойной инверторной системы. Применение указанного алгоритма позволяет дополнительно в два раза снизить размах пульсаций выходного напряжения инвертора в широком диапазоне скоростей вращения вала ШД

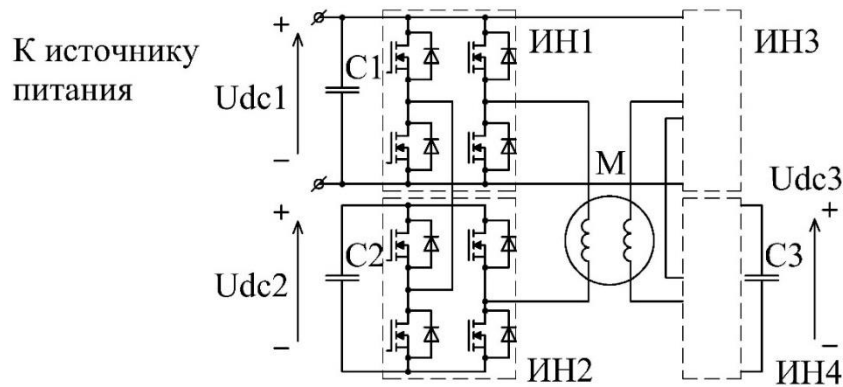


Рис. 1. Двухфазный трехуровневый каскадный инвертор с единственным источником питания

Данная работа является продолжением исследований [3-6] и посвящена разработке алгоритма расчета тока задания в первой и второй зонах регулирования шагового электропривода с учетом особенностей предложенного ранее схемного решения преобразовательной части.

Электромагнитный момент ШД τ_e , Н·м, через переменные в осях dq определяется из выражения:

$$\tau_e = K i_q + p(L_d - L_q) i_d i_q, \tag{1}$$

где p – число пар полюсов ШД (как правило, 50); $K = p\psi_0$ – конструктивный коэффициент электродвигателя, Н·м/А; ψ_0 – вклад постоянных магнитов в потокосцепление фазы А ψ_a , Вб, при угловом положении ротора, равным нулю; i_d – проекция вектора тока статора, А, на ось d вращающейся системы координат dq ; i_q – проекция вектора тока статора, А, на ось q вращающейся системы координат dq ; L_d – индуктивность обмотки статора ШД по продольной оси d , L_q – индуктивность обмотки статора ШД по поперечной оси q .

Гибридный шаговый электродвигатель является явнополюсной электрической машиной ($L_d \neq L_q$).

Как видно из (1), для явнополюсных синхронных двигателей с постоянными магнитами векторное управление, при котором ток i_d поддерживается равным нулю, а ток i_q формируется пропорционально заданию момента, не является оптимальным с точки зрения минимизации потерь в меди. Для управления такими электродвигателями применяют принцип максимального момента на ток (МТРА), при котором выполняется соотношение:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\tau_e/I_a)}{\partial i_d} = 0, \\ \frac{\partial(\tau_e/I_a)}{\partial i_q} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где τ_e – электромагнитный момент, Н·м, генерируемый электродвигателем; I_a – модуль вектора тока статора, определяемый из соотношения:

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \quad (3)$$

Следует отметить, что существует множество методов вычисления необходимых значений i_q и i_d , исходя из представленных соотношений (1-3). В данной работе предлагается способ расчета, основанный на численном нахождении корней полинома четвертого порядка.

Путем подстановки (1) и (3) в (2) можно получить зависимость вида $\tau_e = f(i_q)$:

$$\tau_e = \frac{p i_q}{2} \left(\Psi_0 + \sqrt{\Psi_0^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2} \right). \quad (4)$$

Тогда нахождение значения i_q для создания электромагнитного момента τ_e сводится к нахождению корней полинома четвертого порядка выражения:

$$(L_d - L_q)^2 i_q^4 + \frac{\Psi_0 \tau_e}{p} i_q - \frac{\tau_e^2}{p^2} = 0 \quad (5)$$

при условии, что

$$\Psi_0^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2 \geq 0 \quad (6)$$

После нахождения тока задания i_q значение тока i_d может быть вычислено из выражения (1).

При работе электропривода в зоне ослабления поля необходимо учитывать следующие ограничения:

$$\begin{cases} I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{max} \\ U_a = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{a.max} \end{cases} \quad (7)$$

где I_{max} – максимально допустимое значение тока двигателя (или преобразователя), А; $U_{a.max}$ – максимально возможное выходное напряжение инвертора, В; I_a – амплитуда фазного тока двигателя (или преобразователя), А; U_a – амплитуда синусоидальной составляющей выходного напряжения инвертора, В; u_q и u_d – проекции вектора напряжения статора, В, на оси dq вращающейся системы координат.

Амплитуда выходного напряжения инвертора U_a , В, определяется из выражения:

$$U_a^2 = (p\omega i_q L_q)^2 + [p\omega(i_d L_d + \Psi_0)]^2. \quad (8)$$

Из выражения (8) может быть получено уравнение эллипса в осях i_d , i_q , ограничивающего область работы преобразователя (в контексте способности генерировать фазный ток):

$$\frac{U_{a.max}^2}{(p\omega)^2 (i_q L_q)^2} + (i_d L_d + \Psi_0)^2 = 1. \quad (9)$$

Базовая скорость вращения вала электродвигателя ω_{base} , рад/с, может быть получена как:

$$\omega_{base} = \frac{U_{a.max}}{p\sqrt{(i_q L_q)^2 + (i_d L_d + \Psi_0)^2}} \quad (10)$$

Для расчета выражения (10) применяются значения i_d и i_q , вычисленные с применением принципа МТРА.

С ростом скорости выше базовой преобразователь теряет способность поддерживать ток согласно принципу МТРА, и начинается регулирование в зоне ослабления поля (второй зоне), для которой характерно уменьшение результирующего потока продольной оси электродвигателя. На рис. 2 изображены: график функции $i_{d.MTPA} = f(i_{q.MTPA})$, представляющий собой множество пар значений i_d, i_q , вычисленных согласно принципу МТРА; ограничивающий работу преобразователя эллипс при $\omega_1 = \omega_{base}$ и при $\omega_2 > \omega_1$; график значений i_d, i_q обеспечивающих постоянство момента τ_1 и $\tau_2 < \tau_1$; окружность ограничения модуля тока.

Алгоритм заключается в следующем. Как только скорость вращения вала превышает ω_{base} , происходит определение максимально возможного момента на эллипсе, описываемом уравнением (9). В случае, если момент задания меньше полученного значения, необходимо найти в системе координат $i_d i_q$ пересечение графиков, описываемых уравнениями (1) и (9) (решить систему указанных уравнений). Если решение удовлетворяет условию (7), значит найденный вектор $(i_d \ i_q)^T = (i_{d.fw1} \ i_{q.fw1})^T$ является искомым решением и полученные значения подаются на вход регулятора тока.

Если решение не удовлетворяет условию (7), находится решение $(i_d \ i_q)^T = (i_{d.fw2} \ i_{q.fw2})^T$ системы уравнений (3) и (9) и используется в качестве сигналов задания регулятора тока. При этом момент задания не достигается.

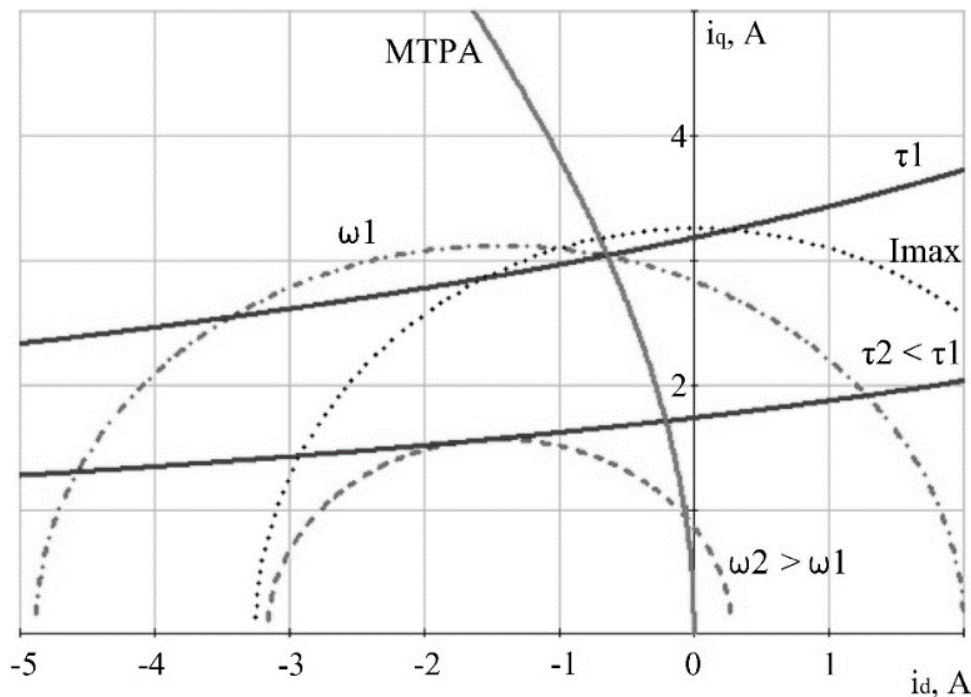


Рис. 2. Регулирование синхронного электропривода в области ослабления поля

С другой стороны, если рассчитанный максимально возможный момент меньше заданного момента, находится решение $(i_d \ i_q)^T = (i_{d,max} \ i_{q,max})^T = (i_{d,fw3} \ i_{q,fw3})^T$, обеспечивающее максимально возможный момент на эллипсе, описываемом уравнением (9). В случае, если решение удовлетворяет условию (7), найденный вектор используется в качестве задания в регуляторе тока. В противном случае, применяется решение $(i_{d,fw2} \ i_{q,fw2})^T$.

Вектор тока статора ШД при разгоне в зоне ослабления поля, следуя указанному алгоритму, описывает годограф, изображенный на рис. 3. Блок-схема указанного алгоритма представлена на рис. 4.

При дальнейшем разгоне электродвигателя применяется решение $(i_{d,fw3} \ i_{q,fw3})^T$, обеспечивающее максимально возможный электромагнитный момент при заданных значениях скорости и максимальной амплитуде выходного напряжения инвертора.

Следует отметить, что значение $U_{a,max}$, из выражения (10) равное напряжению питания для классической мостовой схемы преобразователя ШД, в данном случае зависит также от параметров электродвигателя, скорости вращения вала и напряжения ЗПТ дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 [5]. В связи с этим система управления данным двойным инвертором рассчитывает значение $U_{a,max}$, а также задание напряжения ЗПТ дополнительных инверторов.

На рис. 5 отображены график значений i_d и i_q в зависимости от скорости вращения вала, полученный при имитационном моделировании работы серийной модели ШД при питании от исследуемого двойного инвертора при применении описанного в работе алгоритма. На рис. 6 представлены графики механической характеристики ШД, полученные в ходе имитационного моделирования работы двойной инверторной системы и эквивалентного классического мостового преобразователя.

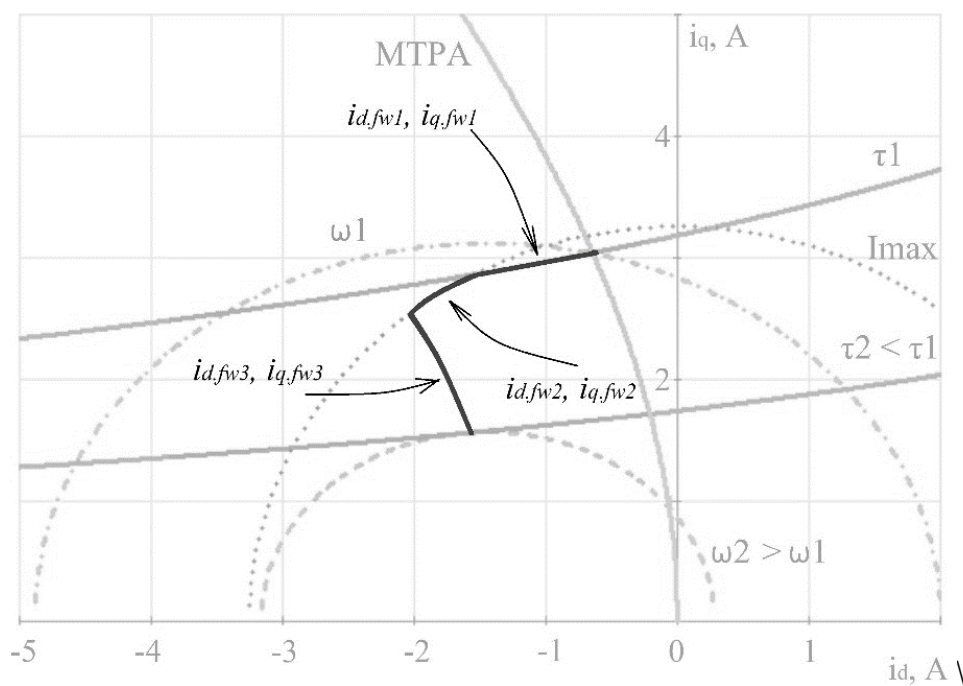


Рис. 3. Годограф вектора тока статора при разгоне ШД в зоне ослабления поля

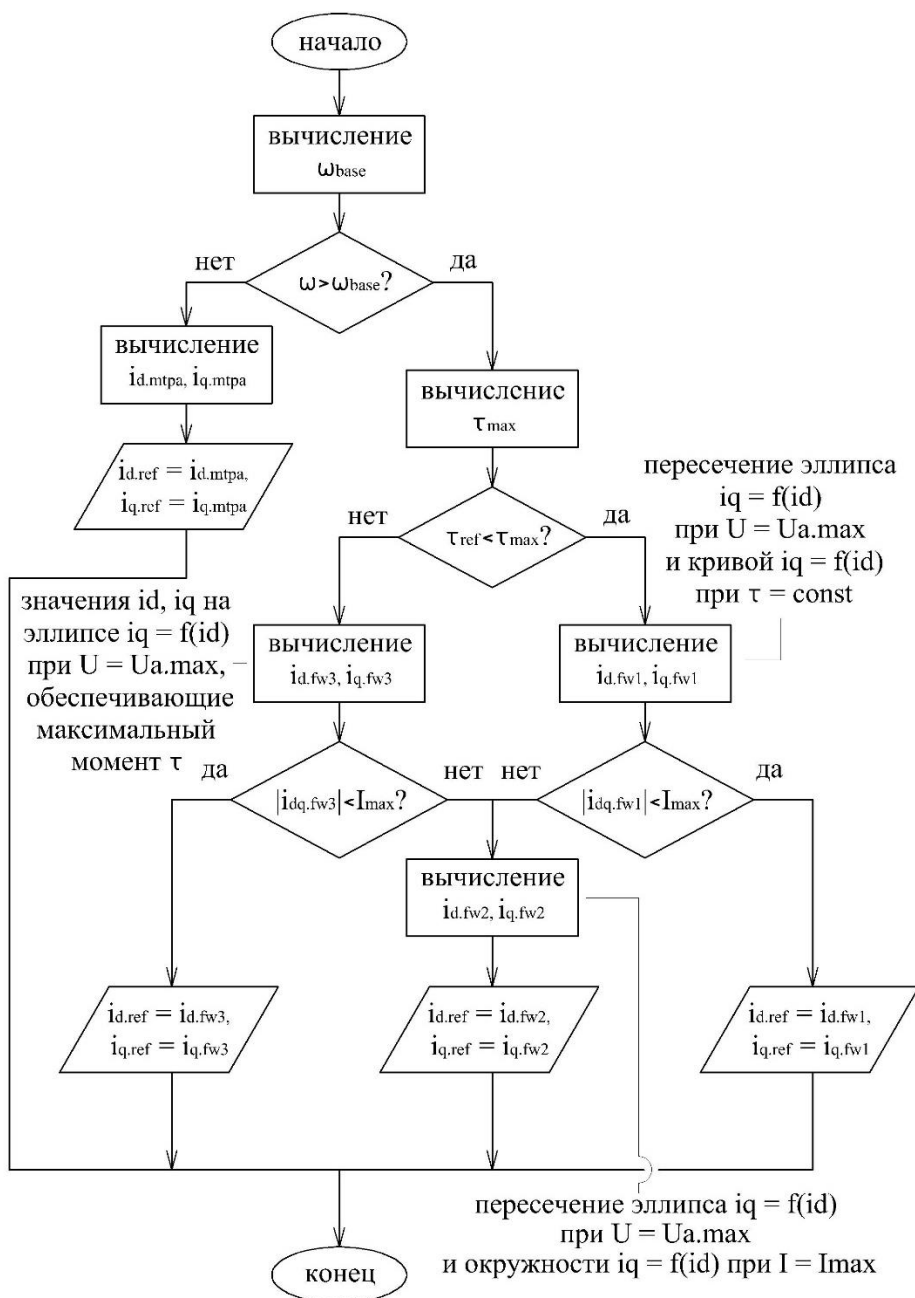


Рис. 4. Блок-схема алгоритма регулятора ослабления поля

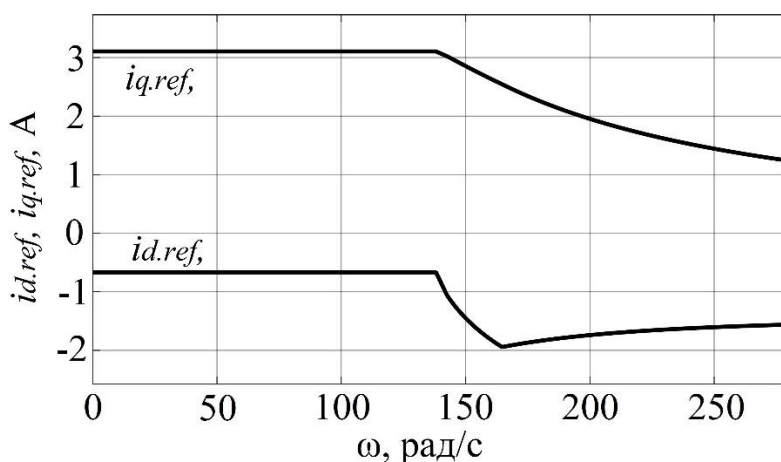


Рис. 5. Зависимость токов задания $i_{d.ref}, i_{q.ref}, A$, от скорости вращения вала ШД

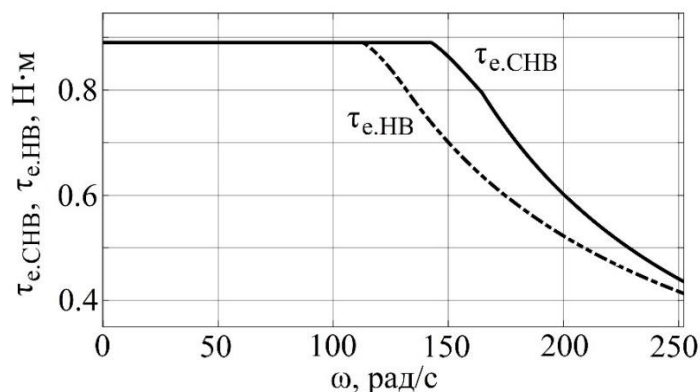


Рис. 6. Механическая характеристика ШД при питании от исследуемого преобразователя ($\tau_{e.СНВ}$) и от эквивалентного классического мостового преобразователя ($\tau_{e.НВ}$)

Из графиков (рис. 5 и 6) видно, что предложенный алгоритм обеспечивает достижение заданного значения электромагнитного момента (или максимально возможного) при отсутствии скачков в расчетных значениях задания вектора тока. Кроме того, в отличие от систем с применением ПИ-регуляторов в данном алгоритме вычисляется точное значение необходимого вектора тока – задержка времени на расчет постоянна и обусловлена исключительно производительностью системы управления.

Библиографический список

1. **Kim, K. A.** Opening the Box: Survey of High Power Density Inverter Techniques From the Little Box Challenge / Katherine A. Kim, Yu-Chen Liu, Ming-Cheng Chen, and Huang-Jen Chiu // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 2, no. 2, June 2017.
2. **Lei, Y.** et al., “A 2-kW single-phase seven-level flying capacitor multilevel inverter with an active energy buffer,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 11, pp. 8570-8581, Nov. 2017
3. **Abuzyarov, T.** Algorithm of Field-Oriented Control of a Dual Inverter-Fed Stepper Drive with Use of the Lookup Table / T. Abuzyarov, A. Plekhov // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021: 3, Lipetsk, 10–12 ноября 2021 года. – Lipetsk, 2021. – P. 1061-1065. – DOI 10.1109/SUMMA53307.2021.9632025. – EDN ULLVFJ.
4. **Абузяров, Т. Х.** Двойная инверторная система для питания шагового электродвигателя с уменьшенным напряжением звена постоянного тока / Т. Х. Абузяров // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 1(50). – С. 27-34. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34. – EDN RZBARG.
5. **Абузяров, Т. Х.** Уменьшение размаха пульсаций выходного напряжения двойной инверторной системы в составе шагового электропривода при низких скоростях вращения вала / Т. Х. Абузяров, А. С. Плехов, В. Г. Титов, И. В. Кольчик // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 1(21). – С. 38-50. – DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_38. – EDN EFBTRA.
6. **Абузяров, Т. Х.** Анализ гармонического состава потребляемого тока двойной инверторной системы в составе шагового электропривода / Т. Х. Абузяров / Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей, Нижний Новгород, 22 декабря 2022 года. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2022. – С. 57-63. – DOI 10.46960/47355565_2022_57. – EDN VTRYXN.

T.Kh. Abuzyarov

REFERENCE CURRENT CALCULATING ALGORITHM FOR A DUAL INVERTER-FED STEPPER DRIVE

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The article proposes an algorithm for calculating the reference current for a dual inverter-fed stepper drive. The algorithm provides reference value of the electromagnetic torque in the constant torque region with minimal copper losses (according to the MTPA principle), as well as the maximum electromagnetic torque of the electric motor in the field weakening region for the given parameters of the electric machine, shaft speed and supply voltage.

Key words: dual inverter, stepper drive, cascaded H-bridge, MTPA, field weakening.

References

- [1] Kim K. A. Opening the Box: Survey of High Power Density Inverter Techniques From the Little Box Challenge / Katherine A. Kim, Yu-Chen Liu, Ming-Cheng Chen, and Huang-Jen Chiu // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 2, no. 2, June 2017.
- [2] Y. Lei et al., "A 2-kW single-phase seven-level flying capacitor multilevel inverter with an active energy buffer," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 11, pp. 8570-8581, Nov. 2017
- [3] Abuzyarov, T. Algorithm of Field-Oriented Control of a Dual Inverter-Fed Stepper Drive with Use of the Lookup Table / T. Abuzyarov, A. Plekhov // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021: 3, Lipetsk, 10–12 ноября 2021 года. – Lipetsk, 2021. – P. 1061-1065. – DOI 10.1109/SUMMA53307.2021.9632025. – EDN ULLVFJ.
- [4] Abuzyarov, T. Doynaya invertornaya Sistema dlya pitaniya shagovogo elektrodvigatelya s umenshennym napryazheniem zvena postoyannogo toka [Dual-inverter fed stepper motor drive with reduced dc link voltage], Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical systems and complexes]. pp. 27-34, DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34. – EDN RZBARG. (in Russian)
- [5] Abuzyarov, T. Umenshenie razmaha pulsatsiy vyhodnogo napryazheniya dvoynoy invertornoy sistemy v sostave shagovogo elektroprivoda pri nizkih skorostyah vrascheniya vala [Reduction of the output voltage ripple of a dual inverter-fed stepper drive at low speed], T. Kh. Abuzyarov, A. S. Plekhov, V. G. Titov, I. V. Kolchik, Intellektualnaya elektrotehnika [Smart electrical engineering], pp. 38-50, DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_38. – EDN EFBTRA. (in Russian)
- [6] Abuzyarov, T. Analiz garmonicheskogo sostava potrebyaemogo toka dvoynoy invertornoy sistemy v sostave shagovogo elektroprivoda [Input current THD analysis of the dual inverter-fed stepper drive], T. Abuzyarov, Aktualnye problemy elektroenergetiki [Actual problems of power industry]. Nizhny Novgorod, pp. 57-63, DOI 10.46960/47355565_2022_57. – EDN VTRYXN.(in Russian)

А.А. Агапов, Ю.М. Крылов, А.М. Литвиненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

Воронежский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассмотрены основные подходы к формированию высокодинамичных следящих электроприводов поворотных-лопастных систем с учетом влияния перепадов температур на выходные характеристики системы. Приведены результаты математического моделирования электропривода, учитывающие изменения параметров исполнительного электродвигателя при перепаде температур в диапазоне от плюс 100 °С до минус 60 °С.

Ключевые слова: математическое моделирование, электродвигатель, динамические характеристики электропривода.

На сегодняшний день поворотные-лопастные системы применяются в самых разнообразных областях народного хозяйства. Наиболее значимыми среди них являются энергетика и авиация. При этом также необходимо отметить, что подобные системы широко используются в насосных и перегоняющих комплексах [1].

Важным фактором является то, что большая часть данных объектов является полностью автономными, а, следовательно, формирование систем обеспечения движения или корректировки положения такого рода объектов требует учета целого ряда факторов. Примером подобного типа объектов является довольно популярное и перспективное направление в разработке беспилотных летательных систем, в частности, высокоатмосферные беспилотные летательные аппараты (БЛА) различного типа, к примеру, высотный БЛА аэростатного типа SkyHOOK представленный на рис. 1.



Рис. 1. Высотный БЛА аэростатного типа SkyHOOK

Данные беспилотные аппараты создаются с различными целями от обеспечения связи и навигации в регионах со сложным типом рельефа до высотной ветроэнергетики. Безусловным является то, что данное направление имеет высокий потенциал к освоению и развитию [2, 3].

Стоит отметить, что основным условием функционирования данных систем является обеспечение работоспособности на высотах 20 – 25 км от поверхности земли, где температура окружающей среды может снижаться до экстремальных отметок. При этом учитывая изменяющийся характер нагрузок на лопасть системы при обеспечении маневрирования на взлете не исключен перегрев исполнительного электродвигателя. В результате в рамках обеспечения безаварийной работы электротехнического комплекса необходимо учитывать возможные особенности функционирования при перепадах температур в широком диапазоне.

В упрощенном представлении функциональная схема быстродействующего следящего цифрового электропривода поворотной-лопастной системы представляет собой ряд изолированных блоков преобразования электрического сигнала на входе системы, связанных между собой, что изображено на рис. 2.

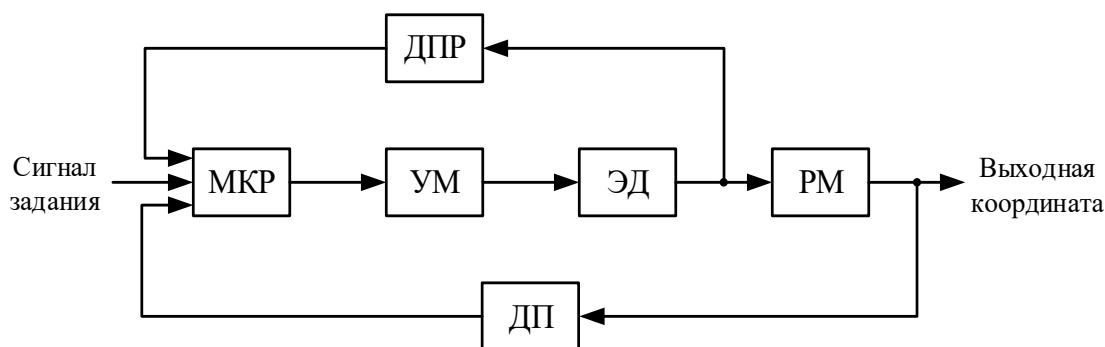


Рис. 2. Функциональная схема быстродействующего следящего цифрового электропривода поворотной-лопастной системы: МКР – микроконтроллер, ДПР – датчики положения ротора электродвигателя, УМ – усилитель мощности, ДП – датчик положения, ЭД – электродвигатель, РМ – редукторный механизм

Аналоговый сигнал задания поступает на вход микроконтроллера, где он оцифровывается и преобразовывается с учетом алгоритмов регулятора в сигнал управления после чего поступает на вход усилителя мощности. Усилитель мощности согласно управляющего сигнала обеспечивает выдачу напряжения питания электродвигателя, который приводит во вращение редукторный механизм, формируя тем самым выходную координату лопасти. Информационные сигналы от датчиков положения ротора электродвигателя и положения выходной оси поступают на вход микроконтроллера, где оцифровываются и участвуют в коррекции управляющего сигнала.

Таким образом структуру функциональной схемы в рамках принятых блоков можно свести к единому преобразователю энергии, описываемому дифференциальным уравнением [4]:

$$T_{\text{фб}} \frac{du_{\text{внфб}}}{dt} + u_{\text{внфб}} = u_{\text{унфб}} \cdot U_{\text{зад}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{фб}}$ – постоянная времени; $u_{\text{внфб}}$ – напряжение на выходе системы; $u_{\text{унфб}}$ – напряжение управления; $U_{\text{зад}}$ – напряжение задания на входе.

Для анализа функциональных характеристик электропривода поворотной системы составлена математическая модель, позволяющая учитывать влияние различных внешних параметрических возмущений, которая представлена на рис. 3 [5].

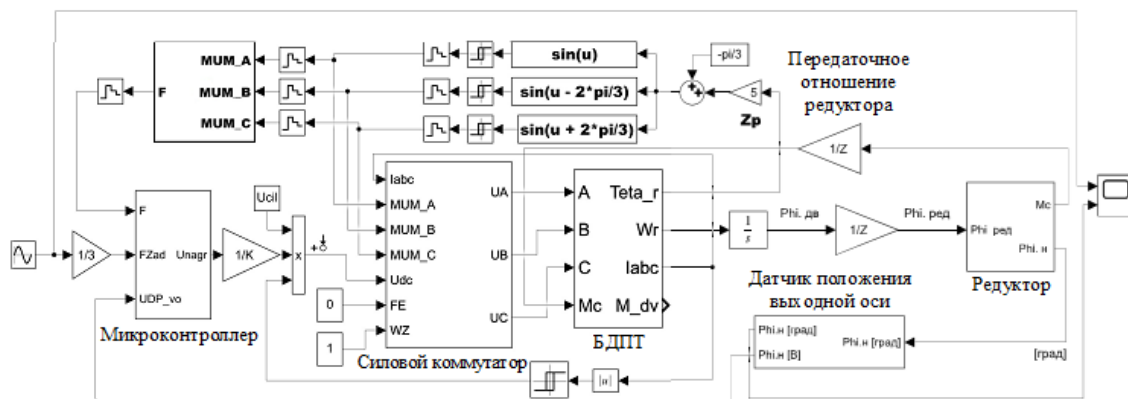


Рис. 3. Математическая модель исполнительных звеньев электропривода

Необходимо понимать, что параметры машины в рамках принятого температурного диапазона могут серьезно изменяться. При этом наибольшее влияние температурные перепады оказывают на обмотку [6, 7].

В рамках экспериментальных исследований для конкретного типа электрической машины при температуре окружающей среды на уровне минус 60 °С сопротивление обмотки уменьшается на 33 % ($0,67 \cdot R$), коэффициенты противо-ЭДС и момента в свою очередь увеличиваются почти на 10 % ($1,1 \cdot C_m$, $1,1 \cdot C_e$), а электромагнитная постоянная времени увеличивается вдвое ($2 \cdot T_j$). Значительные изменения также происходят и при воздействии повышенной температуры среды. К примеру, при воздействии температуры с предельным значением 100 °С параметры машины меняются следующим образом: сопротивление обмотки двигателя увеличивается на 40 % ($1,4 \cdot R$), коэффициенты противо-ЭДС и момента уменьшаются на 12 % ($0,88 \cdot C_m$, $0,88 \cdot C_e$), а электромагнитная постоянная времени также уменьшается вдвое ($0,5 \cdot T_j$).

В рамках исследования влияния температуры окружающей среды было проведено моделирование работы электропривода при отработке синусоидального воздействия амплитудой 3° на частотах 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 Гц. На основе полученных осциллограмм работы привода построены амплитудно-фазовые частотные характеристики, представленные на рис. 4, служащие для определения реакции системы на внешние параметрические возмущения.

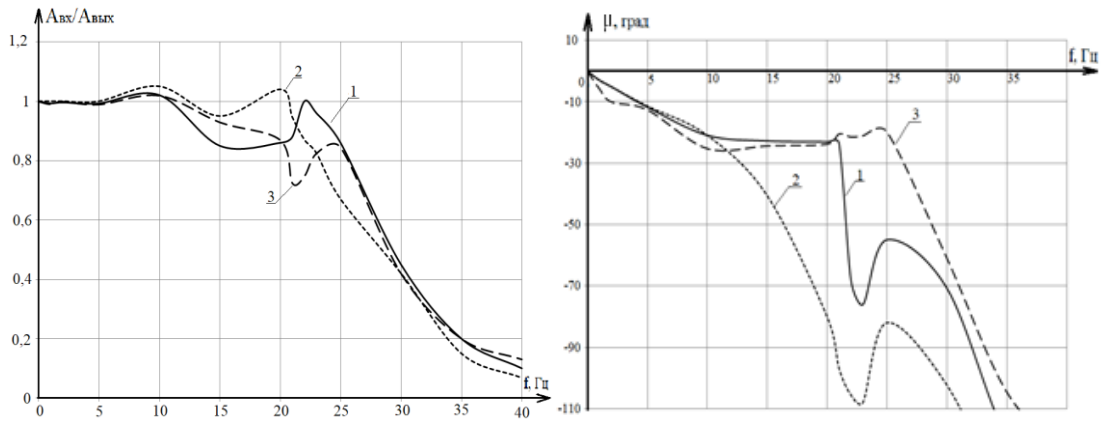


Рис. 4. Амплитудно-фазовые частотные характеристики привода с учетом влияния температуры окружающей среды:
1 – плюс 20 °С, 2 – плюс 100 °С, 3 – минус 60 °С

В рамках проведенного исследования было установлено, что система в диапазоне частот от 10 до 30 Гц имеет незначительное расхождение по АЧХ. Полоса пропускания по уровню 3дБ, являющейся допустимой для исследуемого электропривода, составляет ориентировочно 23 Гц при температурном воздействии плюс 100 °С. При этом как при нормальных климатических условиях (плюс 20 °С), так и при воздействии пониженной температуры окружающей среды (минус 60 °С) полоса пропускания составляет 26 Гц. Однако при анализе ФЧХ были установлены более серьезные расхождения, в частности, фазовое запаздывание на частоте пропускания в нормальных условиях составило 57 °, в свою очередь при повышенной температуре данное значение находится на уровне минус 100 °, а при пониженной температуре – минус 29 °.

Проведенное исследования дает наглядно понять, насколько сильно могут изменяться динамические характеристики электротехнического комплекса при изменении температур в широком диапазоне значений. При этом важно на самых ранних этапах проектирования определить степень влияния тех или иных факторов на работу системы для возможности адекватной коррекции в рамках определения оптимальных алгоритмов функционирования.

Однако необходимо отметить, что произвести учет огромного количества параметров попросту невозможно, в результате чего в рамках формирования системы требуется иметь некий технический запас, позволяющий нивелировать влияние неучтенных эффектов и факторов.

Библиографический список

1. **Агапов, А.А.** Разработка и исследование исполнительного электродвигателя электропривода автономной поворотной-лопастной системы / А.А. Агапов, Ю.М. Крылов // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века. – 2022. – С. 45-47.
2. **d’Oliveira F., Lourenço de Melo F., Devezas T.** High-Altitude Platforms // Present Situation and Technology Trends, 2016. – PP. 249-262.
3. **Ильченко, М.Е., Кравчук, С.А.** Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. – К.: НПП «Наукова думка», 2008. – 580 с.
4. **Моисеев, В.С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования» (Серия «Современная прикладная математика и информатика»), 2013 – 768 с.
5. **Чен, К., Джиблин, П., Ирвинг, А.** MATLAB в математических исследованиях. – М.: Мир, 2001. – 346 с.
6. **Агапов, А.А., Белозоров, С.А.** Исследование температурного состояния бесконтактных микроэлектродвигателей постоянного тока беспазового исполнения // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века, 2018. – С. 43-46.
7. **Агапов А.А.** Особенности применения электродвигателей в критических условиях эксплуатации / Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Сборник научных статей по итогам одиннадцатой международной научной конференции, 2020. – С. 13-14.

A.A. Agapov, Yu.M. Krylov, A.M. Litvinenko

INVESTIGATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE ROTARY-BLADE SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF EXTERNAL ENVIRONMENTAL FACTORS

Voronezh State Technical University

Abstract. The article discusses the main approaches to the formation of highly dynamic tracking electric drives of rotary-blade systems, taking into account the influence of temperature differences on the output characteristics of the system. The results of mathematical modeling of the electric drive are presented, taking into account changes in the parameters of the executive electric motor with a temperature difference in the range from plus 100 ° C to minus 60 ° C.

Key words: mathematical modeling, electric motor, dynamic characteristics of the electric drive.

References

- [1] Agapov A.A., Krylov Yu.M. Development and research of the executive electric motor of the electric drive of an autonomous rotary-blade system // Applied problems of electromechanics, power engineering, electronics. Engineering ideas of the XXI century, 2022. – PP. 45-47.
- [2] d'Oliveira F., Lourenço de Melo F., Devezas T. High-Altitude Platforms // Present Situation and Technology Trends, 2016. – PP. 249-262.
- [3] Ilchenko M.E., Kravchuk S.A. Telecommunication systems based on high-altitude aeroplatforms. – K.: NPP Publishing House "Naukova Dumka", 2008. – 580 p.
- [4] Moiseev V.S. Applied theory of control of unmanned aerial vehicles: monograph. – Kazan: GBU "Republican Center for Monitoring the quality of Education" (Series "Modern applied Mathematics and Computer Science"), 2013 – 768 p.
- [5] Chen K., Gibilin P., Irving A. MATLAB in mathematical research. – Moscow: Mir, 2001. – 346 p.
- [6] Agapov A.A., Belozorov S.A. Investigation of the temperature state of contactless DC microelectromotors of phase-free design // Applied problems of electromechanics, power engineering, electronics. Engineering Ideas of the XXI century, 2018. – PP. 43-46.
- [7] Agapov A.A. Features of the use of electric motors in critical operating conditions // Priority directions of innovation activity in industry. Collection of scientific articles on the results of the eleventh International Scientific Conference, 2020. – PP. 13-14.

К.Р. Валиуллин, С.И. Тушев

СИСТЕМА СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ О ТЕКУЩЕМ СОСТОЯНИИ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Оренбургский государственный университет

Аннотация. В статье представлен прототип программно-аппаратного комплекса для сбора первичной информации о текущем режиме работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Предложенная архитектура комплекса может работать совместно с математическими моделями нагрева асинхронных двигателей на базе эквивалентных тепловых схем.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, ресурс электрооборудования, нагрев электродвигателей

Асинхронные двигатели ввиду простоты конструкции, высокой надежности и небольшой стоимости широко применяются на промышленных предприятиях, в строительстве [1]. Развитие силовой электроники позволило расширить область применения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, в частности, такие двигатели стали устанавливать в качестве тяговых на железнодорожном электротранспорте [2]. Тем не менее, высокая надежность асинхронных двигателей, обусловленная простой конструкцией, может значительно снизиться из-за чрезмерной токовой нагрузкой статора, вызванной перегрузкой со стороны приводного механизма. Так как мощность, передаваемая ротору через воздушный зазор, определяется по выражению [3]:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (1)$$

где U_1 – напряжение, приложенное к статорной обмотке, В; R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; $\frac{R_2'}{s}$ – приведенное сопротивление, зависящее от скольжения, Ом; x_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом; x_2' – приведенное индуктивное сопротивление ротора, Ом.

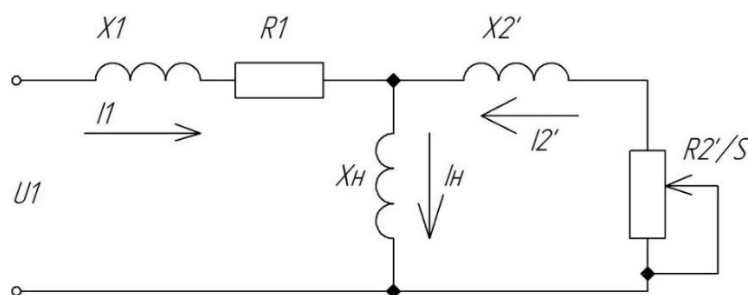


Рис. 1. Схема замещения асинхронного двигателя

Формула (1) получена из схемы замещения, представленной на (рис. 1).

Исходя из схемы замещения, ток, протекающий по обмотке статора, определяется:

$$I_1 = I_\mu + I'_2, \quad (2)$$

здесь I_μ – ток холостого хода, А.

Из выражения (2) можно сделать вывод о том, что ток нагрузки протекает по статорной обмотке и при механической перегрузке или неверно выбранном двигателе обмотка подвергается большим тепловым нагрузкам, что может привести к ее преждевременному выходу в результате деградации физических свойств изоляции или межвитковому замыканию с последующим развитием в междуфазное [4].

Исходя из этого необходимо контролировать текущую температуру обмоток для предотвращения аварийных ситуаций и снижения перерасхода электрической энергии.

Наиболее перспективным направлением в диагностике электрооборудования является система контроля параметров работы в режиме реального времени. Такая система является достаточно сложной и многоуровневой. Это связано с техническим ограничением контроллеров и большим количеством оборудования, подлежащего контролю. С другой стороны, такая система позволяет разделить аппаратную и программную части на две отдельные составляющие, которые могут настраиваться и модернизироваться под конкретное предприятие отдельно в зависимости от условий эксплуатации. Также подобная система позволяет отслеживать состояние оборудования с отдельного пульта оператора или же она может быть интегрирована в общую автоматизированную сеть предприятия.

На рис. 2 представлена многоуровневая архитектура программно-аппаратной части комплекса, состоящей из:

1. Первичных преобразователей (I): термопар, устанавливаемых на корпусе двигателя или подключенных к обмоткам статора (при наличии таких в модификации электродвигателя). И датчиков тока, устанавливаемых в щите для контроля, потребляемого двигателем тока.

2. Блока сбора информации (II) состоящий из: системы сбора и передачи данных, в основе которой находится контроллер с Wi-Fi модулем и подключенными датчиками; блока питания контроллера.

3. Центральный сервер или пульт оператора (локальный). Данный уровень включает в себя сервер, на который находится база данных, программа для обработки данных, а также вспомогательные подсистемы. Сервер системы может быть, как удаленный, так и локальный.

В качестве основного контроллера для прототипа выбран модуль ESP8266, который поддерживает Wi-Fi, а также с ним совместимы все датчики, которые поддерживает Arduino.

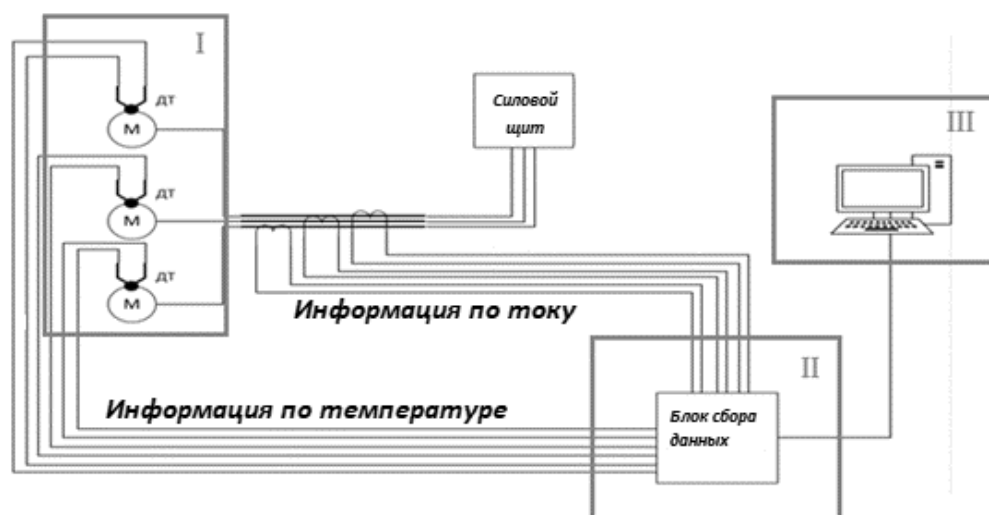


Рис. 2. Структурная схема прототипа программно-аппаратного комплекса

В качестве датчиков температуры применяются термопары тип К. Данный тип датчиков обеспечивает точность показаний в пределах $\pm(0,25-0,5)$ градусов, что является допустимым для данного комплекса. Датчики температуры служат для сбора данных и резервирования датчика тока. На (рис. 3) показано расположение датчиков двигателя на асинхронном двигателе.

Такое расположение датчиков необходимо для контроля температуры наиболее нагретого участка электрической машины – корпуса машины, который имеет непосредственный контакт через неравномерный воздушный зазор с статором и лобовой частью обмотки.

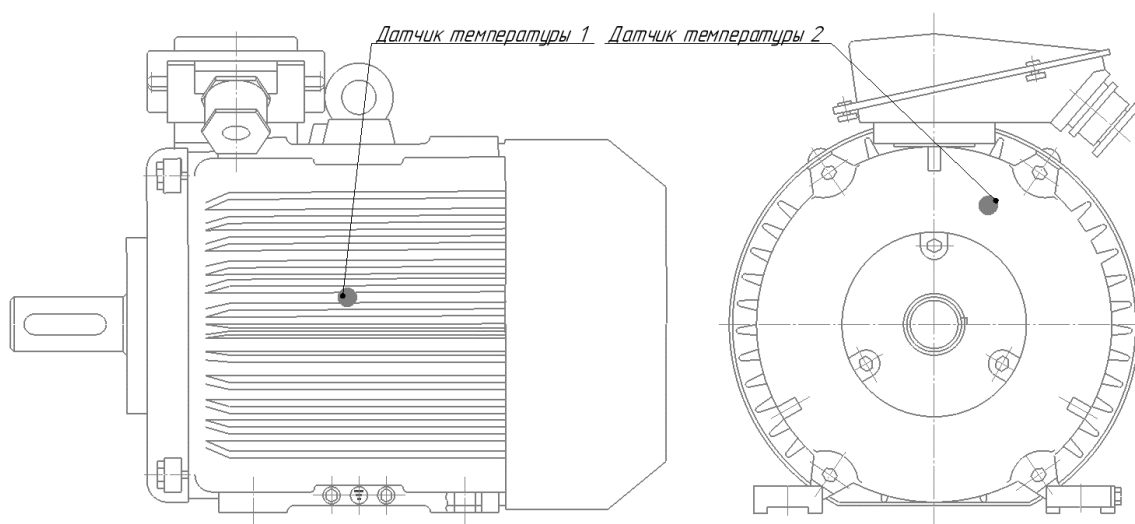


Рис. 3. Расположение датчиков для контроля температуры двигателя

На рис. 4 показана термограмма распределения температур в местах предполагаемого расположения датчиков.

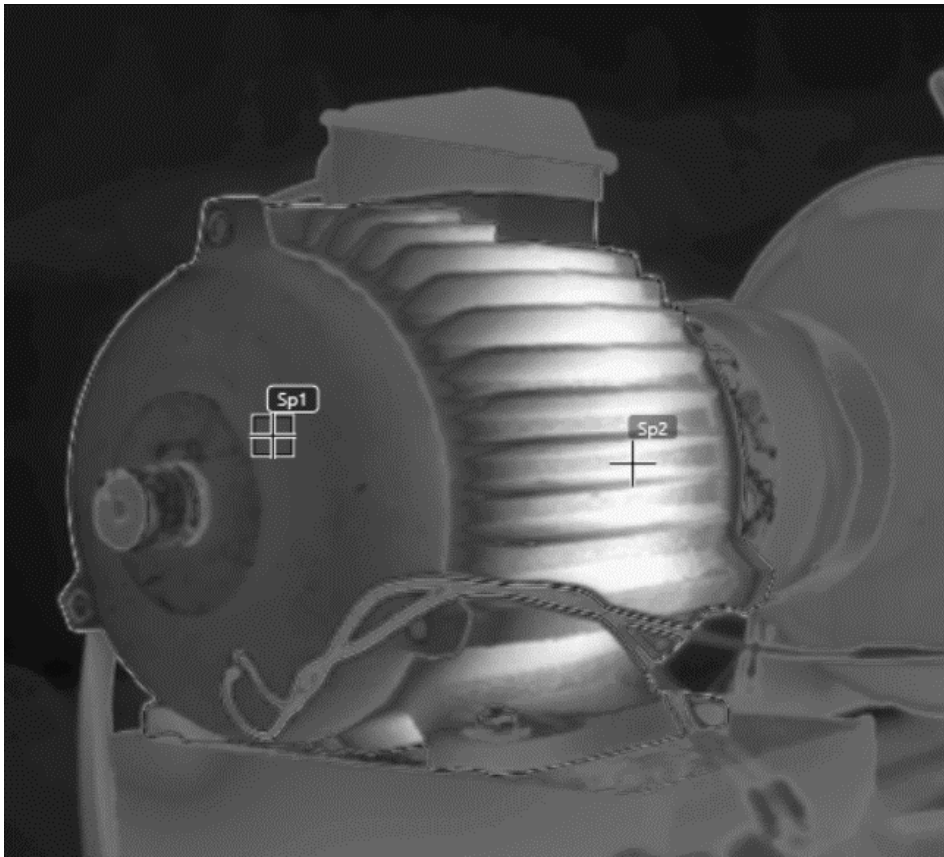


Рис. 4. Термограмма асинхронного двигателя

Таблица 1

Температура точек асинхронного двигателя

| Точка контроля | Температура, °С |
|------------------------|-----------------|
| Sp1 – боковая крышка | 54,9 |
| Sp2 – ребра охлаждения | 81,9 |

На рис. 5 представлено расположение трансформатора тока для снятия потребляемого тока двигателя. Трансформатор тока ставится непосредственно на фазу двигателя, отходящую от контактора. Такое расположение позволяет оценивать ток каждого отдельного двигателя. Датчик температуры, установленный на кабеле, позволяет отслеживать текущую температуру кабеля и оценивать его допустимую токовую нагрузку.

В качестве основного контроллера для прототипа выбран модуль ESP8266, который поддерживает Wi-Fi, также с ним совместимы все датчики, которые поддерживает Arduino. Электрическая схема соединения датчиков и контроллера представлена на рис. 6.

Обработка поступающих с первого и второго уровней осуществляется на сервере (3 уровне), на котором находится база данных, программное средство для обработки данных, а также вспомогательные подсистемы, необходимые для взаимодействия различных уровней комплекса.

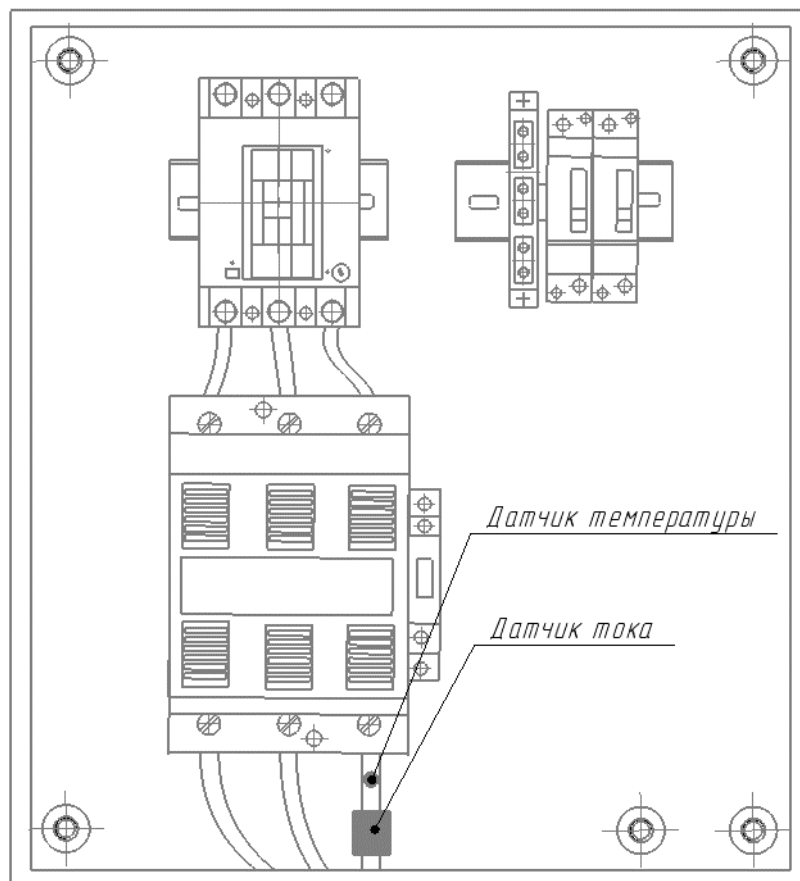


Рис. 5. Расположение датчиков для контроля температуры кабеля и тока двигателя

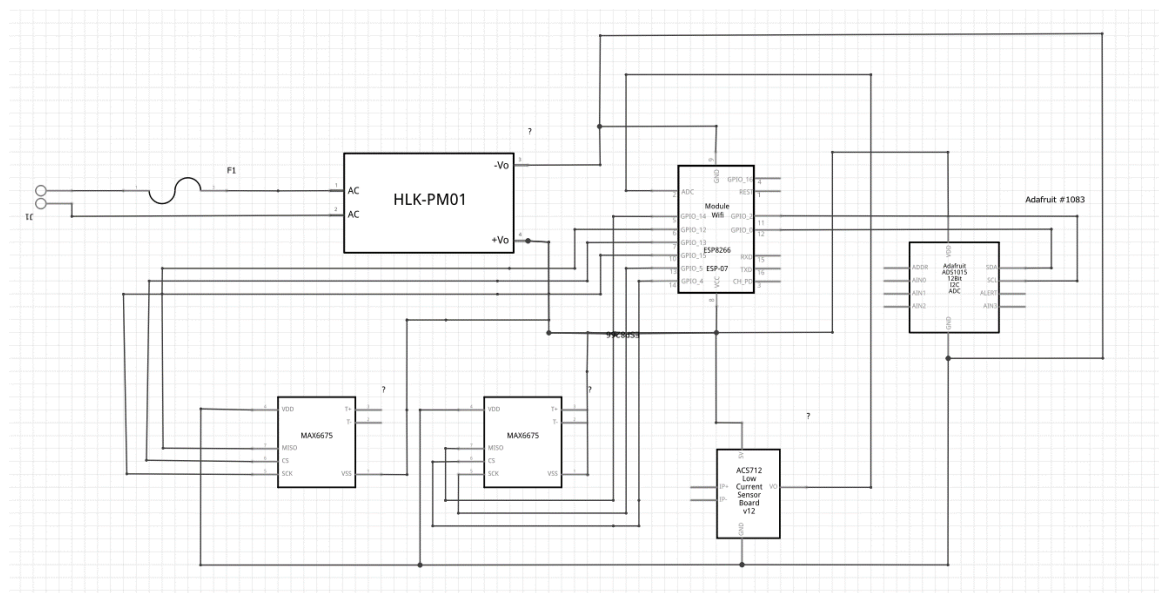


Рис. 6. Схема соединений датчиков и контроллера

На рис. 7 показана главная страница сервера, на которой отображаются текущие параметры температуры и тока.



Рис. 7. Отображение температуры двигателя на сервере



Рис. 8. Отображение тока двигателя на сервере

Программное обеспечение, необходимое для моделирования процессов, включает в себя математическую модель нагрева асинхронного двигателя на основе эквивалентной тепловой схемы [5], входными данными которой являются показания с датчика тока. Помимо этого, программная часть комплекса включает в себя:

1. программу контроллера для сбора и передачи данных;
2. скрипт обработки данных на сервере, состоящий из следующих элементов:
 - а) скрипт записи данных в базу данных;
 - б) скрипт визуализации данных.

Выводы

1. Предложенная архитектура прототипа программно-аппаратного комплекса является многоуровневой и может подстраиваться под различное технологическое оборудование и различные режимы его работы.
2. Аппаратная часть прототипа может работать совместно с математической моделью нагрева асинхронного двигателя, что делает комплекс более универсальным и менее затратным.

Библиографический список

1. **Жежеленко, И.В.** Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя / И.В. Жежеленко, В.Е. Кривоносов, С.В. Василенко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 202–218
2. **Курбасов, А.С.** Асинхронный привод электровозов: эффективность перевозок, технологичность производства // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2008. – № 6 (19). – С. 51- 53.
3. **Ключев, В. И.** Теория электропривода: учеб. для вузов / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
4. **Зюзов, А.М.** Учет колебаний температуры обмотки статора асинхронного двигателя при проверке по нагреванию в повторно-кратковременном режиме/ А.М. Зюзов, В.П. Метельков // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – № 4. – С. 146–153.
5. **Валиуллин, К.Р.** Математическая модель нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы / К.Р. Валиуллин, С.И. Тушев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2022. – № 4.

K.R. Valiullin, S.I. Tushev

**SYSTEM FOR COLLECTING AND TRANSMITTING DATA
ON THE EXPECTED STATE OF OPERATION OF ASYNCHRONOUS
MOTORS WITH A SQUIRREL-CAGE ROTOR**

Orenburg State University, Orenburg, Russia

Abstract. The article presents a prototype of a hardware-software complex for collecting primary information about the current mode of operation of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. The proposed architecture of the complex can work in conjunction with mathematical models of heating asynchronous motors based on equivalent thermal circuits.

Key words: software and hardware complex, electrical equipment life, heating of electric motors

References

- [1] ZHezhelenko I.V. “Kriterii vyyavleniya mezhvitkovykh zamykanij v statornykh obmotkah s ispol'zovaniem vektornogo analiza faznykh tokov elektrodvigatelya [*Criteria for detecting interturn faults in stator windings using vector analysis of motor phase currents*]” “Energetika. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG [*Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*]”. pp. 202–218, 2021 (in Russian)
- [2] Kurbasov A.S. “Asinhronnyj privod elektrovozov: effektivnost' perevozok, tekhnologichnost' proizvodstva [*Asynchronous drive of electric locomotives: efficiency of transportation, manufacturability of production*]”. “Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. [*Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics*]”. pp. – 51–53, 2008 (in Russian)
- [3] Klyuchev, V. I. “Teoriya elektroprivoda [*Electric drive theory*]”. p. 704, 1998 (in Russian)
- [4] Zyuzev A.M. “Uchet kolebanij temperatury obmotki statora asinhronnogo dvigatelya pri proverke po nagrevaniyu v povtorno-kratkovremennom rezhime [*Accounting for temperature fluctuations in the stator winding of an asynchronous motor when checking for heating in intermittent mode*]”. “Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [*Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*]”. pp. 146–153, 2015 (in Russian)
- [5] Valiullin K. R., Tushev S. I. “Matematicheskaya model' nagreva asinhronnogo dvigatelya s korot-kozamknutym rotorom na osnove ekvivalentnoj teplovoj skhemy [*Mathematical model of heating an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor based on an equivalent thermal circuit*]” Vestnik YUUrGU [*Bulletin of SUSU*]. Seriya: Energetika, 2022, issue 4.

А.Б. Дарьенков, И.Е. Бердников, А.Е. Храмов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДИЗЕЛЬ – ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Выполнено исследование и разработка экспериментального стенда дизельной генераторной установки переменной частоты вращения. В системе управления последней применен алгоритм, который по данным потребляемой мощности нагрузки изменяет частоту вращения двигателя для обеспечения топливной экономичности. Экспериментальная установка позволяет вносить изменения в структуру ее элементов. Это позволяет организовывать и анализировать различные методы управления дизельной электростанции, что является актуальным в условиях настоящего научно-исследовательского интереса к системам с переменной частотой вращения.

Ключевые слова: дизель-генератор, переменная частота вращения, полупроводниковые преобразователи, автономная система, потребление энергии.

Основная часть населения Российской Федерации подключена к централизованной системе электроснабжения. Обширная территория страны характеризуется различными природно-климатическими условиями, которые от юга к северу постепенно меняются с зоны комфортных субтропиков до арктических пустынь с экстремально низкими температурами. Ввиду высоких и нерентабельных затрат, сложного рельефа, сурового климата строительство новых централизованных сетей электроснабжения для отдельных районов Дальнего Востока, Крайнего Севера выполнить не удалось, даже в период реализации Плана ГОЭЛРО [1]. Поэтому в данных регионах одним из основных источников электрической энергии является дизельная генераторная установка (ДГУ). Подавляющее большинство ДГУ, которые эксплуатируются в настоящее время, работают с фиксированной частотой вращения вала. Поэтому при изменении потребляемой со стороны нагрузки мощности расход топлива остается неизменным. Как правило, дизельная установка работает при полной нагрузке лишь в относительно небольшом периоде графика суточного потребления электроэнергии [2]. Длительная эксплуатация ДГУ при неполной загрузке по мощности вызывает конденсацию остатков топлива на стенках цилиндров двигателя внутреннего сгорания и в дальнейшем может привести к «остеклению» блока цилиндров [3]. Из-за этого усиливается трение поршня, которое вызывает преждевременный износ дизельного двигателя.

Для повышения топливной экономичности ДГУ при нагрузках ниже номинального уровня, была предложена дизельная установка переменной частоты вращения. Исследования в этой области начались в 1970-х годах при распространении альтернативных источников электроэнергии, а в частности – ветряных

электростанций [4]. Системы ДГУ переменной частоты вращения позволяют сократить потребление дизельного топлива, увеличить срок службы двигателя. Как следствие, выброс отработавших газов, таких как оксид углерода IV (CO_2), оксид азота (NO) снижаются [5], [6]. Этот положительный экологический эффект как раз согласуется с одной из главных целей государственной программы России «Охрана окружающей среды» со сроком реализации 2012-2030 гг.: «Снизить выбросы опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, в два раза по отношению к уровню 2017 года» [7].

Для поддержания выходного напряжения в соответствии с действующими стандартами [8], [9], которые регламентируют качество электроснабжения, установке требуется дополнительное электрооборудование. Последнее, однако, сказывается на увеличении массогабаритных показателей ДГУ и стоимости [10]. Стабильность параметров электроэнергии на выходе дизельной установки позволяет снабжать таких потребителей, в составе которых установлены полупроводниковые приборы (компьютеры, телевизоры и пр.).

В России отсутствует серийное производство ДГУ переменной частоты вращения вала. Недостаточно изучены и исследованы динамические режимы работы дизельной установки на базе различных силовых структур. Ввиду этого сотрудниками института электроэнергетики НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработан стенд, который имитирует ДГУ переменной частоты вращения. Функциональная схема последней показана на рис. 1 [11], [12].

Данный стенд по рис. 1 включает в себя асинхронный двигатель (АД) М, управление которым реализовано по аналогии с реальным двигателем внутреннего сгорания (ДВС): возможна регулировка оборотов вала посредством преобразователя ПЧ. АД сцеплен с синхронным генератором СГ. Последний использовался на реальной бензиновой трехфазной электрогенераторной установке. Для применения в имитаторе СГ доработан путем вывода каждой обмотки, которые в коммутаторе К могут переключаться в треугольник или звезду.

Обмотка возбуждения СГ питается от преобразователя П, который по сигналам с системы управления СУ изменяет напряжение возбуждения. Выходное напряжение СГ поступает на выпрямитель В и инвертор И. Блок датчиков Д измеряет текущие показания выходного напряжения и тока и передает информацию системе управления, которая по алгоритму [13] изменяет частоту вращения вала АД.

В экспериментальном стенде для управления имитатором ДГУ применен алгоритм управления [13], который позволяет определить оптимальную с точки зрения потребления топлива частоту вращения вала двигателя. Для реализации данного способа регулирования используется блок задания экономичной частоты вращения вала ДВС, который состоит из контроллера управления (КУ), контроллера обучения (КО) и блока ассоциативной памяти (АП).

Блок АП представляет собой многослойную нейронную сеть, которая позволяет накапливать дискретные значения оптимальной с точки зрения потребле-

ния топлива частоты вращения вала ДВС для соответствующих дискретных значений мощности P_n , Вт, нагрузки ДГУ. Параметр P_n , Вт, вычисляется по информации с узла датчиков (рис. 1).

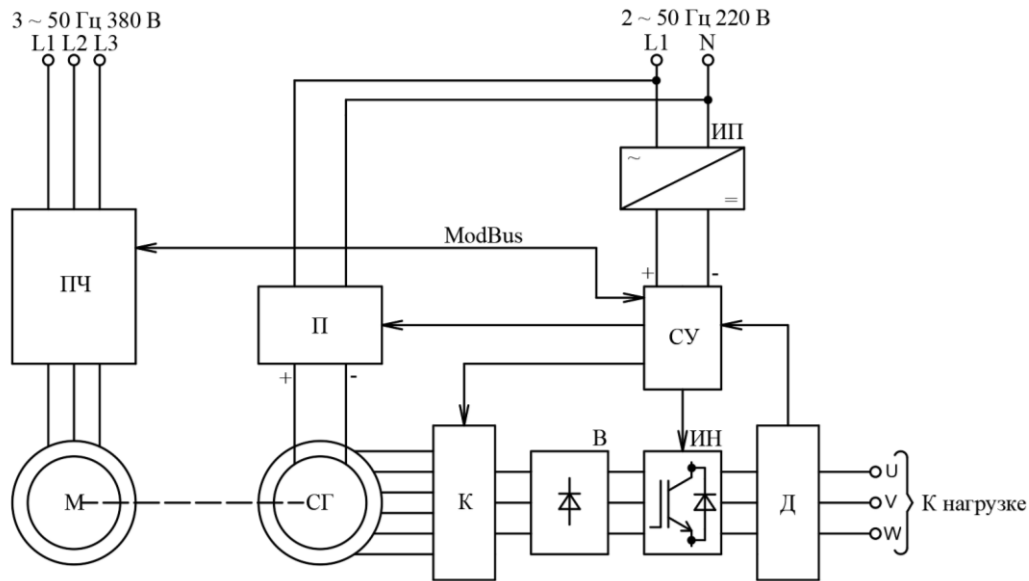


Рис. 1. Функциональная схема экспериментального стенда дизельной установки:
 ПЧ – преобразователь частоты; М – асинхронный двигатель; ИП – источник питания;
 П – преобразователь; СГ – синхронный генератор; К – коммутатор; В – выпрямитель;
 СУ – система управления; ИН – инвертор напряжения; Д – узел датчиков

Кроме того, рассматриваемый блок на основе методов ассоциации и интерполяции в пределах диапазона «обучения» может генерировать значения для отсутствующих в памяти частот вращения вала ДВС. Под диапазоном «обучения» будем понимать множество дискретных значений мощности нагрузки, для которых в памяти хранятся соответствующие величины оптимальной с точки зрения потребления топлива частоты вращения вала ДВС. Другими словами – это логические пары «мощность нагрузки – оптимальное значение частоты вращения вала ДВС».

Рассмотрим первый вариант, когда текущее вычисленное значение P_n , Вт, принадлежит диапазону, в котором производилось «обучение» блока ассоциативной памяти. При этом условии контроллер управления передает значение мощности нагрузки в блок АП, а затем получает в ответ оптимальное с точки зрения потребления топлива значение частоты вращения вала ДВС для данного значения мощности нагрузки. Полученное от блока ассоциативной памяти значение оптимальной частоты вращения вала ДВС контроллер управления передает в систему регулирования частоты вращения.

Рассмотрим второй вариант, когда текущее значение мощности нагрузки не принадлежит диапазону, в котором производилось «обучение». Тогда контроллер управления передает значения мощности КО. Последний, в свою очередь, определяет новую логическую пару «мощность нагрузки – оптимальное значение частоты вращения вала ДВС» по методу сопряженных градиентов.

Суть указанного метода состоит в следующем. В начале поиска оптимальной частоты вращения вала ДВС, контроллер обучения задает такие параметры, как:

- желаемая точность поиска ε ;
- минимальное приращение частоты вращения вала ДВС $\Delta\omega$, рад/с;
- начальное значение направления поиска $p_0 = 0$;
- первая производная зависимости расхода топлива от частоты вращения вала ДВС $g'_0(\omega_0) = 1$;
- итерационная переменная $i = 1, 2, 3 \dots n$.

Затем, с помощью датчика потребляемого топлива КО измеряет расход топлива $g_i(\omega_i + \Delta\omega)$ при увеличении частоты вращения вала ДВС ($\omega_i + \Delta\omega$). После контроллер обучения, воздействуя на контроллер управления, уменьшает текущее значение заданной частоты вращения вала ДВС на величину $\Delta\omega$, рад/с, и измеряет другой расход топлива $g_i(\omega_i)$ при частоте вращения вала ДВС ω_i , рад/с, что показывает рис. 2.

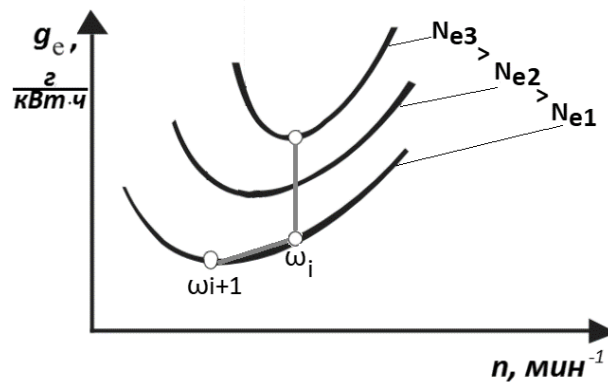


Рис. 2. Кривые удельного эффективного расхода топлива ДВС:
 Ne_1, Ne_2, Ne_3 – эффективная мощность дизеля; g_e – удельный расход топлива;
 n – обороты ДВС

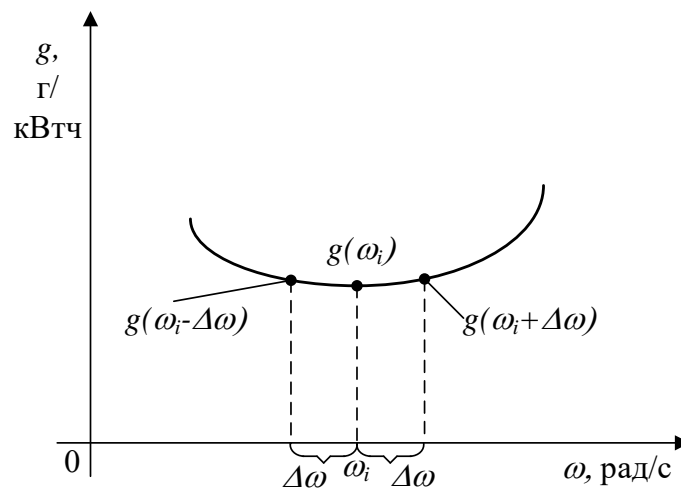


Рис. 3. Кривая изменения удельного эффективного расхода топлива ДВС

Далее КО воздействует на контроллер управления и уменьшает текущее значение заданной частоты вращения вала ДВС еще на величину $\Delta\omega$, рад/с, и производит измерение расхода $g_i(\omega_i - \Delta\omega)$ уже при другой частоте вращения вала ДВС ($\omega_i - \Delta\omega$), как изображено на рис. 3.

На следующем шаге КО вычисляет первую и вторую производные зависимости расхода топлива ДВС от частоты вращения его вала в точке ω_i , рад/с, (соответственно $g'_i(\omega_i)$ и $g''_i(\omega_i)$) по формулам (1) – (2)

$$g'_i(\omega_i) = \frac{g_i(\omega_i + \Delta\omega) - g_i(\omega_i - \Delta\omega)}{2 \cdot \Delta\omega} \quad (1)$$

$$g''_i(\omega_i) = \frac{g_i(\omega_i + \Delta\omega) - 2 \cdot g_i(\omega_i) + g_i(\omega_i - \Delta\omega)}{\Delta\omega^2} \quad (2)$$

Затем контроллер обучения определяет направление поиска, вычисляя градиент расхода топлива p_i в точке ω_i , рад/с, по соотношению (3)

$$p_i = g'_i(\omega_i) + p_{i-1} \frac{(g'_i(\omega_i))^2}{(g'_{i-1}(\omega_{i-1}))^2} \quad (3)$$

Кроме того, КО вычисляет длину шага λ_i , рад/с, между текущей частотой вращения вала ДВС ω_i , рад/с, и новой ω_{i+1} , рад/с, с помощью метода квадратичной интерполяции [14] согласно равенству (4)

$$\lambda_i = \frac{g'_i(\omega_i)}{p_i \cdot (g''_i(\omega_i))^2} \quad (4)$$

Наглядное графическое представление вышеизложенных операций показано на рис. 4.

Далее контроллер обучения определяет значение новой частоты вращения вала ДВС ω_{i+1} , рад/с, в направлении антиградиента функции расхода топлива по (5)

$$\omega_{i+1} = \omega_i - \lambda_i \cdot p_i \quad (5)$$

Наконец, КО определяет, достигается ли в точке ω_i наименьший расход топлива. Для этого модуль градиента функции расхода топлива p_i при частоте вращения вала ДВС ω_i , рад/с, должен быть меньше заданной точности ε .

Если требуемая точность поиска не достигнута, то контроллер обучения воздействует на контроллер управления и задает значение частоты вращения вала ДВС, равное $(\omega_{i+1} + \Delta\omega)$, выполняя новую итерацию поиска. В случае, когда требуемая точность поиска достигнута, КО воздействует на КУ и задает значение частоты вращения вала ДВС равное ω_i , рад/с, и поиск считается завершённым.

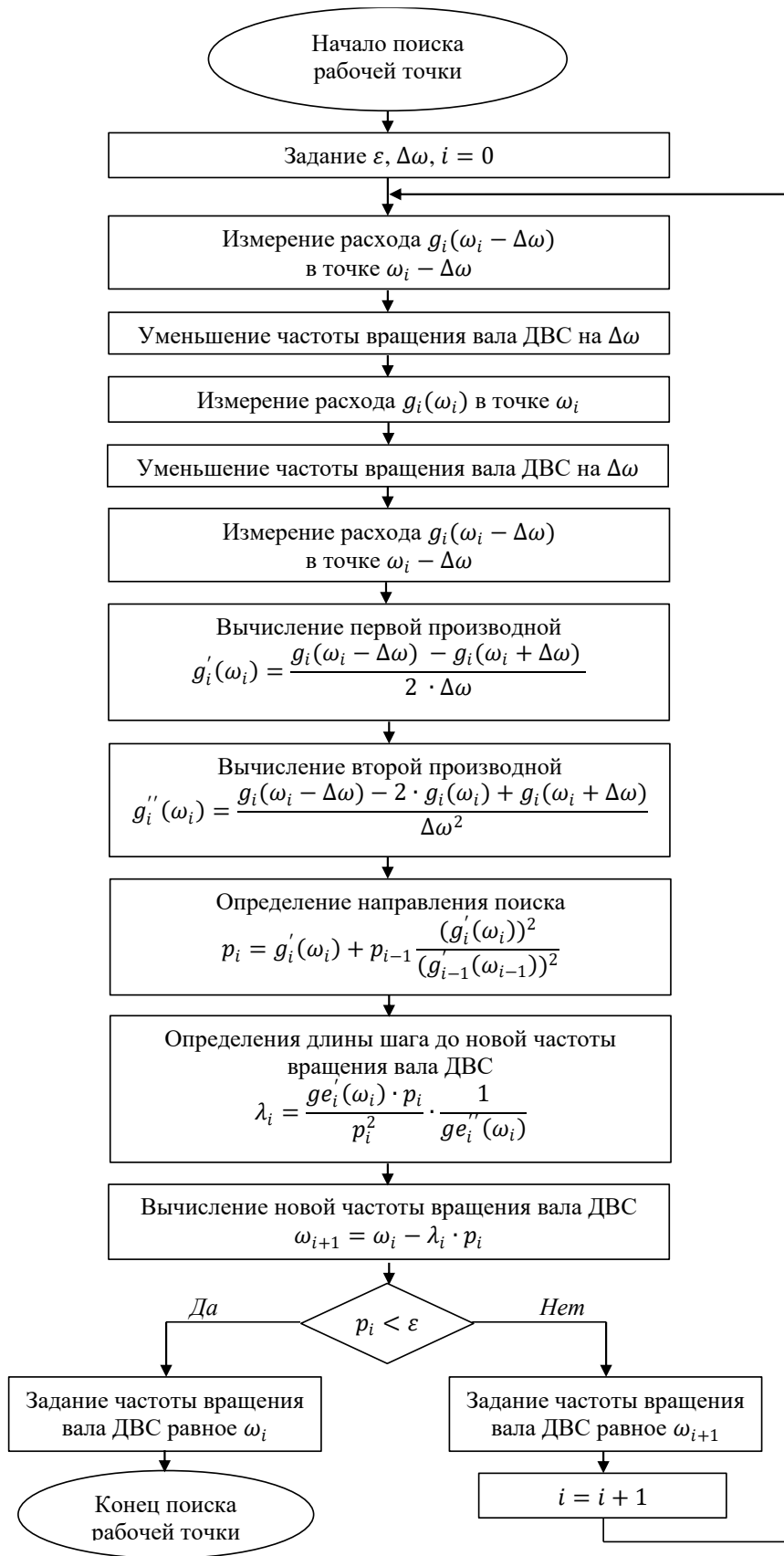


Рис. 4. Алгоритм поиска оптимальной с точки зрения потребления топлива частоты вращения вала ДВС

Разработанный сотрудниками института электроэнергетики экспериментальный стенд дизель-генераторной установки переменной частоты вращения вала на основе синхронного генератора с несколькими выводами статорных обмоток позволяет проводить апробацию различных методов управления ДГУ и вносить изменения в техническую составляющую. Тем самым можно получить новые динамические характеристики системы и алгоритмы регулирования. Рассмотрен алгоритм управления дизельной установки, который позволяет существенно сократить время поиска оптимальной с точки зрения потребления топлива частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания. Контроллер обучения, входящий в состав задатчика экономичного режима, способствует сокращению времени определения частоты вращения вала ДВС с 5-12 до 2-3 шагов. При этой частоте вращения обеспечивается минимальный удельный расход топлива для данного значения мощности нагрузки. Такой эффект был достигнут благодаря использованию метода сопряженных градиентов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Библиографический список

1. Дальний Восток и Арктика. Большие решения для малой энергетики [Электронный ресурс] // Межрегиональная ассоциация «Дальний Восток и Забайкалье». URL: <http://assoc.khv.gov.ru/news/5361> (Дата обращения: 04.05.2023).
2. Некрасов, С.А. Вопросы формирования альтернативной концепции развития электроэнергетики. Ч.1. От роста мощности энергосистемы к повышению структурной устойчивости электроэнергетики: монография. – М.: ЦЭМИ РАН, 2020. – 180 с.
3. Mobarra, M.A. *Variable Speed Diesel Generators: Performance and Characteristic Comparison* / M. Mobarra, M. Rezkallah, A. Ilinca // *Energies*, vol. 15 (592), 31 p., 2022.
4. Carlin, P.W., Laxson, A.S., Muljadi. E.B. *The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology / The report of National Renewable Energy Laboratory*, 68 p., 2001.
5. Дарьенков, А.Б. Оценка расхода топлива дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения на основе матричного преобразователя частоты // *Интеллектуальная электротехника*. – 2019. – № 1. – С. 4-17.
6. Sosnina, E.N., Dar'enkov, A.B., Kurkin, A.A., Lipuzhin, I.A., Mamonov, A.M. *Review of efficiency improvement technologies of wind diesel hybrid systems for decreasing fuel consumption* // *Energies*, vol. 16(184). 2023.
7. Охрана окружающей среды [Электронный ресурс] // Портал госпрограмм РФ. URL: <https://programs.gov.ru/Portal/programs/passport/12> (Дата обращения: 30.04.2023).
8. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
9. ГОСТ 29322-2014 Напряжения стандартные. – М.: Стандартинформ, 2015. – 13 с.
10. Дарьенков, А.Б., Хватов, О.С. Сравнительный анализ удельной стоимости вариантов дизель-генераторных установок переменной частоты вращения / *Актуальные проблемы электроэнергетики*. – 2020. – С. 283-289.
11. Дарьенков, А.Б. Автономная электростанция переменного тока. Патент № RU 2666903 С1, МПК H02J 3/34 № 2017135362; Заявл. 05.10.2017; Оpubл. 13.09.2018; Бюл. № 26.
12. Дарьенков, А.Б., Слузов, А.П., Бердников, И.Е. Автономная электростанция переменного тока. Патент № RU 2773744 С1, № 2021138720; Заявл. 24.12.2021; Оpubл. 08.06.2022.

-
13. **Бердников, И.Е.,** Дарьенков, А.Б. Способ управления дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения. Патент № 2021000067 (RU), Заявл. 28.06.2021; Оpubл. 06.05.2022.
 14. Многомерный поиск. Нелинейное программирование. Методы безусловной минимизации [Электронный ресурс] // Учебно-методический центр кафедры информационных технологий. URL: http://dit.isuct.ru/IVT/sitanov/Literatura/M171_2.html (Дата обращения: 01.05.2023).

A.B. Dar'enkov, I.E. Berdnikov, A.E. Khramov

**EXPERIMENTAL STAND OF A VARIABLE
SPEED DIESEL GENERATOR SET**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The research and development of an experimental stand of a variable speed diesel generator set has been carried out. The control system of the latter uses an algorithm that, according to the power consumption of the load, changes the engine speed to ensure fuel efficiency. The experimental setup allows you to make changes to the structure of its elements. This makes it possible to organize and analyze various methods of controlling a diesel power plant, which is relevant in the context of a real research interest in systems with variable rotational speed.

Keywords: diesel generator, variable speed, semiconductor converters, autonomous system, energy consumption.

References

- [1] The Far East and the Arctic. Large solutions for small energy [Online] // Interregional Association "Far East and Transbaikalia". URL: <http://assoc.khv.gov.ru/news/5361> [Accessed: May. 04, 2023]. (in Russian)
- [2] Nekrasov S. A. Issues of formation of an alternative concept for the development of electric power. Part 1. From the growth of the power system capacity to increase the structural stability of the electric power industry: monograph. - M.: CEMI RAS, 2020. – 180 p (in Russian).
- [3] Mobarra M. A. Variable Speed Diesel Generators: Performance and Characteristic Comparison / M. Mobarra, M. Rezkallah, A. Ilinca // *Energies*, vol. 15 (592), 31 p., 2022.
- [4] Carlin P.W., Laxson A.S., Muljadi E.B. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology / The report of National Renewable Energy Laboratory, 68 p., 2001.
- [5] Dar'enkov A.B. Estimation of fuel consumption of a diesel generator power plant of variable speed on the basis of a matrix frequency converter // *Intellectual electrical engineering*. - 2019. - No. 1. - pp. 4-17. (in Russian)
- [6] Sosnina E.N., Dar'enkov A.B., Kurkin, A.A., Lipuzhin, I.A., Mamonov, A.M. Review of efficiency improvement technologies of wind diesel hybrid systems for decreasing fuel consumption // *Energies*, vol. 16(184). 2023.
- [7] Environmental protection [Online] // Portal of state programs of the Russian Federation. URL: <https://programs.gov.ru/Portal/programs/passport/12> [Accessed: April. 30, 2023] (in Russian).
- [8] GOST 32144-2013 Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose electrical supply systems. - Moscow : Standartinform, 2014. – 19 p (in Russian).
- [9] GOST 29322-2014 Standard voltages. - Moscow : Standartinform, 2015. – 13 p (in Russian).
- [10] Dar'enkov A.B., Khvatov O.S. Comparative analysis of the unit cost of variants of diesel generator sets of variable speed // *Actual problems of the electric power industry*. – 2020. - pp. 283-289. (in Russian)
- [11] Dar'enkov A. B. Autonomous AC power plant. Patent No. RU 2666903 C1, IPC H02J 3/34 No. 2017135362; Application 05.10.2017; Publ. 13.09.2018; Bul. No. 26 (in Russian).
- [12] Dar'enkov A. B., Sluzov A. P., Berdnikov I. E. Autonomous alternating current power plant. Patent No. RU 2773744 C1, No. 2021138720; Application No. 24.12.2021; Publ. 08.06.2022 (in Russian).
- [13] Berdnikov I. E., Dar'enkov A. B. A method for controlling a diesel generator set of variable speed. Patent No. 2021000067 (RU), Application No. 28.06.2021; Publ. 06.05.2022 (in Russian).

-
- [14] Multidimensional search. Nonlinear programming. Methods of unconditional minimization [Online] // Educational and methodological Center of the Department of Information Technologies. URL: http://dit.isuct.ru/IVT/sitanov/Literatura/M171_2.html [Accessed: May. 01, 2023] (in Russian).

В.В. Доценко¹, А.М. Литвиненко¹, И.А. Багрянцев²

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЧАСТКОВ ПЕРЕГРУЗКИ ОБМОТОК ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТОКОВ

Воронежский государственный технический университет¹
Липецкий государственный технический университет²

Аннотация. В статье рассмотрено применение алгоритма скользящего окна с частотой дискретизации записи для определения перегрузки обмоток двигателя постоянного тока методом вычисления эквивалентного тока за 10-ти минутный временной интервал.

Ключевые слова: диагностика электродвигателя, эквивалентный ток, скользящее среднеквадратичное значение.

Перегрузка и несоблюдение ПВ режима электрических машин в ходе эксплуатации на различных предприятиях является распространенным явлением. Целенаправленные перегрузки, вызванные технологическим режимом, неправильные действия операторов, сбои в работе автоматических систем могут приводить к ухудшению условий работы электрической машины [1]. Превышение установленного ПВ режима, несоблюдение номинальных параметров электрических машин могут приводить к перегревам обмоток, старению изоляции и прочим негативным факторам, приводящим к выходу машины из строя [3]. Неисправности, связанные с данными изменениями, могут проявиться не сразу, что усложнит диагностику и поиск причин. Как пример, превышение установленного ПВ режима в условиях недостаточного охлаждения повлечет за собой высушивание изоляции и, как следствие, межвитковое короткое замыкание, пробой изоляции или выгорание обмотки. Данные случаи невозможно диагностировать превентивно, до развития дефекта. Защита от сверхтока, перегрузки, контроль изоляции не могут зафиксировать данный режим работы [4].

В данной работе представлен способ превентивной диагностики изменения ПВ режима работы машины. Способ заключается в сочетании алгоритма скользящего вычисления за выбранный временной интервал и метода эквивалентного тока для определения участков перегрузки. [2]

Метод эквивалентного тока (1) основан на том, что проходящий по обмоткам двигателя и изменяющийся по величине фактический ток заменяется в расчетах эквивалентным по величине током ($I / I_{\text{экв.}}$), который вызывал бы в двигателе те же тепловые потери, что и действительный ток [6].

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^2} \quad (1)$$

где $I_{\text{э}}$ – эквивалентный ток, n – количество точек (период записи), x^2 – квадрат значения тока в единицу времени.

Алгоритм представляет собой выбор временного интервала для расчета эквивалентного тока, для расчета коэффициента перегрузки по току по ГОСТ Р 52776-2007 [5] применяется десятиминутный временной интервал. Именно его будем использовать для дальнейших вычислений. После получения на вход алгоритма необходимого времени записи (10 минут) происходит расчет эквивалентного значения тока за данный период и смещение десятиминутного окна вперед на соответствующий интервал записи с последующим расчетом эквивалентного тока. В результате работы алгоритма получаем характеристику зависимости эквивалентных токов за десятиминутные интервалы от времени. При нанесении на данную кривую линии номинального тока можно проводить визуальную оценку режима работы электродвигателя. После проведения оценки записи режима работы двигателя необходимо отобразить точку с максимальным значением эквивалентного тока, взять десятиминутный участок до этой точки включительно и произвести расчет ПВ (2), эквивалентного тока, приведенного к ПВ (3) режиму и далее вычислить коэффициент перегрузки (4).

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} * 100, \tag{2}$$

где ПВ – продолжительность включения, t_p – время работы привода за цикл, $t_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла.

$$I_{\text{э.пв}} = I_{\text{э}} * \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ном}}}}, \tag{3}$$

где $I_{\text{э.пв}}$ – эквивалентный ток, приведенный к ПВ, $\text{ПВ}_{\text{ном}}$ – номинальная продолжительность включения.

$$\text{КП} = \frac{I_{\text{э.пв}}}{I_{\text{ном}}}, \tag{4}$$

где КП – коэффициент перегрузки, $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток обмотки двигателя.

Данная программа оценки режима работы привода поможет в определении нарушения эксплуатации и оценке уровня перегрузки, что поможет своевременно принять меры по изменению режима, либо начать поиски развивающегося дефекта, увеличивающего нагрузку на электрическую машину, например, износ подшипников. Это поможет сохранить двигатель и избежать последствий его аварийного выхода из строя.

Далее приведем графики и расчеты. Оценку будем проводить на электродвигателях постоянного тока с ПВ = 60 %. Номинальный якорный ток двигателя №1 $I_{\text{ном1}} = 250$ А, номинальный якорный ток двигателя №2 $I_{\text{ном2}} = 7$ А.

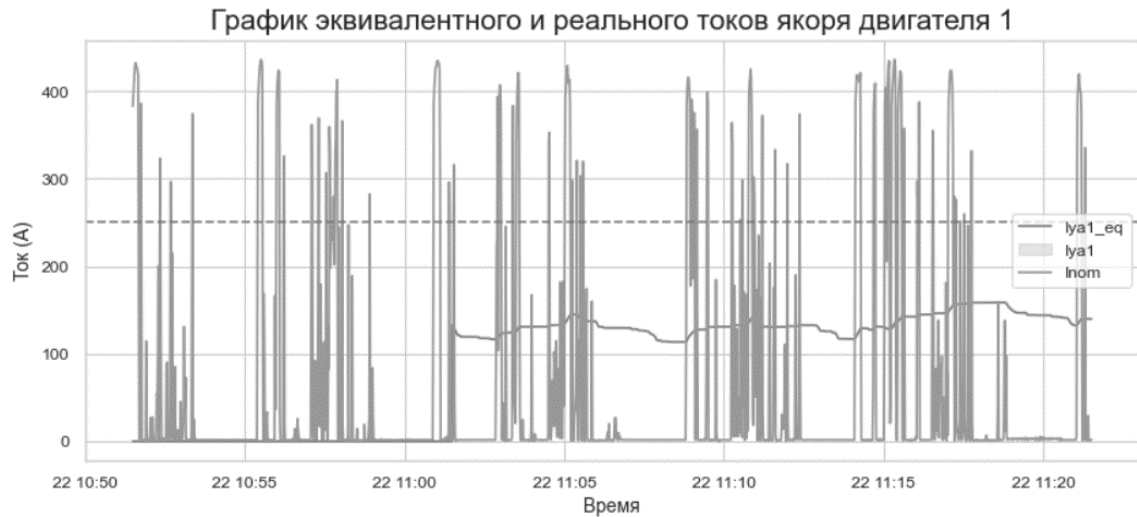


Рис. 1. График общей выборки, эквивалентного тока и номинального тока двигателя №1

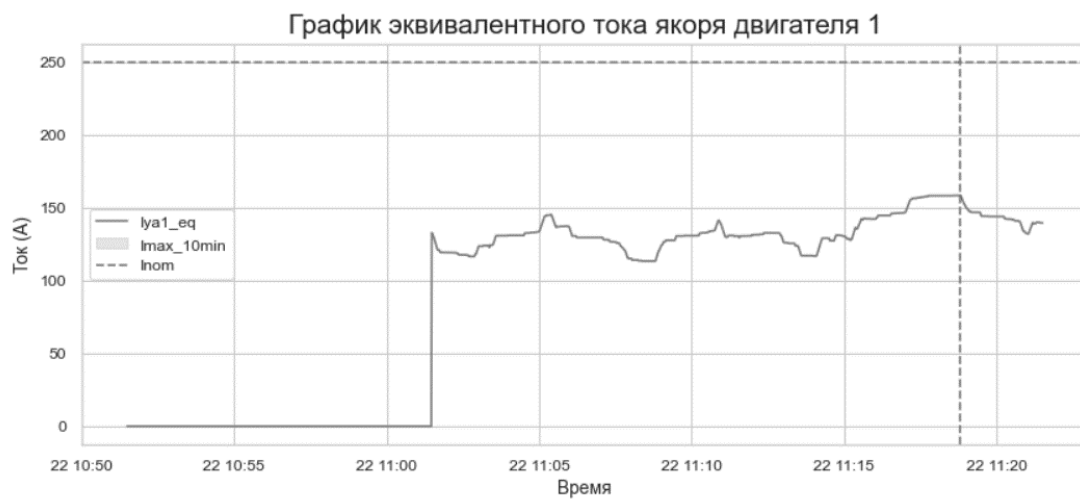


Рис. 2. График эквивалентного тока двигателя №1



Рис. 3. График выбранного участка с максимальным эквивалентным током двигателя №1

```

tc_ya1 = df_max_ya1.time.count()
tr_ya1 = df_max_ya1.query('iya1 > -5 and iya1 <= 5').time.count()
summ_2_ya1 = df_max_ya1.iya1.pow(2).sum()
prod_vk1 = round(((tc_ya1 - tr_ya1) / tc_ya1) * 100), 2)
i_ekv = round(np.sqrt(summ_2_ya1 / tc_ya1), 2)
i_ekv_pv = round((i_ekv * np.sqrt(prod_vk1 / pvk_nom)), 2)
kp = round(((i_ekv_pv / i_nom_ya) * 100) - 100), 2)
print('Якорь двигателя №1')
print("Продолжительность включения (ПВ) = {} %".format(prod_vk1))
print("Эквивалентный ток = {} A".format(i_ekv))
print("Эквивалентный ток, приведенный к ПВ = {} A".format(i_ekv_pv))
print("Коэффициент перегруза = {} %".format(kp))
    
```

Якоря двигателя №1
 Продолжительность включения (ПВ) = 37.5 %
 Эквивалентный ток = 158.54 А
 Эквивалентный ток, приведенный к ПВ = 125.34 А
 Коэффициент перегруза = -48.84 %

Рис. 4. Расчет ключевых показателей для оценки перегрузки двигателя №1

В данном случае, двигатель недогружен на 48,84 %.

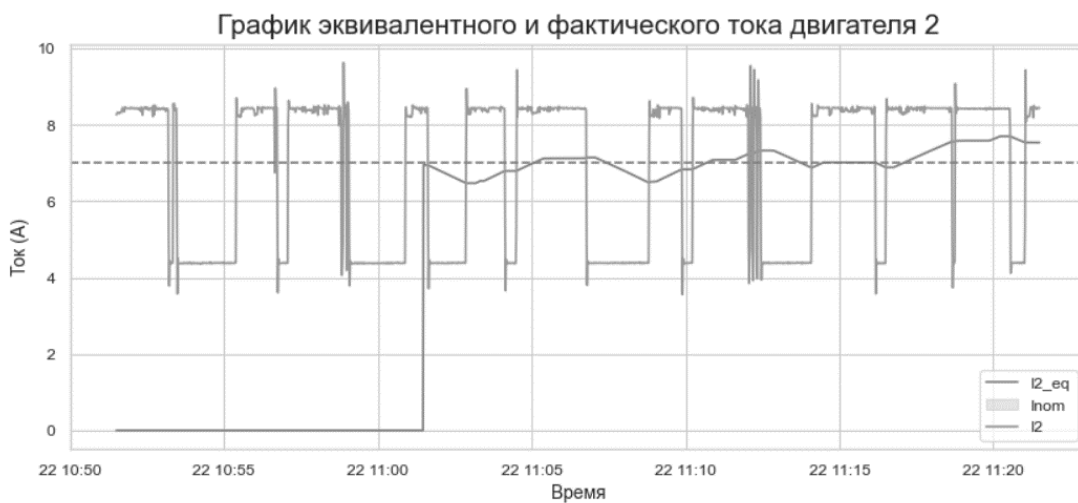


Рис. 5. График общей выборки, эквивалентного тока фактического и номинального тока двигателя №2

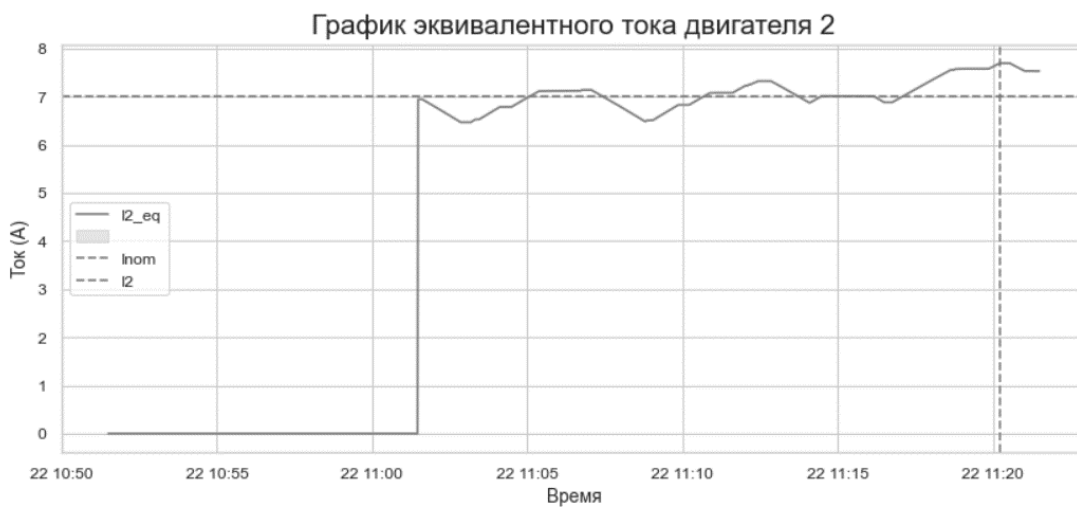


Рис. 6. График эквивалентного тока двигателя №2

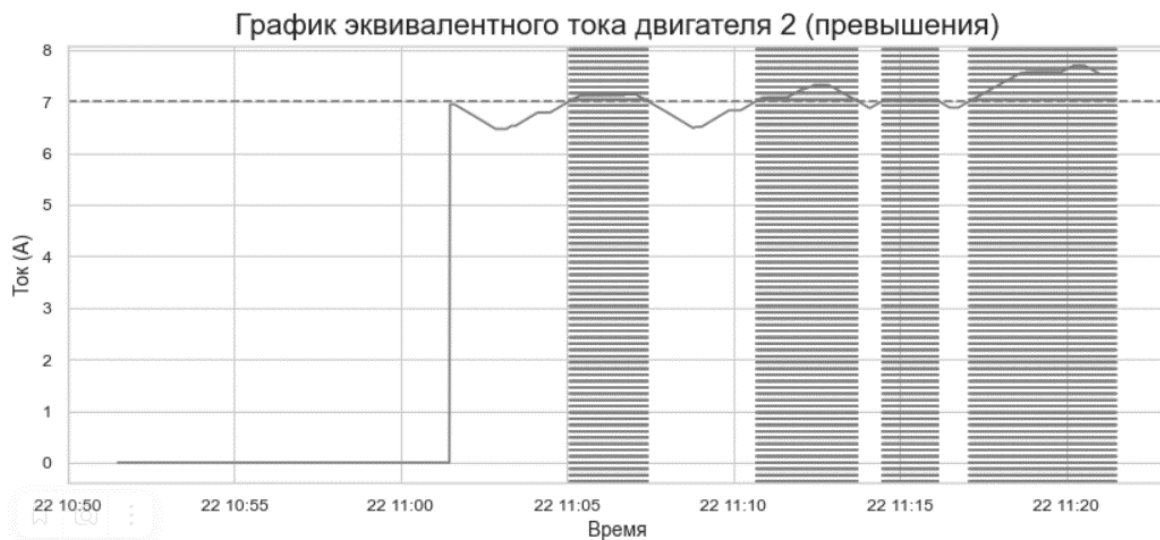


Рис. 7. График участков превышения линии номинального тока двигателя №2



Рис. 8. График выбранного участка с максимальным эквивалентным током двигателя №2

```
tc_voz2 = df_max_voz2.time.count()
tr_voz2 = df_max_voz2.query('ivoz2 > -1 and ivoz2 <= 1').time.count()
summ_2_voz2 = df_max_voz2.ivoz2.pow(2).sum()
prod_vk1 = round((((tc_voz2 - tr_voz2) / tc_voz2) * 100), 2)
i_ekv = round(np.sqrt(summ_2_voz2 / tc_voz2), 2)
i_ekv_pv = round((i_ekv * np.sqrt(prod_vk1 / pvk_nom)), 2)
kp = round((((i_ekv_pv / i_nom_voz) * 100) - 100), 2)
print('Якорь двигателя №2')
print("Продолжительность включения (ПВ) = {} %".format(prod_vk1))
print("Эквивалентный ток = {} A".format(i_ekv))
print("Эквивалентный ток, приведенный к ПВ = {} A".format(i_ekv_pv))
print("Коэффициент перегруза = {} %".format(kp))
```

Якорь двигателя №2
 Продолжительность включения (ПВ) = 100.0 %
 Эквивалентный ток = 7.7 A
 Эквивалентный ток, приведенный к ПВ = 9.94 A
 Коэффициент перегруза = 42.0 %

Рис. 9. Расчет ключевых показателей для оценки перегрузки двигателя №2

В данном случае, двигатель перегружен на 42 %. Это обусловлено фактическим ПВ = 100 % при номинальном ПВном = 60 %, а также превышению эквивалентного тока за период по отношению к номинальному току якоря.

Вывод: рассмотренный в данной статье алгоритм способен отслеживать изменение режима ПВ электрической машины с запаздыванием в 10 минут (данное требование соответствует ГОСТ Р 52776-2007), своевременное определение несоответствия режиму и перегрузки электрической машины поможет избежать ее выхода из строя и аварийного прерывания технологического процесса. Данный метод определит перегруз даже при режиме, когда параметры уставок релейных защит по току и временной отсечки фактически не достигаются, а колеблются в районе верхней границы.

Библиографический список

1. **Острецов, В.Н.** Электропривод и электрооборудование: учебник-практику / В.Н. Острецов, А.В. Палицын. – М.: Юрайт, 2018. – 239 с.
2. **Гельфанд, И.М.,** Шень, А.Х. Алгебра. – М.: ФАЗИС, 1998. – С. 185-189.
3. **Борисенко А.И.,** Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин М.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 95-112.
4. **Ключев, В.И.** Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
5. ГОСТ Р 52776-2007 [Электронный ресурс] URL <https://docs.cntd.ru/document/1200057658> (дата обращения 15.05.2023).
6. **Васильев Б.Ю.,** Добуш В.С. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах // Электричество. – 2014. – № 4. – С. 54-61.

V.V. Dotsenko¹, A.M. Litvinenko¹, I.A. Bagryantsev²

**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DETERMINING
THE OVERLOAD AREAS OF THE MOTOR WINDINGS BY THE METHOD
OF EQUIVALENT CURRENTS**

Voronezh State Technical University 1

Lipetsk State Technical University 2

Abstract. The article considers the application of a sliding window algorithm with a recording sampling rate to determine the overload of the DC motor windings by calculating the equivalent current in a 10-minute time interval.

Key words: electric motor diagnostics, equivalent current, sliding RMS value.

References

- [1] Ostretsov V.N. Electric drive and electrical equipment // Moscow: Yurayt Publishing House, 2023. – No. 9. – pp. 105-108.
- [2] Gelfand I. M., Shen A. X. Algebra. – M.: PHASIS, 1998. – pp. 185-189.
- [3] Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. Cooling of industrial electric machines M.: Energoatomizdat, 1983. – 296 p. – pp. 95-112.
- [4] Klyuchev V.I. Theory of electric drive. M.: Energoatomizdat, 1998. – 704 p.
- [5] GOST R 52776-2007, Internet resource <https://docs.cntd.ru/document/1200057658>
- [6] Vasiliev B.Y., Dobush V.S. Effective control algorithms for semiconductor converters in asynchronous electric drives. Electricity. 2014. No. 04. pp. 54-61.

УДК 621.313

DOI: 10.46960/apeen_2023_89

М.А. Леликов, В.Н. Мещеряков, И.В. Музылева**РАЗРАБОТКА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА МОТАЛКИ
В ПРОГРАММНОЙ ОБОЛОЧКЕ «TIA PORTAL»**

Липецкий государственный технический университет

Аннотация. В статье рассмотрен состав моталки. Описан алгоритм работы моталки. Создана программа управления моталкой на языке «Lader» в Step 7. Смоделирован человеко-машинный интерфейс в Win CC. Проведены испытания на учебном стенде по промышленной автоматизации в лабораториях кафедры электропривода.

Ключевые слова: моталка, человеко-машинный интерфейс, TIA Portal, Win CC, Step 7, промышленная автоматизация.

Моталка - важная часть прокатного производства, она предназначена для того, чтобы обеспечить натяжение и смотку стальной полосы. Моталка обладает конструкцией свободноповешенного шпинделя и гидравлически управляемого барабана, оборудована тяжелым зубчатым редуктором, который обеспечивает ее надежную работу в тяжелых условиях, асинхронный двигатель с векторным управлением по моменту и система автоматического регулирования моталки по кромке полосы позволяет точно смотать металлические полосы. Все построение системы будет осуществляться в программном обеспечении «TIA Portal» версии V16. Программа написана в «Step 7» на языке программирования контролеров Lader, человеко-машинный интерфейс в Win CC. Все это возможно сделать в одной программе, которая объединяет все эти функции в «Tia Portal» от компании «Siemens» [1]. Симулирование программы и тестирование панели оператора будет осуществляться на учебном стенде по промышленной автоматизации. Алгоритм работы моталки представлен на рис. 1.

В данном проекте симулируются несколько измерительных устройств. Дискретные датчики положения, наличия питания и исправности узлов агрегата. Датчик «привод включен» служит триггером для всего тех. процесса.

Аварийные датчики «привод исправен», «тормоз исправен», «смазка в норме» отвечают за исправность редуктора, дискового тормоза и насоса, соответственно. Датчики положения барабана, ролика, тележки и полосы сообщают оператору, в каком положении они находятся. Аналоговые датчики скорости, ускорения и натяжения информируют оператора о действующей скорости и ускорении моталки, натяжении полосы, диаметре рулона.

Для управления приводом моталки создана система из ПЛК Siemens S7-1212C и панели НМІ КТР600 Basic color. Связь между ними осуществляется по протоколу Ethernet. Конфигурация системы представлена на рис. 2.

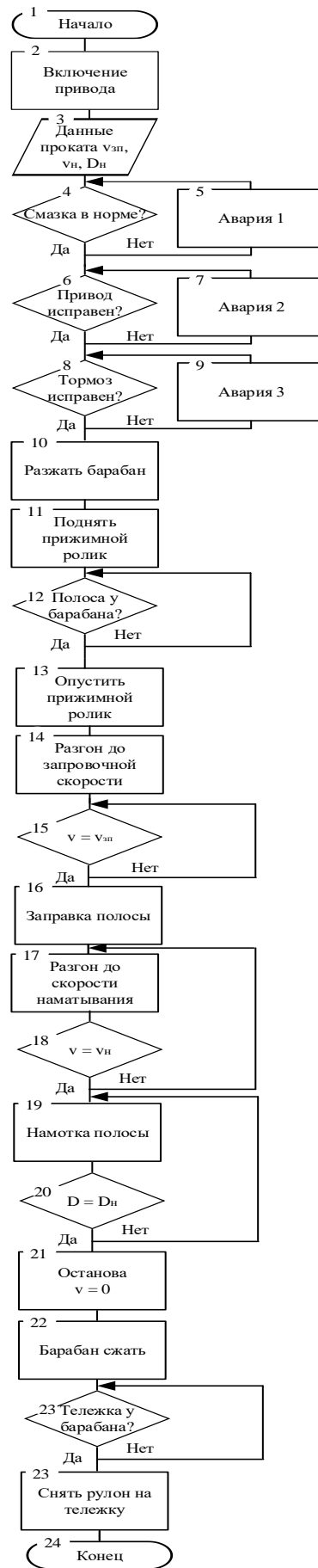


Рис. 1. Алгоритм работы моталки



Рис. 2. Конфигурация программы в «Tia Portal»

Сконструированный человеко-машинный интерфейс на панели оператора KP-600 представлен на рис. 3 [2]. Экран параметры проката предназначен для изменения входных показателей рулона. На выбор представлено 6 видов проката (табл. 1) с длиной полосы от 50 до 120 м и толщиной проката от 10 до 15 мм.

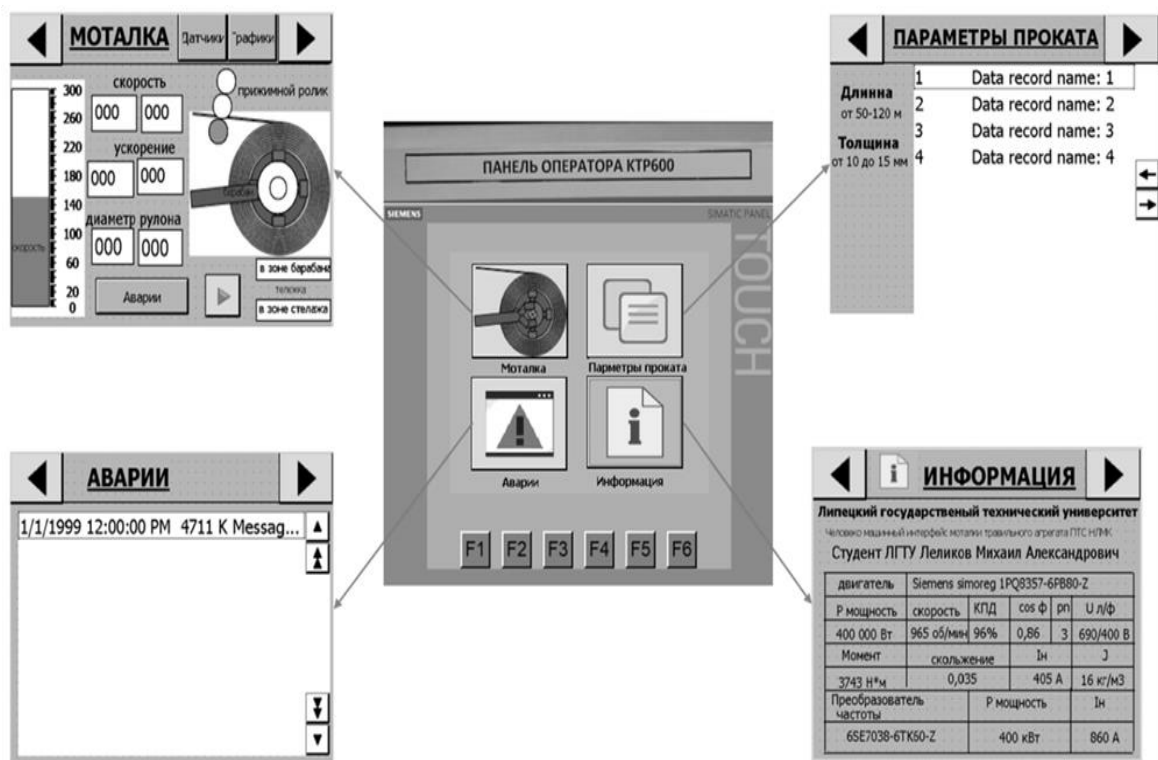


Рис. 3. Главный экран ЧМИ моталки и навигационные области

Характеристики для симулирования рецепта выбора проката

| Прокат | длина | толщина | Изменяемые данные время/диаметр |
|----------|-------|---------|------------------------------------|
| Прокат 1 | 50 м | 10 мм | 40с /800мм |
| Прокат 2 | 100 м | 10 мм | 70с /1000мм |
| Прокат 3 | 120 м | 10 мм | 80с /1200мм |
| Прокат 4 | 50 м | 15 мм | 40с /900мм |
| Прокат 5 | 100 м | 15 мм | 70с /1200мм |
| Прокат 6 | 120 м | 15 мм | 80с /1500мм |

Главный экран запускающийся в начале работы, содержит в себе четыре навигационные области:

- экран моталки,
- экран параметров проката,
- экран аварии,
- экран информации

Перейдя на экран моталка (рис. 4) предоставляются следующие возможности:

- переход в более подробное окно датчиков.
- переход в окно просмотра графиков тахограммы моталки,
- переход в окно аварий.



Рис. 4. Экран моталка и навигационные области

На экране моталки можно просматривать положение барабана, прижимного ролика, тележки. Эти навигационные области в зависимости от положения загораются зеленым цветом. Также имеется область задания скорости, ускорения и диаметра. Аналоговые датчики показывают фактическое значение параметров скорости, ускорения и диаметра. Програма управляемая технологическим процессом изображена на рис. 5 [3].

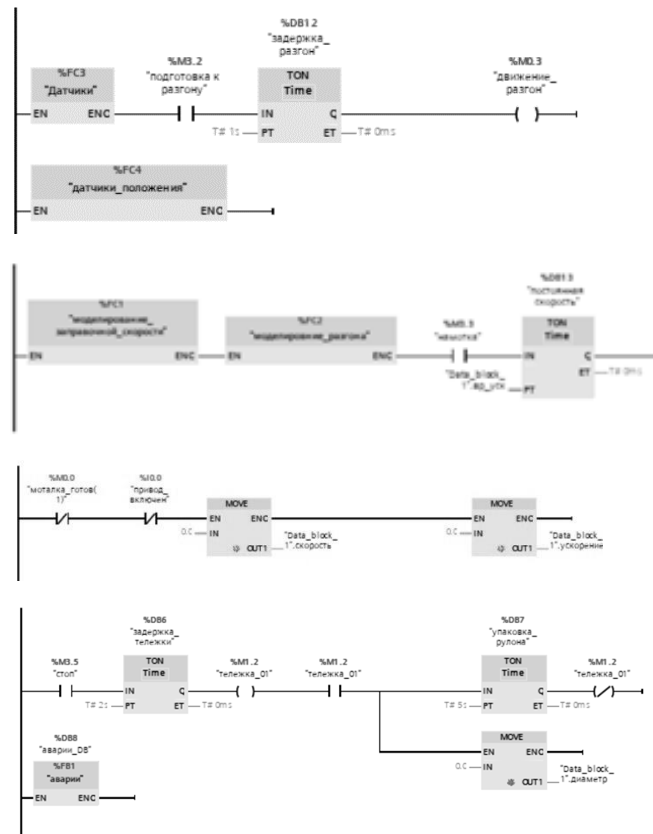


Рис. 5. Програма выполняемая контролером моталки

Испытания проводятся на учебном стенде по промышленной автоматизации в лабораториях ЭП. После выгрузки программы из персонального компьютера в контроллер и панель оператора открывается главный экран. Во вкладке Параметры проката выбираем прокат (рис. 6, а). Во вкладке моталка запускаем моталку. Далее ждем, пока все аварийные датчики дадут обратную связь по исправности агрегата. На рис. 6, б видно, что аварии отсутствуют. Далее следует алгоритм, датчики положения сообщают об этом. Начинается заправка полосы на заправочной скорости (рис. 6, в). Диаметр в это время не увеличивается. Как можно увидеть, слева от цифровых показаний скорости элемент «toolbar» наглядно показывает изменение скорости. После заправки полосы моталка начинает ускорение до номинальной скорости намотки, однако диаметр начинает увеличиваться уже на этапе ускорения, что можно заметить на панели. Далее электропривод будет работать в номинальном режиме до полной намотки полосы на барабан. На рис. 6 д приведена диаграмма скорости и ускорения моталки. После того как полоса наматывается на барабан, моталка останавливается, барабан сжимается и рулон снимается на тележку, перемещаясь в складское помещение к обвязочному устройству.

При симулировании аварийных датчиков датчики загораются красным цветом, а во вкладке аварии демонстрируются последние аварии и их завершение (рис. 6, е).

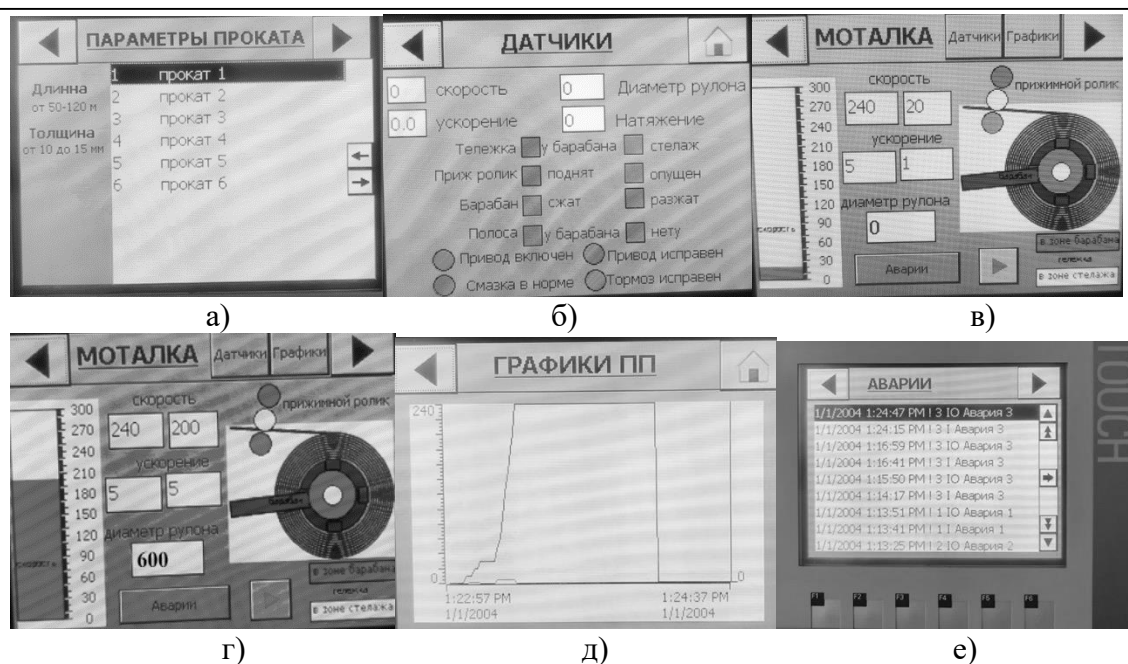


Рис. 6. Экраны, снятые при симулировании на стенде:

а) параметры проката, б) датчики до начала работы, в) экран моталки во время заправки посылы, г) экран моталки во время намотки, д) тахограмма двигателя, е) экран аварии после симулирования аварий

Выводы:

1. Разработан алгоритм работы моталки, программно реализованный в TIA Portal.
2. Разработан человеко-машинный интерфейс моталки.
3. Проведены испытания на учебном стенде по промышленной автоматизации.
4. Описаны процессы реализуемые оператором и контроллером.

Библиографический список

1. **Музылева, И.В.** Программирование в Tia Portal: учеб. пособие / И.В.Музылева, К.А. Музылев. – Липецк: ЛГТУ, 2019. – 50 с.
2. **Музылева, И.В.** Практическая работа в STEP7 Micro/Win: учеб. пособие / И.В.Музылева. – Липецк: ЛГТУ, 2005. – 48 с.
3. **Музылева, И.В.** Программирование промышленных логических контроллеров SIMATIC S7 [Текст]. В 3 ч. Ч. 1. Семейство S7-200: учебное пособие / И.В. Музылева. Липецк: ЛГТУ, 2013. – 72 с.
4. **Леликов, М.А.** Моделирование процесса подсчета диаметра рулона моталки в «TIA PORTAL» [Электронный ресурс] / М.А. Леликов // Цифровая трансформация в энергетике. Вып. IV : Материалы 4-й Международной научной конференции. – Тамбов: ТГТУ, 2023. – 161 с.
5. ГОСТ 24.104-85 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования.
6. Травильный комплекс ПТС «Агрегат травления проталкиванием»: технологическая инструкция травильного комплекса ПАО «НЛМК». – Липецк, 2006. – 500 с.

M.A. Lelikov, V.N. Meshcheryakov, I.V. Muzyleva

DEVELOPMENT OF THE HUMAN-MACHINE INTERFACE OF THE WINDER IN THE "TIA PORTAL" SOFTWARE SHELL

Lipetsk State Technical University

Abstract. The article considers the composition of the winder. The algorithm of the winder operation is described. A winder control program has been created in the "Lader" language in Step 7. A human-machine interface has been modeled in Win cc. Tests were carried out at the training stand on industrial automation in the laboratories of the Department of Electric Drive.

Key words: winder, human-machine interface, TIA Portal, Win CC, Step 7, industrial automation.

References

- [1] Muzyleva, I.V. Programming in Tia Portal [Text]: textbook. manual / I.B. Muzyleva, K.A. Muzylev. - Lipetsk: LGTU, 2019. - 50 (in Russian).
- [2] Muzyleva, I.V. Practical work in STEP 7 Micro/Win [Text]: textbook. manual / I.B. Muzyleva. - Lipetsk: LGTU, 2005. - 48 (in Russian).
- [3] Muzyleva, I.V. Programming of industrial logic controllers SIMATIS S7 [Text]. 1. The S7-200 family: a textbook / I.B. Muzyleva. Lipetsk: Publishing house of LGTU, 2013. - 72 (in Russian).
- [4] Lelikov M.A. Modeling of the process of calculating the diameter of the coil winder in "TIA PORTAL" [Electronic resource] / M.A. Lelikov // Digital transformation in power engineering. Vol. IV : materials of the Fourth International Scientific Conference / ed. by T. I. Chernyshov ; FGBOU VO "TSTU". – Tambov : Publishing Center of FGBOU VO "TSTU", 2023. – 161 (in Russian).
- [5] GOST 24.104-85 Unified system of standards for automated control systems. Automated control systems. General requirements (in Russian).
- [6] Etching complex of PTS "Etching unit by pushing" [Text]: technological instruction of the etching complex of PAC NLMK - Lipetsk 2006. – 500 (in Russian).

В.Н. Мещеряков, А.А. Муравьев, А.И. Бойков, Ф.А. Боженок

**УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ
РОТОРОМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ КОРРЕКЦИИ
СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ**

Липецкий государственный технический университет

Аннотация. В статье рассматривается вариант решения задачи по улучшению динамических и энергетических характеристик асинхронного электропривода с частотным управлением путем внедрения программных средств коррекции сигналов управления, основанных на методике использования наблюдателей переменных асинхронного двигателя. Применение наблюдателя угла между векторами тока статора и тока намагничивания в системе коррекции управления электроприводом асинхронного двигателя с фазным ротором, дает возможность расчетным способом определить угол между векторами переменных, формирующих момент, основываясь на данных измерений простыми датчиками гармонических сигналов фазных токов статора и тока ротора. В рамках решения поставленной задачи предлагается метод векторной коррекции управляющего сигнала для задания мгновенных значений фазных токов статора и тока ротора, определяющий оптимальный фазовый сдвиг между векторами тока намагничивания и тока статора.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электропривод, фазный ротор, преобразователь частоты, векторная коррекция

Одно из перспективных направлений развития и совершенствования асинхронных электроприводов – это применение частотно-токовых систем управления с дополнительной коррекцией задающих сигналов в системе управления [1-8].

Для частотно управляемого ненасыщенного асинхронного двигателя (АД), в случае его режимов работы при пониженном статическом моменте наименьшее отношение переменных «ток статора / момент» обеспечивается при значении угла между векторами тока статора и тока намагничивания φ_0 близком к 45° [1, 2, 4, 5]. Повышенная кратность пускового момента вызывает возрастание тока статора и, соответственно, приводит к насыщению магнитной цепи. Если намагничивающая составляющая тока статора имеет постоянное значение, то увеличение кратности момента происходит по причине увеличения активной составляющей тока статора, и, как следствие, происходит возрастание угла φ_0 .

Для частотного электропривода, выполненного на базе короткозамкнутого АД [2, 3], существует система коррекции, действие которой основано на выработке корректирующего сигнала на основании косвенного определения угла сдвига фаз между эквивалентными переменными, представляющими собой опи-

бающие первых гармоник напряжения и тока статора. Но в предлагаемой системе коррекции, вследствие импульсного характера выходного напряжения инвертора, требуется применение инерционных фильтров, снижающих быстродействие системы. Поэтому такая коррекция может использоваться в основном для повышения энергетических показателей электропривода в установившемся рабочем режиме.

Рассмотрение электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) показывает: ток статора и ток ротора доступны для измерения, что в свою очередь позволяет между векторами тока статора и тока намагничивания рассчитать угол [2, 5].

Целью данной работы является разработка скалярной системы управления с корректирующим устройством, которое действует на основании обработки сигналов гармонических величин: трехфазных токов статора и ротора. Эти величины являются моментобразующими, и для определения угла между ними используется наблюдатель угла.

Для решения поставленной задачи использовалась предложенная на рис. 1 система электропривода переменного тока, функционирующая по алгоритму, описанному далее.

Формирование и поддержка момента двигателя на требуемом уровне осуществляется за счет поддержания амплитуды тока статора $|I_1|$ на соответствующем уровне, а также задания постоянной величины абсолютной разности между скоростями вращения поля статора и поля ротора $\Delta\omega$. При этом осуществляется коррекция, которая при отклонении угла между векторами тока статора и тока намагничивания от заданного значения, оказывает соответствующее влияние на угловое положение первого.

При постоянном значении тока статора момент двигателя будет максимальным при задании блоком 24 оптимального значения сигнала $\Delta\omega_{\text{опт}}$, равного:

$$\Delta\omega_{\text{опт}} = \frac{1}{p_n} \cdot \frac{R_2'}{L_{2\sigma} + L_m}. \quad (1)$$

Оптимальное значение угла между векторами тока статора и тока намагничивания составляет $\varphi_{\text{опт}} = 45^\circ$.

По теореме косинусов вычисляем угол, используя для этого треугольник токов, приведенный на векторной диаграмме (рис. 2), в соответствии с тригонометрическим соотношением:

$$\varphi_0 = \arccos \frac{|I_1|^2 + |I_m|^2 - |I_2'|^2}{2 \cdot |I_1| \cdot |I_m|}. \quad (2)$$

Чтобы исследовать переходные процессы в разработанном электроприводе использовался метод компьютерного имитационного моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab. Компьютерная модель исследуемого электропривода показана на рис. 2.

Проведем моделирование переходных процессов для данной системы: разгон до половины номинальной скорости с последующим разгоном до номинальной скорости под нагрузкой. Полученные графики переходных процессов представлены на рис. 4-5.

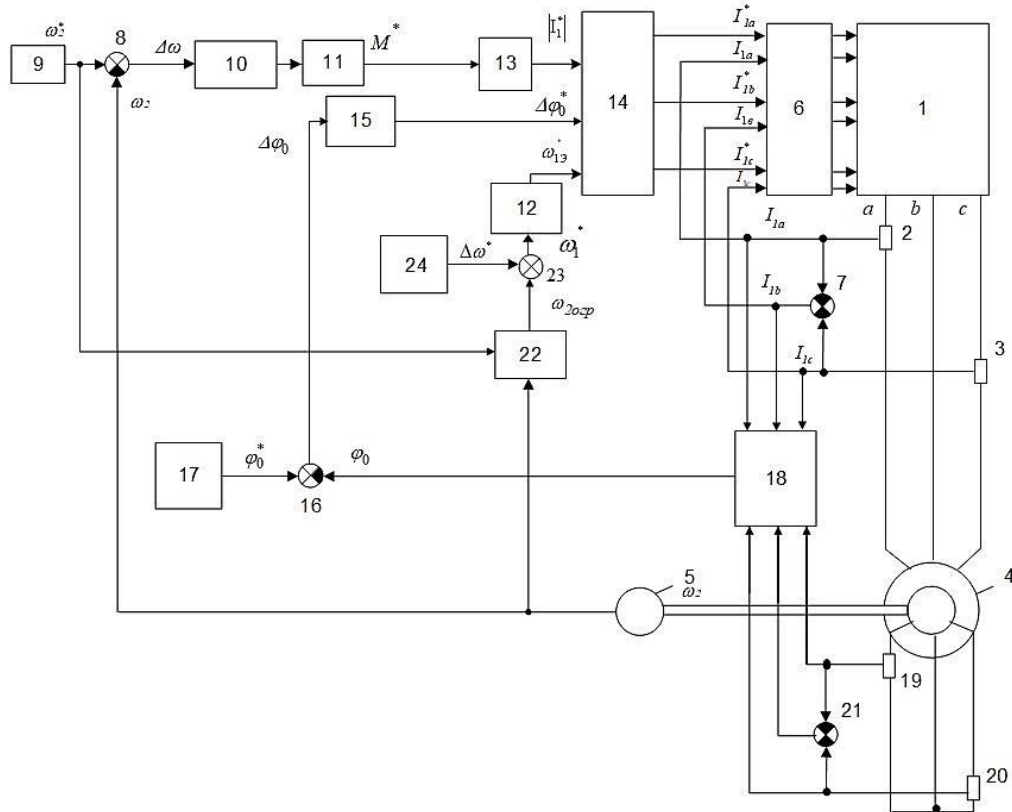


Рис. 1. Функциональная схема электропривода переменного тока:

- 1 – инвертор тока; 2,3 – датчики фазных токов статора; 4 – статорные обмотки АДФР; 5 – датчик скорости; 6 – регулятор тока; 7 – сумматор токов; 8 – блок сравнения скорости; 9 – блок задания скорости; 10 – ПИ-регулятор для $\Delta\omega$; 11 – блок ограничения; 12 – пропорциональный блок (умножение на p_n); 13 – блок, формирующий задание сигнала модуля тока статора; 14 – блок задания мгновенных значений тока статора; 15 – ПИ-регулятор для $\Delta\varphi_0$; 16 – блок сравнения угла φ_0 ; 17 – блок задания оптимального угла; 18 – блок расчета угла φ_0 ; 19,20 – датчики фазных токов ротора; 21 – блок получения тока ротора в фазе «в»; 22 – блок ограничения сигнала частоты вращения; 23 – сумматор; 24 – блок задания $\Delta\omega^*$

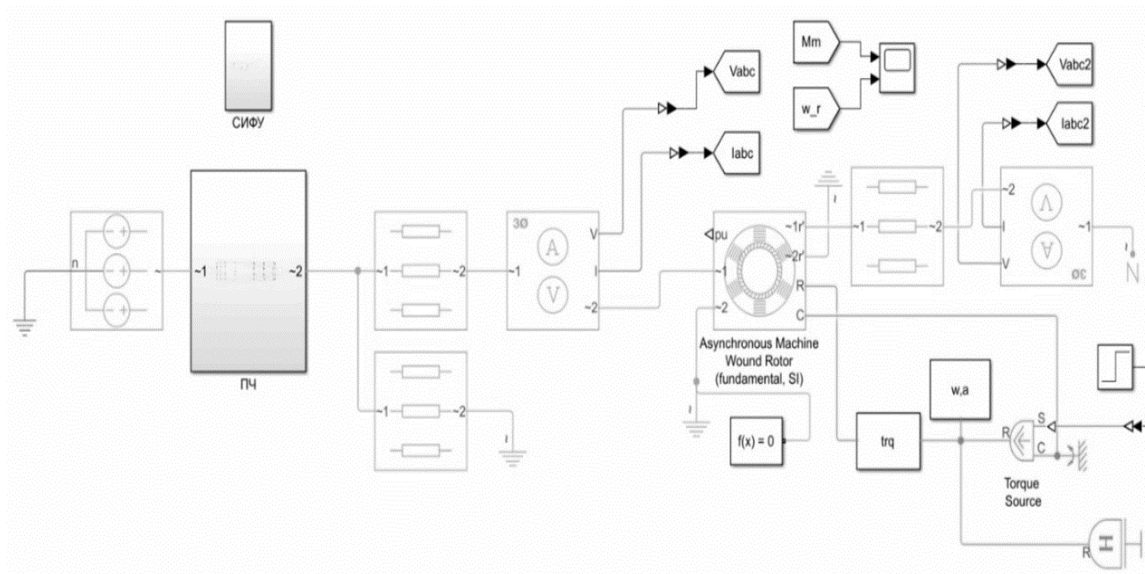


Рис. 2. Модель исследуемого электропривода в пакете Simulink

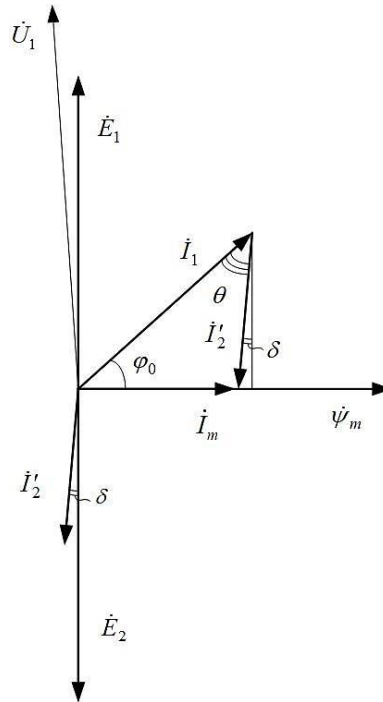


Рис. 3. Векторная диаграмма асинхронного электродвигателя

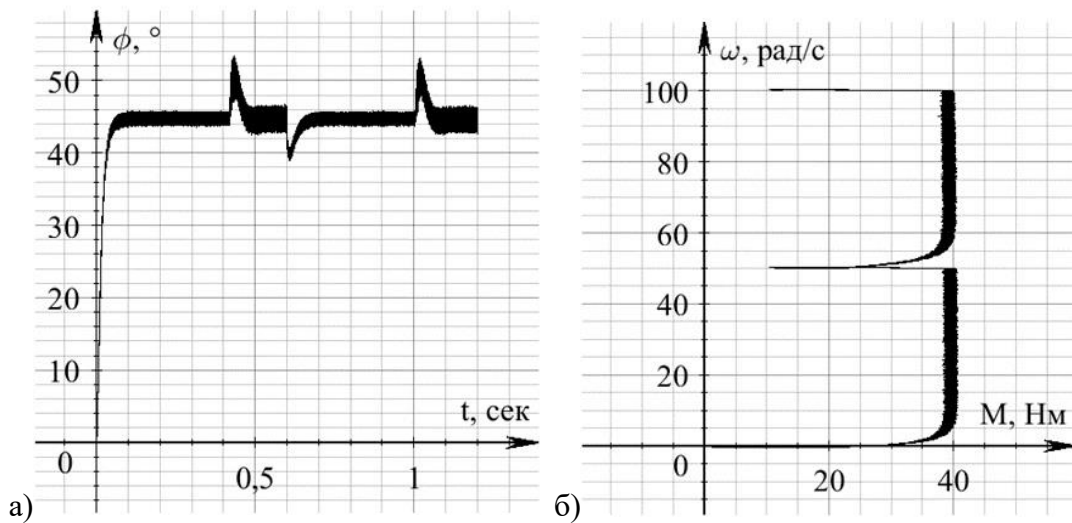


Рис. 4. Графики переходных процессов: а – угол φ_0 ; б – динамическая характеристика

Предлагаемый электропривод переменного тока имеет следующие преимущества, которые заключаются в минимизации тока статора, влияющего на заданный момент двигателя, за счет более простого и точного определения сигнала коррекции для задания момента двигателя. На рис. 5 приведены результаты двух систем с коррекцией (рис.5, а) и без коррекции (рис. 5, б). Анализ графиков позволяет сделать вывод, что предложенная коррекция обеспечивает минимальное соотношение переменных «ток статора / момент» и улучшает динамические характеристик на 7%.

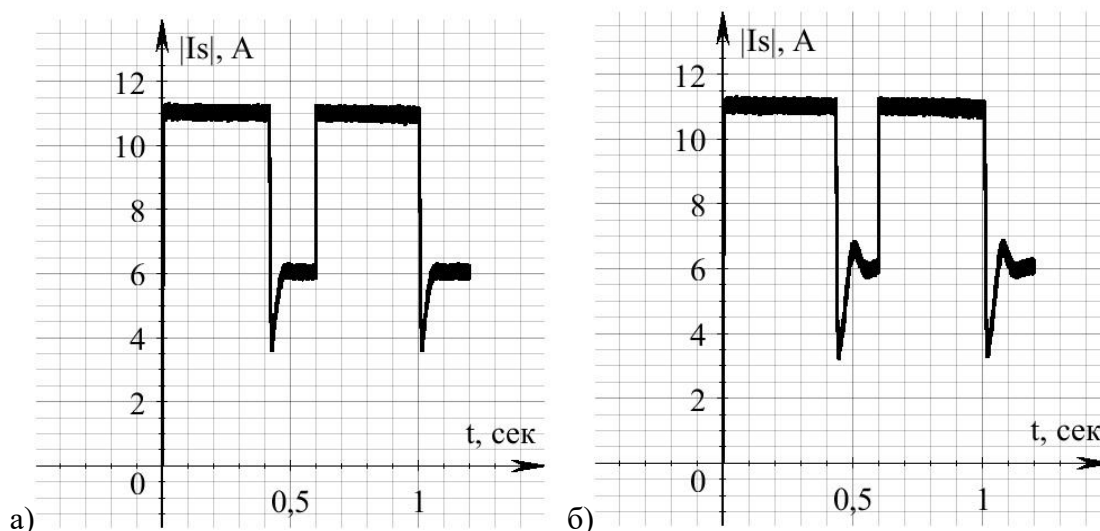


Рис. 5. Модуль тока статора: а) с коррекцией; б) без коррекции

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что разработанная система электропривода характеризуется высокими энергетическими показателями, простотой схемных решений и упрощенными алгоритмами, позволяющими использовать адаптивные регуляторы при построении системы управления на базе однокристалльной ЭВМ.

Библиографический список

1. **Мещеряков, В.Н.** Асинхронный электропривод с частотно-токовым управлением и системой коррекции сигналов задания амплитуды и частоты тока статора / В.Н. Мещеряков, А.А. Шпиганович, О.В. Мещерякова, В.В. Данилов // Вести вузов Черноземья. –2018. – № 1. – С. 21-26.
2. **Данилов, В.В.** Повышение эффективности работы систем частотного асинхронного электропривода транспортных механизмов. Дис. канд. техн. наук: 05.09.03. – Лип. гос. техн. университет, Липецк, 2019. – 182 с.
3. **Емельянов, А.П.** Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора / А.П. Емельянов, Б.А. Чуркин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». –2014. – № 3. – Т. 14. – С. 85–90.
4. Патент РФ №2132110. Способ оптимального векторного управления асинхронным электродвигателем и электропривод для осуществления этого способа / Мищенко В.А., Мищенко Н.И., Мищенко А.В. Опубл. 20.06.1999. Бюл. №6.
5. **Мещеряков, В.Н.** Оптимизация взаимного положения векторов тока статора и магнитного потока асинхронного двигателя при векторном управлении/ В.Н. Мещеряков, П.Н. Левин // Известия вузов «Электромеханика». – 2006. – № 1. – С. 25-27.
6. **Мещеряков, В.Н.,** Бойков, А.И., Мещерякова, О.В. Патент РФ № 2012157418/07, 26.12.2012. Электропривод переменного тока. Патент России № 2528612. 2012. Бюл. № 26
7. **Ion Boldea,** Ana Moldovan, Lucian Tutelea, «Scalar V/f and I-f control of AC motor drives: An overview», 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). Side. 2015. pp. 8-17.
8. **Juan Moreano Peña,** Edilberto Vásquez Díaz, «Implementation of V/f scalar control for speed

- regulation of a three-phase induction motor». ANDESCON. Arequipa. 2016. pp. 1-4.
9. **Копылов, И. П.** Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
 10. **Рудаков, В.В.** Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, – 1992. – 296 с.
 11. **Соколовский, Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
 12. **Burcu Keskin, İlyas Eminoğlu.** «Optimally Tuned PI Controller Design for V/f Control of Induction Motor», 2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). Ankara. 2022. pp. 1-6. doi: 10.1109/HORA55278.2022.9800005
 13. **Himanshu Swami, Amit Kumar Jain,** «An Improved Scalar Controlled Drive Based on Steady State Model of Vector Controlled Drive for Squirrel Cage Induction Motor», 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Kyoto. 2021. pp. 1-5. doi: 10.1109/ISIE45552.2021.9576415
 14. **Siddavatam Ravi, Prakash Reddy, Umanand Loganathan,** «Improving the Dynamic Response of Scalar Control of Induction Machine Drive Using Phase Angle Control». IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington. 2018. pp. 1-7. doi: 10.1109/IECON.2018.8591818
 15. **Dara Sandeep, Pendyala Srikanth, Balam Sai Praneeth, Joseph Peter, Sivaprasad Athikkal,** “Investigations on Space Vector based Bus Clamping PWM Strategies on Speed Control of Induction Motor Drive”, 2019 International Conference on Power Electronics Applications and Technology in Present Energy Scenario (PETPES). Mangalore. 2020. pp. 1-6. doi: 10.1109/PETPES47060.2019.9004015

V.N. Meshcheryakov, A.A. Myravyev, A.I. Boikov, F.A. Bozhenok

**IMPROVING THE ENERGY AND DYNAMIC PERFORMANCE
OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A PHASE ROTOR
BY APPLYING VECTOR CORRECTION OF THE CONTROL SIGNAL**

Lipetsk State Technical University

Abstract. The article considers a variant of solving the problem of improving the dynamic and energy characteristics of an asynchronous electric drive with frequency control by introducing software tools for correcting control signals based on the method of using observers of asynchronous motor variables. The use of an angle observer between the vectors of the stator current and the magnetization current in the control correction system of an asynchronous motor with a phase rotor makes it possible to calculate the angle between the vectors of the variables forming the moment, based on measurement data by simple sensors of harmonic signals of phase currents of the stator and rotor current. As part of the solution of the problem, a method of vector correction of the control signal is proposed to set the instantaneous values of the phase currents of the stator and the rotor current, which determines the optimal phase shift between the vectors of the magnetization current and the stator current.

Key words: asynchronous electric motor, electric drive, phase rotor, frequency converter, vector correction

References

- [1] Meshcheryakov, V.N. Asynchronous electric drive with frequency-current control and a system for correlating signals for setting the amplitude and frequency of the stator current / V.N. Meshcheryakov, A.A. Shpiganovich, O.V. Meshcheryakova, V.V. Danilov // Vesti vuzov Chernozemya, 2018. - No. 1. - pp. 21-26. - Text: direct. (in Russian)
- [2] Danilov V.V. Improving the efficiency of the systems of frequency asynchronous electric drive of transport mechanisms. Dis. Candidate of Technical Sciences: 05.09.03. - Lip. state. tech. University, Lipetsk, 2019 – 182 p. (in Russian)
- [3] Emelyanov, A.P. Scalar control of an asynchronous short-circuited motor by the active component of the stator current / A.P. Emelyanov, B.A. Churkin // Bulletin of SUSU. The series "Energy". No. 3, 2014, – vol. 14. - pp. 85-90. (in Russian)
- [4] RF Patent No. 2132110. The method of optimal vector control of an asynchronous electric motor and an electric drive for the implementation of this method / Mishchenko V.A., Mishchenko N.I., Mishchenko A.V. Publ. 20.06.1999. Byul. No. 6. (in Russian)
- [5] Meshcheryakov V.N. Optimization of the mutual position of the stator current vectors and the magnetic flux of an asynchronous motor with vector control / V.N. Meshcheryakov, P.N. Levin // Izvestiya vuzov "Electromechanika", 2006. - No. 1. - pp.25-27. - Text: direct. (in Russian)
- [6] RF Patent No. 2012157418/07, 12/26/2012. Meshcheryakov V.N., Boikov A.I., Meshcheryakova O.V. Alternating current electric drive //Russian Patent No. 2528612. 2012. Byul. No. 26 (in Russian)
- [7] Ion Boldea, Anna Moldovan, Lucian Tutelea, “Scalar V/f and I-f control of AC electric drives: an overview”, 2015 International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics (ACEMP), 2015 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) and 2015 International Symposium on Advanced electromechanical displacement systems (ELECTROMOTION). Side. 2015. pp. 8-17.

-
- [8] Juan Moreano Peña, Edilberto Vasquez Diaz, "Implementation of V/f scalar control for speed control of a three-phase asynchronous motor". AND ESCON. Arequipa. 2016. pp. 1-4.
- [9] Kopylov, I. P. Mathematical modeling of electric machines: textbook for universities. 3rd ed., reprint. and additional / I. P. Kopylov. – M.: Higher School, 2001. – 327 p. (in Russian)
- [10] Rudakov, V.V. Asynchronous electric drives with vector control / V.V. Rudakov, I.M. Stolyarov, V.A. Dartau. - Leningrad: Energoatomizdat, - 1992. - 296 p. (in Russian)
- [11] Sokolovsky, G.G. Methods of temporary regulation / G.G. Sokolovsky. - Moscow: Academy, 2006. – 272 p. (in Russian)
- [12] Burku Keskin, Ilyas Eminoglu, "Optimally tuned design of a PI controller for V/f asynchronous motor control", International Congress 2022 on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). Ankara. 2022. pp. 1-6. doi: 10.1109/HORA55278.2022.9800005
- [13] Himanshu Swami, Amit Kumar Jain, "Advanced scalar-controlled drive based on a stationary vector-controlled drive model for a closed-loop asynchronous motor", 30th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) 2021. Kyoto. 2021. pp. 1-5. doi: 10.1109/ISIE45552.2021.9576415
- [14] Siddavatam Ravi Prakash Reddy, Umanand Loganathan, "Improving the dynamic response of scalar asynchronous machine drive control using phase control", IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington. 2018. pp. 1-7. doi: 10.1109/IECON.2018.8591818
- [15] Dara Sandeep, Pendyala Srikanth, Balam Sai Pranith, Joseph Peter, Sivaprasad Athikkal, "Studies of PWM speed control strategies for asynchronous electric drive based on spatial vectors", 2019 International Conference on Power Electronics Applications and Technologies in the Modern Energy Scenario (PETPES). Mangalore. 2020. pp. 1-6. doi: 10.1109/PETPES47060.2019.9004015

**В.Н. Мещеряков¹, Д.И. Шишлин¹, Н.П. Улитин²,
Е.К. Воскобойников¹**

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА НЕФТЕПЕРЕГОННОЙ СТАНЦИИ

Липецкий государственный технический университет¹
МРУ АО «Транснефть-Дружба»²

Аннотация. В статье представлены и проанализированы результаты исследований по оценке уровня энергоэффективности процессов при многоконтурном способе регулирования давления на магистральном нефтепроводе нефтеперегонной станции путем имитационного моделирования ее работы в среде Matlab; приведена функциональная структура многоконтурного регулирования давления в магистральном нефтепродуктопроводе.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, магистральные центробежные насосы, нефтеперегонная станция, частотно-регулируемый электропривод, система автоматического регулирования давления, имитационное моделирование, энергоэффективность.

В настоящее время крупные предприятия России, имеющие отношение к топливно-энергетическому комплексу, внедряют методические рекомендации по совершенствованию методов сбережения энергоресурсов [1], [2]. Ведущим направлением считается внедрение и развитие частотно-регулируемых электроприводов (ЧРЭП) [3], [4]. Высокие показатели снижения электропотребления при их использовании достигаются в механизмах с вентиляторной нагрузкой, приводимых во вращение высоковольтными электродвигателями большой мощности. Характерным примером таких механизмов являются центробежные магистральные насосы, чья механическая характеристика описывается уравнением квадратичной параболы, а затрачиваемая мощность пропорциональна кубу скорости вращения. Данные механизмы при незначительном уменьшении скорости вращения могут принести ощутимое уменьшение затрачиваемой мощности. Из-за этого в последнее время много внимания уделяется разработке высоковольтных ЧРЭП магистральных центробежных насосов на нефтеперегонных станциях (НПС).

В ходе транспортировки нефти и нефтепродуктов по системе магистральных трубопроводов актуальной проблемой является увеличение энергоэффективности за счет реализации мероприятий по оптимизации энергетических ресурсов.

Значительную часть затрат при перекачке жидкостей составляет собой энергопотребление магистральными агрегатными насосами. Регулирование давления в магистральных трубопроводах при транспортировке нефти и нефтепродуктов является одним из приоритетных направлений. В то же время используемые системы автоматизированного управления и контроля над режимами работы магистральных

трубопроводов (системы автоматизированного регулирования давления) [5] не в полной мере принимают во внимание варьирование различных факторов, возникающих при эксплуатации.

Потребность в регулировании режимов работы нефтеперекачивающих станций магистрального нефтепровода вызвана необходимостью изменения объемов перекачки и предотвращения устранения явления кавитации, а также потребностью в снижении или изменении давления в системе и оптимизации работы системы по минимизации затрат на перекачку.

В ходе проведенного исследования было установлено, что до 96 % потерь в системе при неравномерности транспортировки нефти и нефтепродуктов в трубопроводном транспорте приходится на потери в электродвигателях насосов, вызванные преобразованием механической энергии в гидравлическую энергию, и только 4% потерь приходится на собственные нужды и преодоление гидравлического сопротивления нефтепровода. Актуальной задачей при транспортировке нефти в трубопроводе является эффективное и рациональное использования электроэнергии, которое составляет до 35% себестоимости транспортировки нефтепродуктов.

Регулирование скорости вращения двигателя электропривода насоса с преобразователем частоты (ПЧ), запитанного от источника переменного тока, является наиболее современный способ управления работой магистрального трубопровода. Его эффективность в сравнении с остальными способами увеличивается с расширением диапазона изменения режимов работы насосной станции. Для привода насоса используются преимущественно синхронные и асинхронные двигатели. Экономический эффект от использования регулируемых электроприводов заключается в уменьшении потребляемой мощности электродвигателей и максимально возможной передаче давления от станции до станции, приводит к снижению затрат на потребление электроэнергии с исключением дросселирования.

Достоинствами частотно регулируемых электроприводов являются:

- плавный пуск, который снижает значение пускового тока двигателя, что приводит к уменьшению нагрузки на электрическую сеть и пускорегулирующую аппаратуру [6], а также исключает импульсную нагрузку на трубную обвязку насоса и снижает износ насоса;
- плавное регулирование скорости вращения роторов насосов на станциях магистральных трубопроводов позволяет применять самые экономичные режимы перекачки;
- возможность наиболее точной синхронизации работы НПС;
- возможность подхвата вращающегося электродвигателя после обрыва питания;
- снижение затрат электроэнергии в случае непостоянной нагрузки (работа электродвигателя с неполной нагрузкой).

При затратах электроэнергии центробежным насосам, которая пропорциональна скорости вращения в кубе, вероятное уменьшение скорости вращения насоса даже на 1 %, может снизить потребление электроэнергии станции на транспортировку нефтепродукта в среднем на 2,7 %.

В состав системы ЧРЭП, включая многоконтурную систему автоматического регулирования давления (САРД) нефти в магистральном нефтепроводе, входят электродвигатели регулирующих клапанов и насосов, преобразователи частоты, программируемый логический контроллер (ПЛК), на котором реализуется система управления, насосы, регулирующие клапаны, датчики давления, положения, скорости.

Функциональная схема многоконтурного регулирования давления в магистральном нефтепродуктопроводе изображена на рис. 1.

Первичная информация о технологических параметрах, параметрах состояния оборудования САРД, поступает на модули ввода аналоговых или дискретных сигналов контроллера САРД.

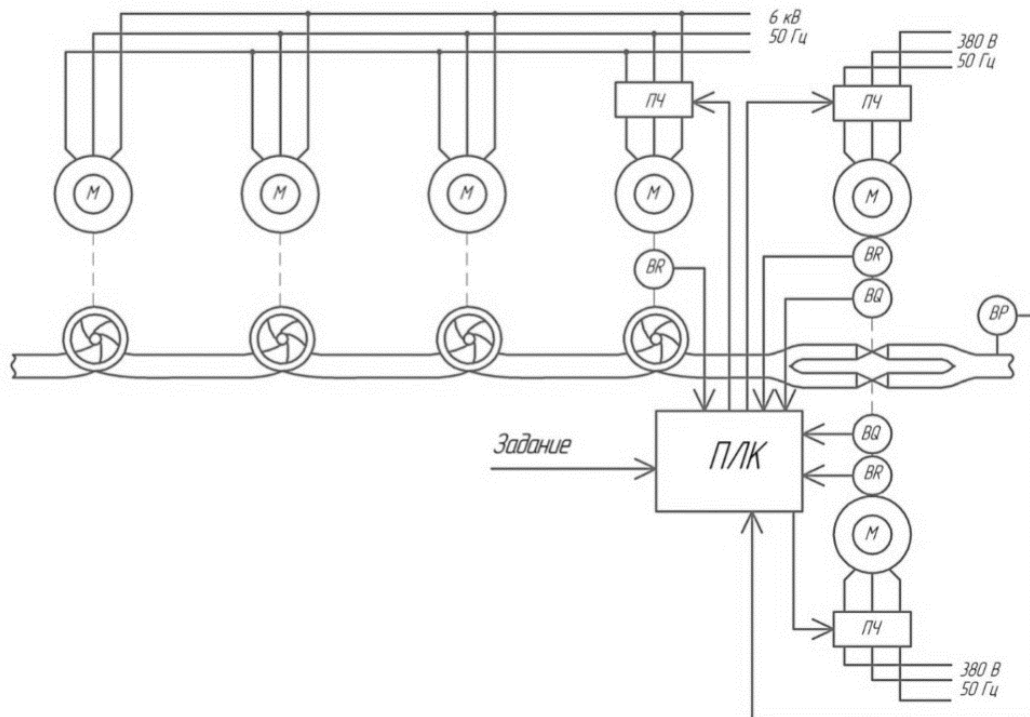


Рис. 1. Функциональная схема многоконтурного регулирования давления в магистральном нефтепродуктопроводе

Встроенными датчиками скорости и положения оснащены электродвигатели регулирующих клапанов, с помощью которых контролируются положение выходного вала (датчики *BQ*) и текущая скорость электродвигателя. Частотно регулируемый электродвигатель агрегатного насоса снабжен встроенным датчиком скорости *BR*. На выходе технологического трубопровода НПС установлен датчик давления *BP*. На модуль ПЛК поступает вся снятая с датчиков информация. После обработки этой информации ПЛК формирует требуемое напряжение и частоту полученные с преобразователей частоты, для приводов клапанов и насоса с целью поддержания фиксированного выходного давления.

Для исследования эффективности процессов регулирования давления на НПС была разработана модель многоконтурного регулирования давления в магистральном нефтепродуктопроводе с помощью программного комплекса Matlab.

Для разработки модели трубопроводной сети использовалась встроенная библиотека Matlab SimHydraulics [7].

Модели электроприводов клинового клапана и модель центробежного насоса вместе с преобразователями частоты (ПЧ), работающим соответственно по законам $U/f=const$, и $U/f^2=const$, составлены в стандартных блоках пакета Matlab Simulink [8], [9].

Для оценки эффективности способа многоконтурного регулирования давления в магистральном нефтепроводе были проведены следующие эксперименты:

- моделирование регулирования давления только клапанами;
- моделирование регулирования давления только насосом;
- моделирование регулирования давления клапанами и насосом одновременно.

Для достоверности полученных данных время моделирования, начальные условия, время и величина возмущений для всех трех опытов будут одинаковы.

По результатам моделирования оценивались параметры качества регулирования и энергоэффективность каждого из способов. В соответствии с имеющимися данными [10] для систем регулирования давления на НПС погрешность поддержания давления в установившемся режиме не должна превышать ± 0.4 кг/см², а максимальное отклонение давления в переходных режимах не должно быть больше 4% от заданного.

По результатам проведенного моделирования составлена табл. 1, по которой можно оценить уровень энергоэффективности каждого способа регулирования; в табл. 2 указаны их достоинства и недостатки.

Таблица 1

Результаты моделирования для оценки эффективности способа многоконтурного регулирования давления

| ПАРАМЕТРЫ | Регулирование давления только клапанами | Регулирование давления только насосом | Одновременное регулирование давления клапанами и насосом |
|--|---|---------------------------------------|--|
| Потребление энергии электродвигателем насоса, кВт·ч | 158 | 127,5 | 131,2 |
| Потребление энергии электродвигателем регулирующих клапанов, кВт·ч | 0,6627 | - | 0,6719 |
| Время переходного процесса при задании давления на выходе, с | 9.3 | 20 | 8.6 |
| Время переходного процесса при снижении входного давления, с | 2,7 | 40 | 37 |
| Максимальное отклонение входного давления от задания, кг/см ² | 0,051 | 2,06 | 1,45 |

Из результатов имитационного моделирования следует, что рассмотренные способы регулирования за исключением регулирования давления только за

счет клапанов, выполняют требования по качеству регулирования: метод регулирования скорости вращения ротора насоса является самым энергоэффективным, но обладает наименьшим быстродействием; метод многоконтурного регулирования является самым быстродействующим и показывает приемлемые показатели энергоэффективности.

Таблица 2

Сравнение способов многоконтурного регулирования давления

| СРАВНЕНИЕ | Регулирование давления только клапанами | Регулирование давления только насосом | Одновременное регулирование давления клапанами и насосом |
|-------------|---|---|--|
| ДОСТОИНСТВА | хорошая точность регулирования и быстродействия | наилучшая энергоэффективность (насос, +2,8% от норматива) | достаточное быстродействие, норматив энергоэффективности |
| НЕДОСТАТКИ | самая низкая энергоэффективность (насос, -20,4% от норматива) | затянутый переходный процесс | - |

Итоги проведенного исследования можно применять при проектировании или реконструкции НПС для достижения наиболее точных показателей регулирования, уменьшения износа оборудования и увеличения энергоэффективности.

Библиографический список

1. **Богданов, Р.М.** Методика расчета структуры потребления электроэнергии в трубопроводном транспорте нефти / Р.М. Богданов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал, 2012. №1. Стр. 58-68. [Электронный ресурс]. URL: http://ogbus.ru/authors/Bogdanov/Bogdanov_2.pdf (дата обращения 03.06.2023).
2. **Самоленков, С.В.** Обоснование энергосберегающих режимов работы нефтеперекачивающих центробежных насосов с регулируемым приводом: автореф. дис. канд. техн. наук, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – СПб., 2014. – 20 с.
3. **Русов, Е.В.,** Кудояров, Г.Щ., Лупенских, В.Е. и др. Об экономической эффективности применения регулируемых электроприводов насосов на НПС магистральных нефтепроводов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1976. – № 11. – С. 32-35.
4. **Браславский, И.Я.,** Ишматов, З.Ш., Поляков, В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
5. Методика настройки систем автоматического регулирования давления на объектах ОСТ. – М.: ОАО «АК «Транснефть», 2014. – 47 с.
6. **Мещеряков, В.Н.** Исследование способов снижения пускового тока при запуске высоковольтных двигателей / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова, А.В. Синюков, О.В. Крюков, Д.И. Шишлин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21. – № 2. С. 94-104.
7. **Агафонов, Е.Д.** Об особенностях использования системы Matlab/SimHydraulics в задаче построения моделей магистральных нефтепроводов / Е.Д. Агафонов, Ю.Н. Безбородов, А.Г. Миронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 3. – С.76-81.

-
8. **Герман-Галкин, С.Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. – СПб: КОРОНА, 2001. – 132 с.
 9. **Фурсов, В.Б.** Моделирование электропривода: учебное пособие. – М.: «Лань», 2022. – 220 с.
 10. Технические параметры насоса [Электронный ресурс].
URL:http://www.hms.ru/pumps_catalog/detail.php?ELEMENT_ID=4983, свободный.

V.N. Meshcheryakov¹, D.I. Shishlin¹, N.P. Ulitin²,
E.K. Voskoboinikov¹

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF METHODS PRESSURE CONTROL AT AN OIL REFINERY STATIONS

Lipetsk State Technical University Lipetsk, Russia¹
MRU JSC «Transneft-Druzhba»²

Abstract. The article presents and analyzes the results of studies on assessing the level of energy efficiency of processes with a multi-circuit method of regulating pressure on the main oil pipeline of an oil refinery by simulating its operation in the Matlab environment; the functional structure of multi-circuit pressure regulation in the main oil product pipeline is given.

Key words: main oil pipeline, main centrifugal pumps, oil refinery, frequency-controlled electric drive, automatic pressure control system, simulation modeling, energy efficiency.

References:

- [1] R.M.Bogdanov, “Methodology for calculating the structure of electricity consumption in oil pipeline transportation”, *Oil and gas business: electronic scientific journal*, 2012. no. 1. pp. 58-68. [Abstract]. Available at: http://ogbus.ru/authors/Bogdanov/Bogdanov_2.pdf
- [2] S.V. Samolenkov, “*Obosnovaniye energosberegayushchikh rezhimov raboty neftepere-kachiv-ayushchikh tsentrobezhnykh nasosov s reguliruyemym privodom*” [Substantiation of energy-saving modes of operation of oil-pumping centrifugal pumps with an adjustable drive] Cand. of Tech. S. thesis, National Mineral Resources University "Gorny", St. Petersburg, Russia, 2014 (in Russian).
- [3] E.V.Rusov, G.Shch.Kudoyarov and V.E.Lupenskikh, “On the economic efficiency of the use of adjustable electric drives of pumps at the PS of main oil pipelines”, *Transport and storage of oil and oil products*. 1976. no. 11. pp. 32-35.
- [4] I.Ya. Braslavsky, Z.S. Ishmatov and V.N. Polyakov, “Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod [Energy-saving asynchronous electric drive]”. Moscow: Academy, 2004 (in Russian).
- [5] Methodology for setting up automatic pressure control systems at OST facilities. Moscow: JSC «AK Transneft», 2014. - 47 p.
- [6] V.N. Meshcheryakov, T.V. Sinyukova, A.V. Sinyukov, O.V. Kryukov and D.I. Shishlin, “Investigation of ways to reduce the starting current when starting high-voltage motors”, *Bulletin of Yuzhno-Ural State University*. Series: Energy. 2021. vol.21. no.2. pp. 94-104.
- [7] E.D.Agafonov, Yu.N. Bezbodov and A.G.Mironov. On the peculiarities of using the Matlab/SimHydraulics system in the problem of building models of main oil pipelines, *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014, no. 3, pp. 76-81. [E-book]. Available at: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=articles&id=2671>.
- [8] S.G. Herman-Galkin, “Komp'yuternoye modelirovaniye poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0: uchebnoye posobiye [Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0: textbook]”. St. Petersburg: KORONA, 2001(in Russian).
- [9] V.B. Fursov, “Modelirovaniye elektroprivoda: uchebnoye posobiye [Modeling of an electric drive: a textbook]”. Moscow: Publishing house «Lan», 2022 (in Russian).
- [10] Technical parameters of the pump [Electronic resource]. – Access mode:http://www.hms.ru/pumps_catalog/detail.php?ELEMENT_ID=4983, free.

С.В. Попов

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИЛОВОЙ ЧАСТИ ПАРОКОНВЕКТОМАТА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НА ПИТАЮЩУЮ СЕТЬ

Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье рассмотрена разработанная автором система управления нагрузкой (трубчатые электронагреватели) мощностью несколько десятков киловатт, работающей в повторно-кратковременном режиме. Приведена структурная схема системы управления. Показаны осциллограммы переходных процессов работы автономного генератора.

Ключевые слова: пароконвектомат, трубчатые электронагреватели, газопоршневая установка.

Среди большого многообразия электроприемников находят применение потребители, работающие в повторно-кратковременном режиме. В силу того, что мощность таких устройств довольно значительна (до нескольких десятков кВт) их работа может оказывать влияние на параметры питающей сети. При электроснабжении от промышленной сети частота питающего напряжения будет постоянной, а величина снижения напряжения при подключении нагрузки будет зависеть от жесткости внешней характеристики понизительного трансформатора. Поскольку понизительный трансформатор Т, как и сама трансформаторная подстанция, не всегда установлены в непосредственной близости от потребителей электроэнергии (см. рис. 1, а) на величину снижения напряжения будет влиять падение напряжения ΔU на сопротивлении питающего кабеля (см. рис. 1, б) [1,2].

Существуют объекты, получающие электрическую энергию низкого напряжения по кабелю, имеющему длину до нескольких километров. Этот факт приводит к существенным колебаниям напряжения, в течение суток при изменении электрической нагрузки от минимального до максимальных значений. Исследования параметров электрической сети объекта показали, что диапазон изменения напряжения за сутки может иметь более 80 В. Кроме того, в виду особенностей работы электрических потребителей, когда за номинальное напряжение принимаются либо 380 В, либо 415 В, значительное изменение напряжения негативно сказывается на их работе [3]. В основном это связано с уменьшением моментов электродвигателей, входящих в состав потребителей, которые могут перейти в режим перегрузки, и в последствии отключиться системой защиты. Исходя из теории, момент электродвигателя пропорционален квадрату напряжения ($M \propto U^2$), поэтому, например, при падении напряжения на 10 % момент снизится на 19 % и т.д. [4].

На рис. 2 показаны естественная (кривая 1 и 4) и искусственные механические характеристики электродвигателей при разных значениях питающего

напряжения. Если напряжение сети без нагрузки составляет 420 В, то при максимальной нагрузке напряжение будет составлять 340 В, при этом механическая характеристика будет иметь вид кривой 2.

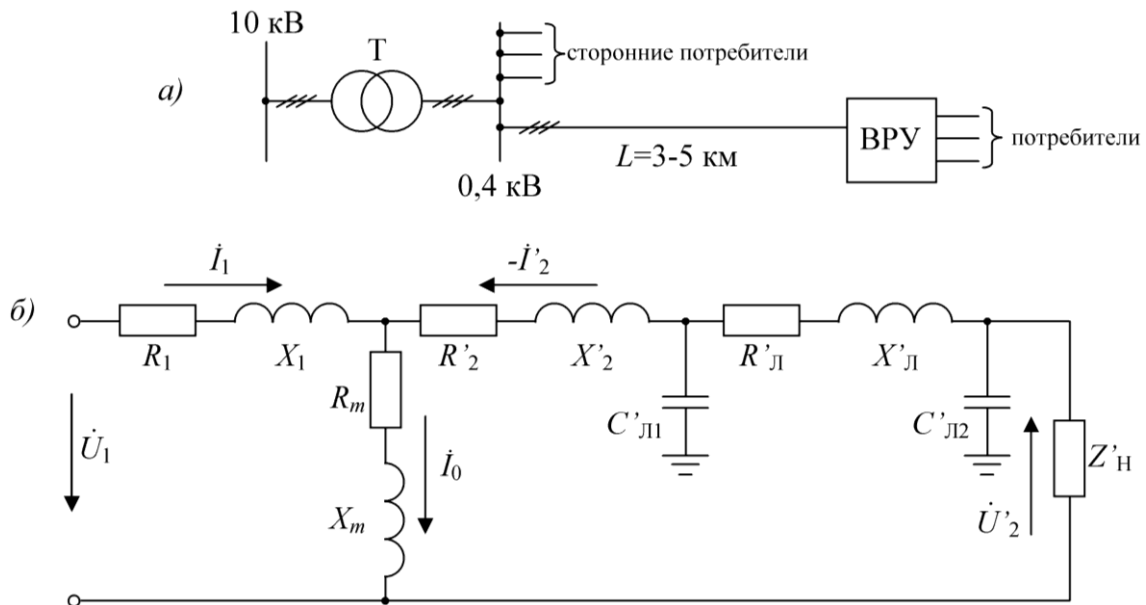


Рис. 1. Схемы: а) электроснабжения объекта, б) замещения одной фазы системы электроснабжения

Эта характеристика является граничной, поскольку пусковой момент двигателя равен моменту сопротивления при номинальной нагрузке. При запуске нагрузки значительной мощности возникают переходные процессы, которые вызывают снижение напряжения в большей степени, чем в установившихся режимах. Если снижение напряжения в переходных режимах достигнет 30 % от номинального значения, то механическая характеристика будет иметь вид кривой 3. В этом случае электродвигатель остановится, поскольку момент нагрузки будет выше значения критического момента электродвигателя. Если же рассмотреть идентичные процессы относительно характеристики 4 – для электродвигателя с номинальным напряжением 415 В, граничной характеристикой может являться кривая 5, а снижение напряжения будет составлять 15 % относительно номинального напряжения 380 В.

Одним из распространенных вариантов решения проблемы качества электроснабжения является установка на объекте автономного дизель-генераторного агрегата либо генератора с газопоршневым двигателем [5, 6]. Исследования параметров электроэнергии при запуске и работе тех же нагрузок показали, что снижения напряжения имеют меньшие значения, чем при их работе от сети.

Однако, кроме снижения напряжения происходит снижение частоты, хотя и кратковременно. Исследования действия нагрузки – пароконвектомата (ПК), работающего в повторно-кратковременном режиме, показали существенное влияние на работу газопоршневой установки (ГПУ). Самое сильное воздействие на работу ГПУ возникает при совпадении моментов времени включения пароконвектомата и электродвигателя (насоса, лифта и т.п.).

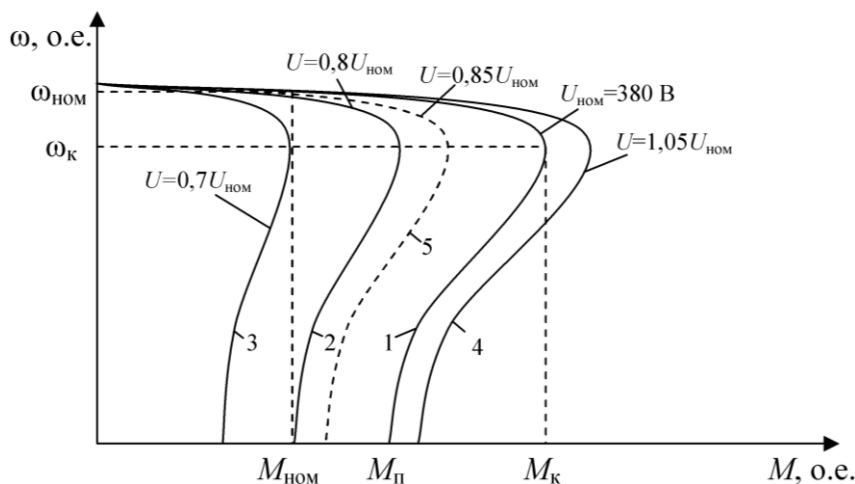


Рис. 2. Механические характеристики электродвигателя

На рис. 3 показаны диаграммы электрических параметров при работе пароконвектомата от ГПУ.

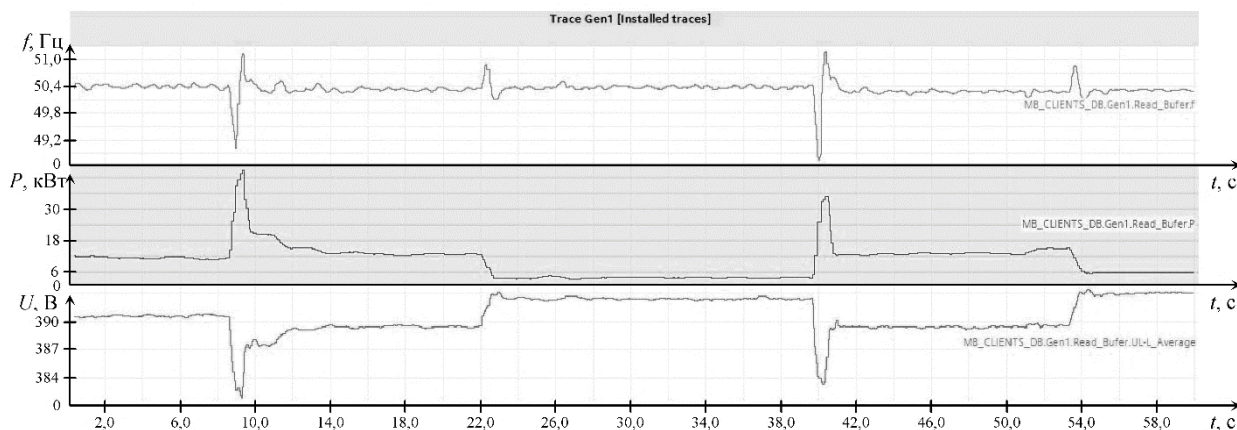


Рис. 3. Диаграммы переходных процессов электрических параметров автономного генератора

Из диаграммы следует, что при подключении ПК к заранее нагруженному мощностью 12 кВт генератору возникает скачок мощности P до 45 кВт. При этом напряжение U снизилось на 2,3 %, а частота f на 2,8 %. По истечении 3 с происходит отключение основной части нагрузки, а после 12 с отключается оставшая нагрузка. Периодичность процесса составляет 30 с в пределах 1,5-2 часов. В течение дня ПК может использоваться несколько раз, а каждое включение нагрузки сопровождается переходным процессом, который устанавливается в течение некоторого времени. Рассмотренный вид нагрузки, учитывая его алгоритм работы, неблагоприятно оказывает влияние на работу ГПУ и систему регулирования частоты вращения двигателя. Кроме того, эта нагрузка оказывает влияние на сеть электропитания, а значит, может оказать негативное влияние на работу других электропотребителей.

С целью снижения влияния ПК на электрическую сеть необходимо выполнить плавное или ступенчатое подключение нагрузки. Основной электрической

нагрузкой пароконвектомата являются трубчатые электронагреватели (ТЭН), которые в зависимости от алгоритма работы могут подключаться одновременно несколькими группами. Для реализации плавного подключения нагрузки (ТЭН) возможно применение тиристорных регуляторов напряжения – устройства плавного пуска (УПП). Однако, при работе УПП в сеть генерируются высшие гармонические составляющие, влияющие на форму напряжения. Учитывая периодичность включения ТЭН от УПП, искажения напряжения будут возникать в течение всего времени работы ПК, что крайне нежелательно.

Другим вариантом включения нагрузки является последовательное подключение части нагрузки. На рис. 4 приведена структурная схема системы управления ТЭН. После включения ПК и выбора программы управления штатный контроллер *CPU* запускает алгоритм работы устройств. Сформированный сигнал управления U_y включения ТЭН поступает в вновь установленное интеллектуальное реле ИР, которое выполняет программу последовательного подключения нагревательных элементов ЕН по фазам. При формировании контроллером сигнала на выключение ТЭН реле ИР выполняет последовательное отключение ЕН с постоянной выдержкой времени.

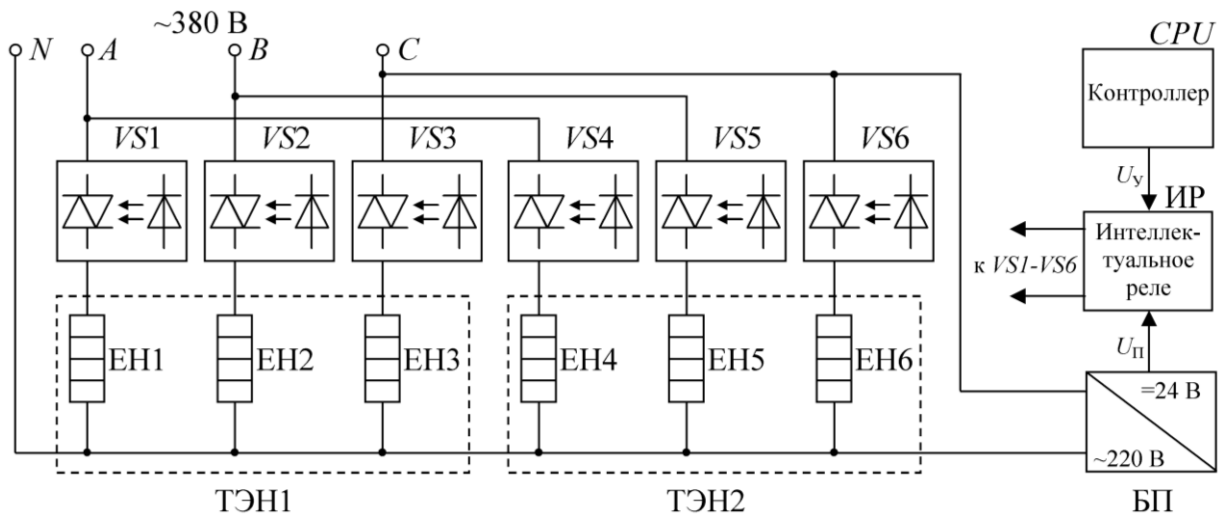


Рис. 4. Структурная схема системы управления ТЭН

Указанная система управления была реализована на базе пароконвектомата мощностью 30 кВт, установленного на объекте при его ежедневном использовании. В качестве силовых ключей использованы твердотельные реле *VS1-VS6*, которые обеспечивают оптоэлектронную гальваническую развязку сигналов управления, поступающих от ИР. Также в ПК дополнительно были установлены блок питания БП и элементы защиты электрических цепей. Следует отметить, что изменение алгоритма управления ТЭН не повлияло на работу устройства, а контроллер управления процессами успешно выполняет заложенную программу.

На рисунках далее показан состав ПК - до модернизации рис. 5, а и рис. 6, а, а также после модернизации рис. 5, б и рис. 6, б. Твердотельные реле установлены на радиаторы для охлаждения. Для защиты силовых цепей использованы

предохранители-разъединители, а цепей управления - автоматический выключатель. Монтаж силовых цепей выполнен термостойким проводом типа РКГМ.

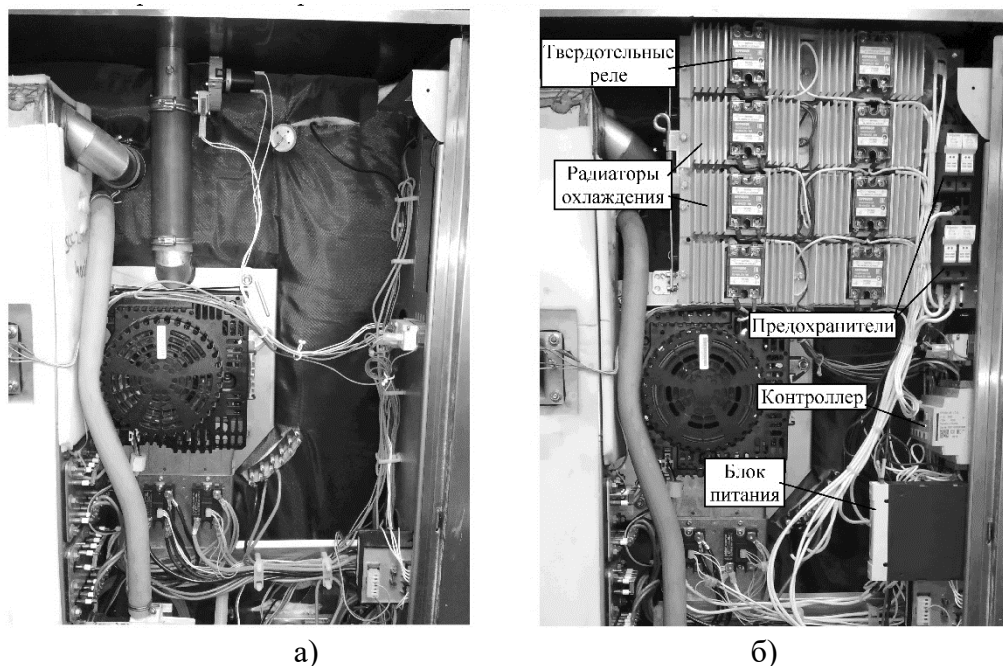


Рис. 5. Внешний вид оборудования ПК: а) до модернизации; б) после

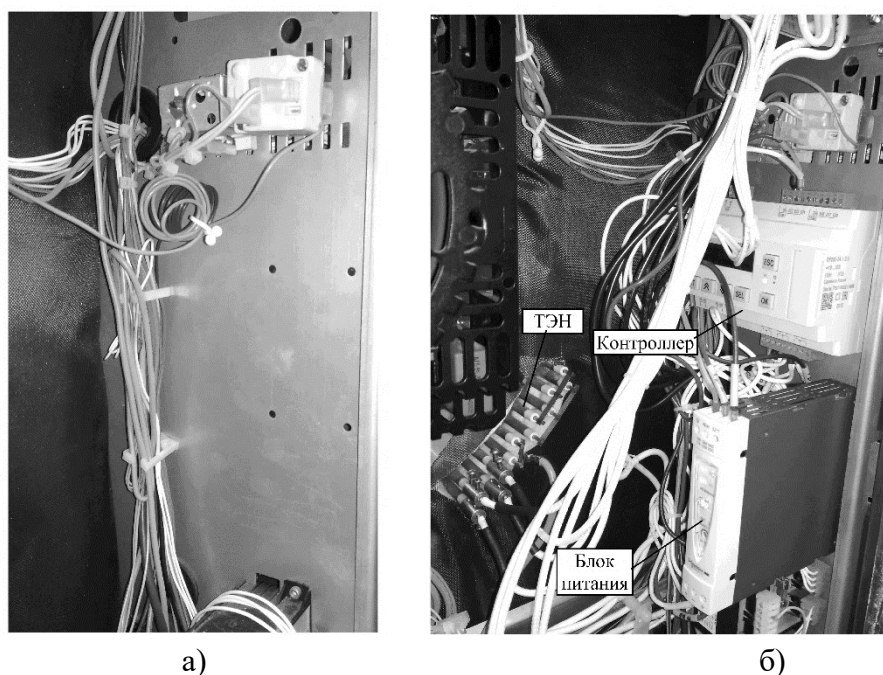


Рис. 6. Внешний вид оборудования ПК (боковая панель): а) до модернизации; б) после

В ходе испытаний системы управления были получены осциллограммы переходных процессов (см. рис. 7) автономного генератора, в результате оценки которых было определено, что ступенчатый наброс нагрузки оказывает мини-

мальное воздействие на работу ГПУ – снижение частоты f на 0,18 %, а напряжения U на 0,15 %. В ходе испытаний время выдержки формирования сигналов управления VS было скорректировано до 1 с.

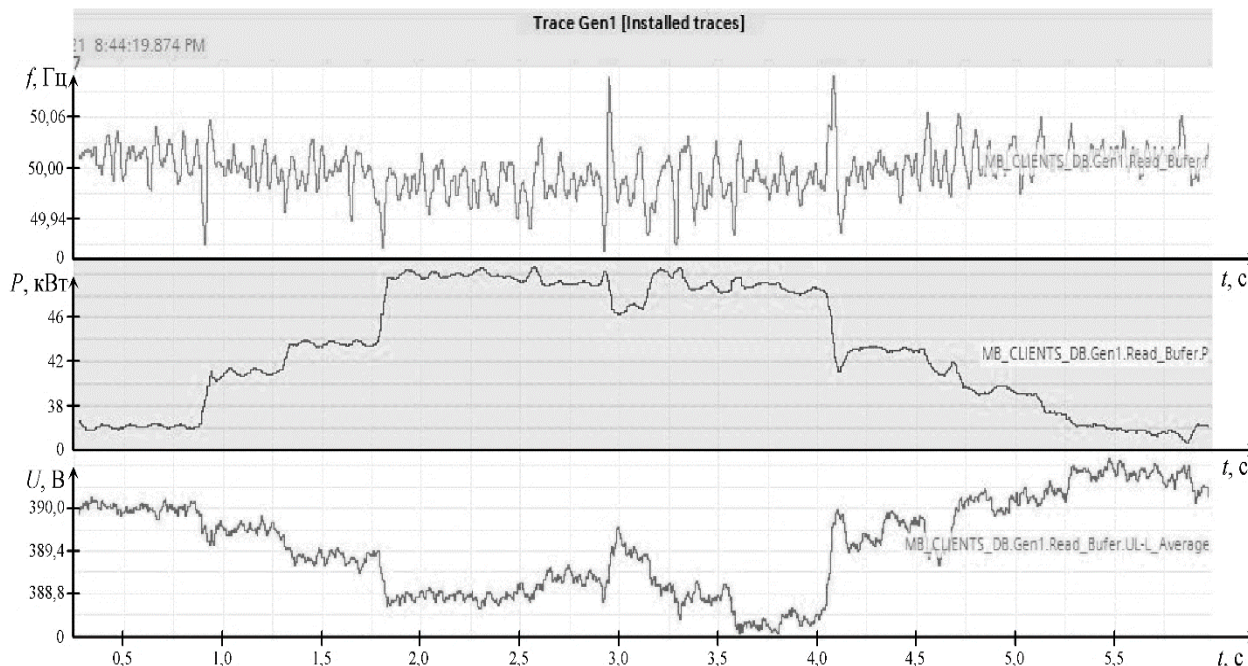


Рис. 7. Диаграммы переходных процессов электрических параметров автономного генератора

Предложенная система управления была реализована и используется в течение продолжительного времени. Периодический контроль качества электроэнергии показал эффективность рассмотренного варианта управления для включения нагрузки, работающей в повторно-кратковременном режиме. Полученный опыт реализации системы управления может быть использован и на других устройствах, где возможно разделение нагрузки. Предложенная система управления подтверждает свою эффективность при использовании в устройствах, получающих электроэнергию от автономных источников, и, особенно, в случаях соизмеримой мощности источника и приемника.

Библиографический список

1. **Попов, С.В.**, Бурда, Е.М. Обеспечение нагрузки электрической мощностью в условиях ограниченной мощности сети / Материалы НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики». – Н.Новгород: НГТУ, 2015. С. 8-11.
2. **Попов, С.В.**, Бурда Е.М. Вопросы эффективного расхода энергоресурсов в теплоэнергетических системах малой мощности / Труды 17-го международного научно-методического форума «Великие реки». – Н. Новгород: ВГУВТ, 2015. С. 285-287.
3. **Попов С.В.**, Бурда Е.М. Работа автономной электростанции параллельно с сетью в условиях низкого качества напряжения сети. Вестник ВГУВТ. – 2015. – Выпуск 44. – С. 327-329.
4. **Кацман, М.М.** Электрические машины. – М.: Академия, 2017. – 496 с.
5. **Попов, С.В.**, Бишлетов, А.В., Гуляев, В.В., Храмов, М.Ю. Особенность работы автономной электростанции параллельно с сетью / Материалы VII Международной научно-практической конференции (Астрахань, 11-12 декабря 2018 г.) – Астрахань, 2018. – С. 106-110.

-
6. **Попов, С.В.**, Бишлетов, А.В., Бурмакин, О.А., Гуляев, В.Н. Особенности работы автоматизированной системы управления автономной электростанции // Интеллектуальная электротехника. – 2019. – № 2. – С. 53-60.

S.V. Popov

MODERNIZATION OF THE POWER PART OF THE STEAM CONVECTOR TO REDUCE THE IMPACT ON THE SUPPLY NETWORK

Volga state University of water transport

Abstract. The article discusses the load control system developed by the author (tubular electric heaters) with a capacity of several tens of kilowatts, operating in a re-short-term mode. A block diagram of the control system is given. Waveforms of transient processes of an autonomous generator are shown.

Key words: steam convector, tubular electric heaters, gas piston installation.

References

- [1] S.V. Popov, E.M. Burda, “Obespechenie nagruzki elektricheskoy mosh'nostyu v usloviyah ogranichennoy mosh'nosty seti” [Providing the load with electric power in conditions of limited network power], in Actual problems of electric power industry, NGTU, Nizhniy Novgorod, 2015, pp. 8-11.
- [2] S.V. Popov, E.M. Burda, “Voprosy effektivnogo rashoda energoresursov v teploenergeticheskikh sistemah maloy mosh'nosty” [Issues of efficient consumption of energy resources in low-power thermal power systems], Materials XVII NTK “Velikie reki” [Great Rivers]. Nizhniy Novgorod, pp. 285-287, 2015 (in Russian).
- [3] S.V. Popov, E.M. Burda, “Rabota avtonomnoy electrostancii paralel'no s setyu v usloviyah nizkogo kachestva napryazheniya seti” [Operation of an autonomous power plant in parallel with the grid in conditions of low voltage quality], Vestnik VGUVT [Herald VGUVT]. Release 44. Nizhniy Novgorod, pp. 327-329, 2015 (in Russian).
- [4] M.M. Kacman, “Electricheknie mashiny” [Electric machines], Moscow: Akademiya, 2017, 496 p. (in Russian).
- [5] S.V. Popov, A.V. Bishletov, V.V. Gulyaev, M.U. Hramov, “Osobennost' raboty avtonomnoy electrostancii paralel'no s setyu” [The peculiarity of the operation of an autonomous power plant in parallel with the network], Materials XVII NTK, December 11-12, 2018, Astrahan', Russia, pp. 106-110 (in Russian).
- [6] S.V. Popov, A.V. Bishletov, O.A. Burvakin, V.N. Gulyaev, “Osobennost' raboty avtomatizirovannoy systemy upravleniya avtonomnoy electrostancii” [Features of the automated control system of an autonomous power plant], Smart Electrical Engineering, no. 2, pp. 53-60, 2019.

УДК 621.867.2-83

DOI: 10.46960/apeen_2023_119

Е.С. Ребенков, Н.Д. Майорова**РЕГУЛЯТОР ДЕМПФИРОВАНИЯ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ
В ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

Новомосковский институт (филиал)
Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева

Аннотация. Разработан регулятор демпфирования колебаний деформаций упругого тягового органа в частотном электроприводе шахтного конвейера. Параметры регулятора получены с применением формулы передаточной функции для деформаций многомассового электропривода. Приведены переходные функции скоростей масс и деформаций упругих звеньев в электроприводе конвейера без регулятора и с регулятором демпфирования колебаний.

Ключевые слова: регулятор демпфирования колебаний, многомассовый частотный электропривод, деформации упругих звеньев, переходные процессы деформаций.

Практически все реальные электроприводы механизмов являются электро-механическими системами, содержащими несколько движущихся масс, соединенных упруго-вязкими механическими связями. Уравнения движения приведенных механических звеньев таких систем определяют полную нагрузку электроприводов, включающую статическую и динамическую составляющие. Динамические нагрузки в элементах кинематической цепи могут значительно увеличиваться при возникновении в системе упругих механических колебаний, особенно если они носят знакопеременный характер. Ограничение максимальных нагрузок в приводе и уменьшение колебательности упругих связей обеспечивают повышение надежности и долговечности механической части. Этим обусловлена актуальность разработанной системы автоматического управления с регулятором демпфирования колебаний деформаций упругой ленты конвейера, приводимой в движение посредством частотно-регулируемого асинхронного двигателя с регулированием скорости от преобразователя частоты. Наибольшие колебания деформаций участков ленты возникают в пусковых режимах и при регулировании скорости электропривода.

Демпфировать колебания деформаций предложено средствами рационального управления приводным электродвигателем путем введения в регулятор обратных связей по величинам упругих деформаций. Математическая модель электромеханической системы электропривода с замкнутой тяговой лентой (рис.1) представлена в виде четырех сосредоточенных масс с приведенным моментом инерции J_i соединенных упруго-вязкими связями жесткостью c_i и вязкостью b_i . Частотно-регулируемый асинхронный двигатель с преобразователем частоты подключен к массе с моментом инерции J_1 .

Передаточные функции преобразователя частоты (ПЧ) и асинхронного электродвигателя (АД) имеют вид апериодических звеньев:

$$W_{\text{ПЧ}} = \frac{K_{\text{П}}}{T_1 s + 1}, \quad (1)$$

$$W_{\text{АД}} = \frac{a}{T_2 s + 1}, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени преобразователя и двигателя, $K_{\text{П}}$ – коэффициент усиления преобразователя, a – динамическая жесткость механической характеристики двигателя [1]. Перемещаемый груз имеет сосредоточенную массу с моментом инерции J_2 , натяжной барабан массой J_3 соединен холостой частью ленты массой J_4 с приводным барабаном J_1 . Величина деформации упругой ленты между массой ротора двигателя с приведенной к ней массой приводного барабана J_1 и грузом J_2 обозначена δ_{12} . Деформация ленты между грузом J_2 и натяжным барабаном J_3 обозначена δ_{23} . По этим деформациям введена подчиненная отрицательная обратная связь на регуляторы $W_{p1}(s)$ и $W_{p2}(s)$ [2].

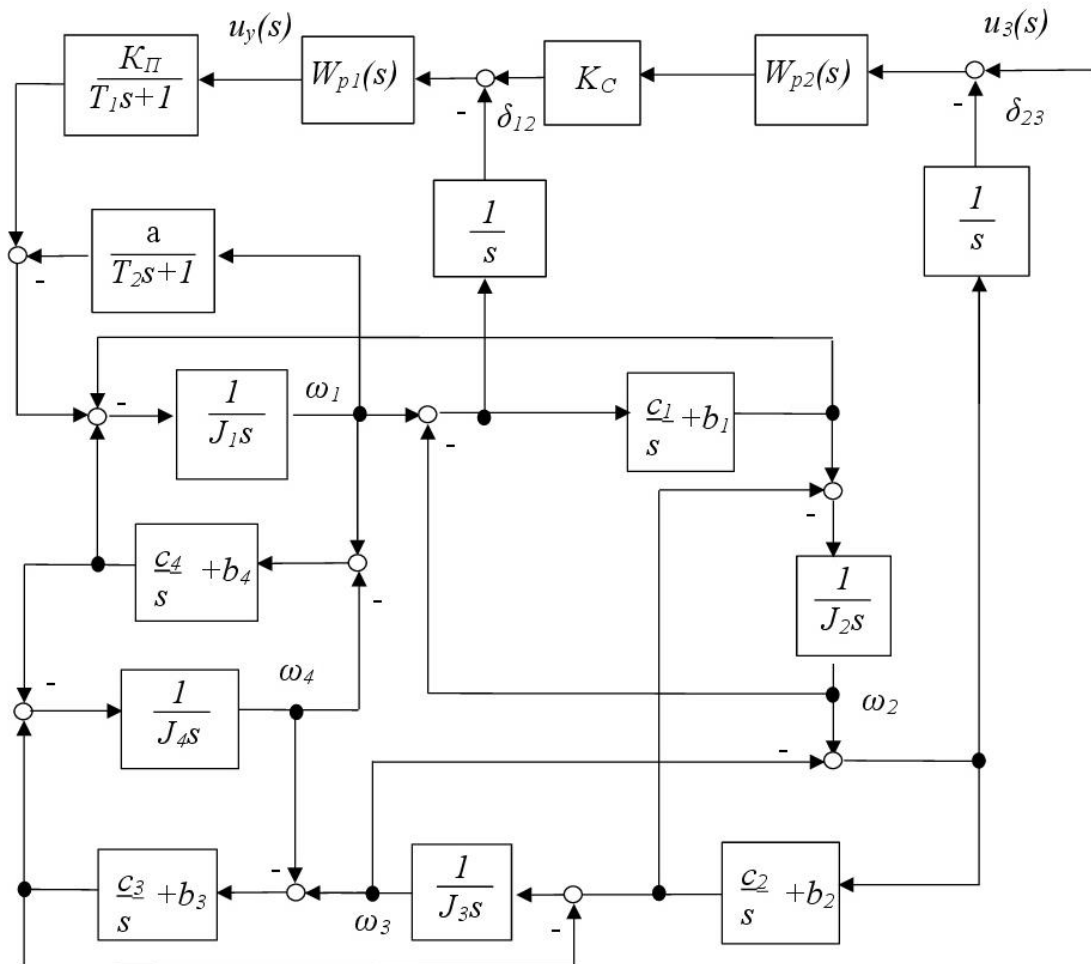


Рис. 1. Структурная схема частотного электропривода ленточного конвейера

Для определения значений деформаций на участках ленты конвейера получена формула передаточной функции для многомассового электропривода [3]:

$$W_{ij}(s) = \frac{U_j(s) \cdot [R_{(i-1),i}(s) - R_{i,(i-1)}(s)]}{s^2 \cdot [F_j(s) \cdot R_k(s) + N_j(s) \cdot X(s)]} , \quad (3)$$

где полиномы $U_j(s)$, $F_j(s)$ и $N_j(s)$ определены параметрами частотно-управляемого асинхронного электродвигателя, а полиномы $R(s)$ и $X(s)$ в векторно-матричной форме определяются по параметрам механической части привода [4].

Электропривод шахтного ленточного конвейера имеет следующие параметры: приведенные моменты инерции сосредоточенных масс $J_1=19 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2=28 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_3=18 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_4=7,62 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; вязкость участков ленты $b_1=0,14 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$, $b_2=0,13 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$, $b_3=0,15 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$, $b_4=0,12 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$; жесткости участков ленты $c_1=72 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $c_2=74 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $c_3=70 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $c_4=76 \text{ Н}\cdot\text{м}$; коэффициент усиления и постоянные времени преобразователя частоты $K_{\text{П}}=1$ и $T_1=0,017 \text{ с}$; жесткость механической характеристики $a=158 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ и электромеханическая постоянная времени двигателя $T_2=0,0139 \text{ с}$.

Получены передаточные функции деформаций упругой ленты конвейера привода без регуляторов:

$$A_{12}(s)=(1082,96+3,95076\cdot s+180,847\cdot s^2+0,33737\cdot s^3+6,06796\cdot s^4)/H(s), \quad (4)$$

$$A_{23}(s)=(124,284+0,506251\cdot s+15,6039\cdot s^2+0,0303398\cdot s^3)/H(s), \quad (5)$$

где характеристический полином:

$$H(s)=2456,28+1184,37\cdot s+1548,16\cdot s^2+360,64\cdot s^3+207,932\cdot s^4+33,1313s^5+7,03436\cdot s^6+0,841448\cdot s^7+0,0225603\cdot s^8+0,000172426\cdot s^9. \quad (6)$$

Переходные функции этих деформаций определяются как реакции передаточных функций на управляющий единичный ступенчатый входной сигнал $u_y(s)$ [5]:

$$\delta_{12}(s) = u_y(s) \cdot A_{12}(s), \quad (7)$$

$$\delta_{23}(s) = u_y(s) \cdot A_{23}(s). \quad (8)$$

Графики переходных функций деформаций $\delta_{12}(t)$ и $\delta_{23}(t)$ приведены на рис. 2, они имеют значительные колебания.

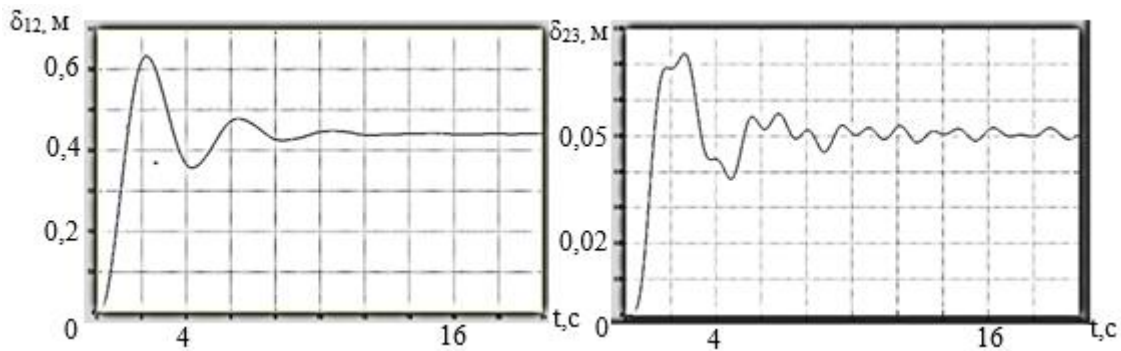


Рис. 2. Графики переходных функций деформаций в приводе без регуляторов

Скорости масс с приведенными моментами инерции J_1 и J_2 в приводе без регуляторов определены по передаточным функциям:

$$W_1(s) = (2456,28 + 13,6589 \cdot s + 1506,77 \cdot s^2 + 5,5704 \cdot s^3 + 196,452 \cdot s^4 + 0,367909 \cdot s^5 + 6,06796 \cdot s^6) / H(s), \quad (9)$$

$$W_2(s) = (2456,28 + 13,6589 \cdot s + 423,813 \cdot s^2 + 1,61964 \cdot s^3 + 15,6049 \cdot s^4 + 0,0303398 \cdot s^5) / H(s), \quad (10)$$

Переходные функции скоростей $\omega_1(t)$ и $\omega_2(t)$ показаны на рис. 3 и также имеют значительные колебания.

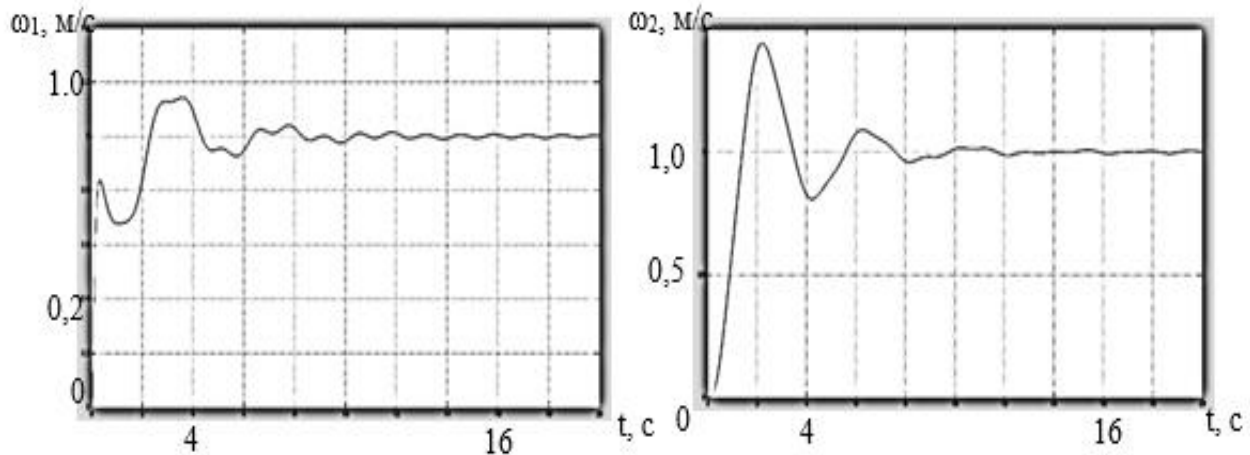


Рис. 3 Графики переходных функций скоростей в приводе без регуляторов

Для демпфирования колебаний деформаций и скоростей в электроприводе конвейера применен метод последовательной коррекции с подчиненным регулированием координат. Для устранения статической ошибки и придания системе астатических свойств в прямой контур регулирования вводится интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W_{p1}(s) = 0,66662/s \quad (11)$$

и отрицательная обратная связь по величине деформации δ_{12} (рис.1).

При этом передаточная функция деформации ленты на участке между массами J_1 и J_2 привода будет равна:

$$W_{12}(s) = (721,923 + 2,63366 \cdot s + 120,556 \cdot s^2 + 0,224898 \cdot s^3 + 4,04502 \cdot s^4) / (721,923 + 2458,91 \cdot s + 1304,93 \cdot s^2 + 1548,39 \cdot s^3 + 364,68 \cdot s^4 + 207,932 \cdot s^5 + 33,1313 \cdot s^6 + 7,03436 \cdot s^7 + 0,841448 \cdot s^8 + 0,0225603 \cdot s^9 + 0,000172426 \cdot s^{10}). \quad (12)$$

Переходная функция деформации δ'_{12} изображена на рис. 4(а) и имеет предельно-апериодический характер.

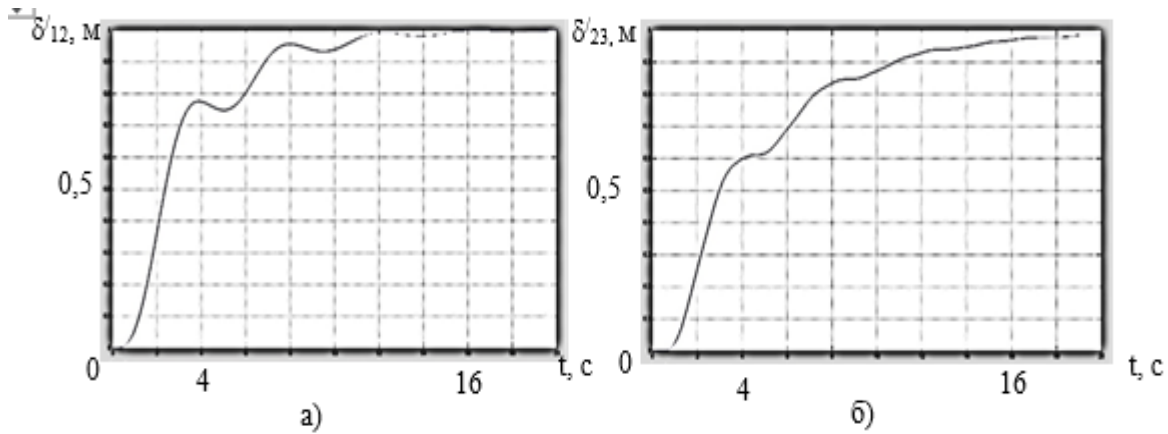


Рис. 4 Графики переходных функций: а) деформаций $\delta'_{12}(t)$ - и $\delta'_{23}(t)$ б) в приводе с регуляторами $W_{p1}(s)$ и $W_{p2}(s)$

Переходная функция получена как реакция передаточной функции $W_{12}(s)$ на единичный ступенчатый сигнал задания $u_3(s)$:

$$\delta'_{12}(s) = u_3(s) \cdot W_{12}(s). \tag{13}$$

Демпфирование деформации δ_{23} осуществляется введением интегрирующего звена с передаточной функцией

$$W_{p2}(s) = 4,0071/s, \tag{14}$$

включенного последовательно с регулятором $W_{p1}(s)$ и охваченного обратной связью по деформации δ_{23} (рис. 1).

Передаточная функция привода с введенными регуляторами $W_{p1}(s)$ и $W_{p2}(s)$ имеет вид:

$$W_{23}(s) = (498,018 + 2,0286 \cdot s + 62,5264 \cdot s^2 + 0,121575 \cdot s^3) / (498,018 + 2458,31 \cdot s + 1246,9 \cdot s^2 + 1548,28 \cdot s^3 + 360,64 \cdot s^4 + 207,932 \cdot s^5 + 33,1313 \cdot s^6 + 7,03436 \cdot s^7 + 0,841448 \cdot s^8 + 0,0225603 \cdot s^9 + 0,000172426 \cdot s^{10}). \tag{15}$$

Переходная функция деформации δ'_{23} в приводе с регуляторами приведена на рис. 4 б). Деформация δ'_{23} практически не имеет колебаний. Для согласования регуляторов $W_{p1}(s)$ и $W_{p2}(s)$ введено пропорциональное звено с коэффициентом $K_c = 0,440894$.

Переходные процессы деформаций упругих связей и скоростей сосредоточенных масс получены и исследованы с применением интерактивного программного пакета Simulink-Matlab.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Составлена математическая модель и структурная схема электромеханической системы частотного асинхронного электропривода ленточного конвейера.

2. Получены передаточные функции многомассового электропривода конвейера, на основе которых построены переходные функции скоростей и деформаций в приводе без регуляторов и с демпфирующими деформации регуляторами.

3. Исследования полученных переходных процессов показали эффективность демпфирования деформаций упругих связей в многомассовом электроприводе при реализации регулятора системы управления методом последовательной коррекции с подчиненным регулированием координат.

Библиографический список

1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егупова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
3. **Ребенков, Е.С.** Формула передаточной функции деформаций упруго-вязких связей многомассового многодвигательного электропривода. / Е.С. Ребенков, Н.Д. Майорова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 8. – С.38-43.
4. **Ребенков, Е.С.,** Майорова, Н.Д. Формула передаточной функции скоростей многомассового многодвигательного частотного электропривода / Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». – Н.Новгород: НГТУ, 2022. С.123-127.
5. **Чикуров, Н.Г.** Моделирование систем и процессов: Учебное пособие. – М.: РИОР: ИНФА, 2013. – 398 с.

E.S. Rebenkov, N.D. Mayorova

LASTIC DEFORMATION DAMPING REGULATOR IN A FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

Abstract. A damping regulator for deformation vibrations of an elastic traction organ in a frequency electric drive of a mine conveyor has been developed. The parameters of the regulator are obtained using the formula of the transfer function for the deformation of a multi-mass electric drive. The transient functions of mass velocities and deformations of elastic links in the electric drive of the conveyor without a regulator and with a regulator are given.

Keywords: vibration damping regulator, multi-mass frequency electric drive, deformations of elastic links, transient deformation processes.

References

- [1] Klyuchev V.I. Theory of electric drive: Textbook for universities. - M.: Energoatomizdat, 1985.- 560s.
- [2] Methods of classical and modern theory of automatic control: Textbook in 5 tt.; 2-e ed., reprint. and additional T.Z: Synthesis of regulators of automatic control systems / Edited by K.A. Pupkov and N.D. Egupov. – M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2004.- 616s.
- [3] Rebenkov E.S., Mayorova N.D. The formula of the transfer function of deformations of elastic-viscous bonds of a multi-mass multi-motor electric drive. //Electrical equipment: operation and repair No. 8, 2022, – pp.38-43.
- [4] Rebenkov E.S., Mayorova N.D. The formula of the transfer function of the velocities of a multi-mass multi-motor frequency electric drive. Article in the proceedings of the All-Russian scientific and technical conference "Actual problems of electric power industry". Nizhny Novgorod, NSTU, 2022. – pp.123-127.
- [5] Chikurov N.G. Modeling of systems and processes: Textbook. - M.:RIOR: INFA-M, 2013.- 398s.

Н.А. Сбитнев

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрены и проанализированы причины неисправностей и основные методы диагностики состояния подшипников качения. Приведен обзор методов диагностики с применением искусственных нейронных сетей (ИНС). Описан алгоритм оценки эффективности применения ИНС в задачах ранней диагностики. Обозначены актуальные проблемы и перспективы развития диагностики подшипников качения с использованием ИНС.

Ключевые слова: диагностика неисправностей; подшипники качения; методы диагностики; искусственные нейронные сети; предсказание состояния.

Одной из наиболее актуальных областей, требующих разработки новых методов диагностики электрооборудования, является электроприводная техника. По различным оценкам, электроприводная техника потребляет от 50 до 70% от общего количества потребляемой электроэнергии промышленными предприятиями. Выход из строя электродвигателя может привести к остановке производства и экономическим потерям, а в некоторых случаях еще и к несчастным случаям и чрезвычайным ситуациям.

Анализ статистики неисправностей электрических машин показал, что одной из наиболее частых причин отказа является неисправность подшипников качения. По оценкам ряда исследований [1-2], от 40 до 70% отказов электропривода связаны с неисправностями подшипников. Отказы происходят из-за неправильной установки, сборки, эксплуатации и обслуживания. Одной из наиболее частых причин неисправности подшипника является загрязнение, вызванное попаданием в смазку инородных веществ из внешней среды [3]. Такие параметры, как шум, вибрация и температура, приводят к увеличению засорения подшипника и его полному разрушению [4]. Соотношение причин неисправностей подшипников качения приведены на рис. 1.

52% от общего числа неисправностей связаны с загрязнением масла подшипника, 48% из которых по причине загрязнения инородными частицами и 4% вызваны коррозией при загрязнении жидкостью. 11% причин вызваны неправильным выбором смазки, ее отсутствием или ее избытком. Эти цифры являются показателем того, что большинство случаев выхода подшипника качения из строя могут быть предотвращены при выявлении неисправности на ранней стадии и соответствующем обслуживании.



Рис. 1. Причины неисправностей подшипников качения

В настоящее время существует несколько методов диагностики состояния подшипников качения, которые можно разделить на три основных подхода [4]:

- традиционный подход;
- статистический подход;
- подходы на основе искусственного интеллекта (ИИ).

Блок-схема наиболее популярных методов диагностики подшипников качения представлена на рис. 2.

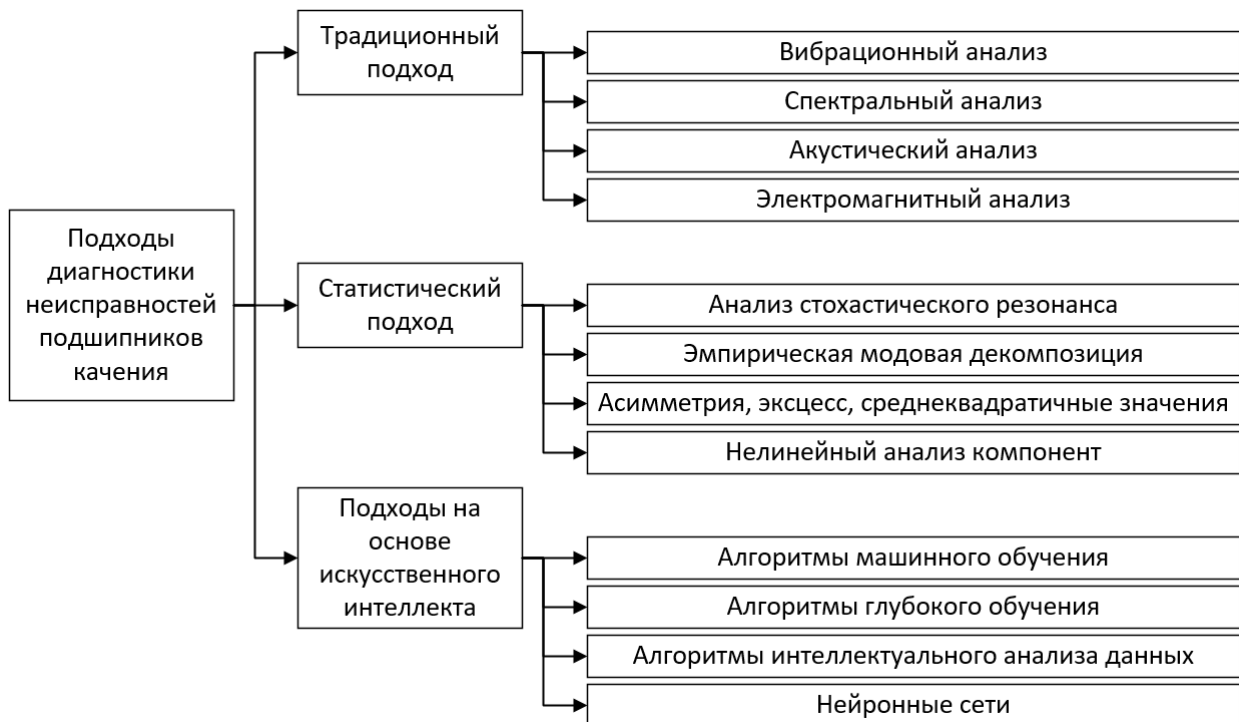


Рис. 2. Подходы диагностики неисправностей подшипников качения

Особое внимание в области диагностики подшипников качения в настоящее время уделяется подходам на основе ИИ, это связано с активным развитием нейронных сетей, глубокого и машинного обучения, а также с результатами, которые они демонстрируют в различных отраслях в последние несколько лет. У подходов на основе ИИ есть некоторые функциональные преимущества перед традиционными и статистическими подходами – они позволяют предсказывать

будущее состояние, основываясь на данных мониторинга; способны принимать на вход одновременно несколько различных параметров и составлять по ним результирующую картину состояния. Однако, такой подход требует большого количества данных о работе диагностируемого оборудования в различных режимах, представленных в цифровом виде.

Существует множество исследований [3-4] различных систем диагностики неисправностей с применением нейронных сетей, глубокого и машинного обучения, и большинство из них демонстрируют высокие показатели точности распознавания неисправности в различных условиях. Однако, стоит отметить, что для обоснования введения в эксплуатацию системы диагностики неисправностей, использующую подходы на основе ИИ, показателя точности может быть недостаточно. Для обоснования применения подходов на основе ИИ должен быть разработан алгоритм оценки эффективности. Предлагаемый алгоритм оценки эффективности состоит из следующих этапов:

1) формирование исходных данных: сбор данных о работе электропривода и состоянии подшипников, анализ данных для определения наиболее значимых признаков, разделение данных на обучающую и тестовую выборки;

2) обработка исходных данных: приведение данных к нужному формату и единому масштабу, очистка данных от выбросов и шумов, выделение признаков из исходных данных;

3) разработка и обучение ИНС: выбор архитектуры нейронной сети, определение и настройка гиперпараметров, определяющих ее архитектуру и поведение во время обучения (количество скрытых слоев, количество нейронов в каждом слое, функция активации нейронов, и т.д.), обучение на подготовленных данных;

4) оценка качества модели: оценка точности и качества работы нейронной сети на независимых тестовых данных, сравнение метрик качества с другими методами диагностики качения, анализ результатов на тестовой выборке;

5) интеграция и внедрение нейронной сети: разработка алгоритма работы нейронной сети в реальном времени, внедрение нейронной сети в систему диагностики неисправностей подшипников качения, проведение тестирования на реальных данных;

6) мониторинг и доработка модели: мониторинг работы модели в реальном времени, анализ результатов работы модели и определение необходимости доработки, доработка модели при необходимости;

7) оценка эффективности применения ИНС: Сравнение результатов работы с использованием ИНС с результатами других методов диагностики, определение экономической выгоды, определение степени улучшения качества диагностики и сокращения времени на диагностику.

Формирование исходных данных о состоянии подшипников качения должно происходить по доступным для измерения параметрам при помощи датчиков и программно-аппаратного блока, который сможет автоматизировать сбор и структуризацию данных. Во многих исследованиях [3-5] в качестве исходных данных берутся уже подготовленные данные от Case Western Reserve University

(CWRU) для электропривода мощностью 1.47 кВт с подшипниками SKF в нормальном состоянии, а также после внесения точечных дефектов при помощи электроэрозионной обработки с диаметром дефекта 0.178, 0.356 и 0.533 мм [6]. Однако, существует ряд факторов, почему эти данные могут быть неактуальны в качестве исходных данных для обучения нейронной сети:

- данные получены в исследовательской лаборатории и не отображают реальных параметров работы подшипников качения в производственных условиях;
- данные получены для электропривода с номинальной мощностью 1.47 кВт, когда на производстве наиболее актуальна диагностика электрических машин большей мощности;
- данные не включают информацию об изменениях величины потребляемого электрической машиной тока в процессе работы;
- данные полученные для зарубежного электропривода с зарубежными подшипниками качения могут быть плохо применимы к подшипникам отечественного производства;

В качестве альтернативы источника исходных данных можно рассмотреть несколько вариантов:

- 1) воспользоваться данными CWRU, но на этапе обучения и тестирования учесть их недостатки. Например, в исследовании [5] для оценки предлагаемого метода диагностики в условиях шума, после обучения, модель тестировалась с добавлением белого шума;
- 2) создать собственную базу исходных данных, повторив опыт CWRU для отечественных подшипников качения и электропривода более типового для производства мощности;
- 3) организовать сбор данных для ряда типовых электроприводов и подшипников качения на испытательном стенде и в реальных условиях эксплуатации на всей продолжительности жизни при нормальном обслуживании вплоть до выхода из строя с последующим подробным исследованием и описанием причины выхода из строя;
- 4) создание системы сбора и структуризации данных в непрерывном режиме в течение длительного срока при помощи программно-аппаратного комплекса Промышленного Интернета вещей для всего доступного промышленного ряда электрических машин с ручной разметкой данных об оборудовании.

Последний вариант может оказаться наиболее перспективным решением и позволит извлечь максимальную пользу из применения нейронных сетей в диагностических системах, причем в дальнейшем такая система может легко масштабироваться и распространяться не только на подшипники качения. Однако, построение, организация и запуск такой системы требует больших затрат и времени, а, следовательно, рассматривать ее стоит только при условии доказанной эффективности применения подходов на основе ИИ в системах диагностики.

Для корректного обучения ИНС необходимо провести обработку исходных данных. Предварительно, перечень признаков, обязательных к выделению для обучения ИНС для диагностики подшипников качения будет выглядеть следующим образом:

- 1) вибрационный сигнал: анализ частотных компонент вибрационного сигнала, описывающего колебания подшипников в процессе работы;
- 2) акустический сигнал: анализ амплитуды и частотных характеристик звукового сигнала, который возникает при трении элементов подшипника;
- 3) температурный анализ: мониторинг изменения температуры на подшипнике, которое может указывать на неисправности, такие как трение или износ;
- 4) ток двигателя: анализ изменений электрического тока, потребляемого электроприводом, которые свидетельствуют о неисправности подшипника. К характерным изменениям при неисправности подшипника можно отнести возникновение дополнительных электрических сигналов или шумов, вызванных трением или износом элементов подшипника (например, при дефектах внутреннего кольца подшипника могут наблюдаться импульсы тока с частотой вращения вала, а при дефектах внешнего кольца – импульсы с удвоенной частотой).

Выбор архитектуры нейронной сети для обучения является важным элементом алгоритма оценки эффективности, однако, согласно анализу существующих методов диагностики подшипников качения [4] существует 54 варианта применения нейронных сетей с различными архитектурами и в различных конфигурациях, со своими преимуществами и недостатками. Поскольку провести полный анализ всех описанных в этой статье вариантов диагностики является затруднительным, в качестве архитектуры предлагается рассмотреть двухканальную рекуррентную нейронную сеть с широким первым ядром и глубоководной сверточной нейронной сетью (РНС-ГСНС), способную работать с необработанными временными сигналами. Такая архитектура нейронной сети сочетает в себе элементы рекуррентных нейронных сетей (РНС) и сверточных нейронных сетей (СНС) для улавливания отдаленных зависимостей в данных по времени и подавления высокочастотного шума во входных сигналах.

Рекуррентная нейронная сеть является классом нейронных сетей, которые используются для анализа последовательностей данных, где входные данные имеют временную последовательность (зависимость следующих значений от предыдущих).

Основная идея РНС заключается в том, чтобы передавать информацию из предыдущих шагов в следующие. Для этого каждый узел РНС имеет входное значение, выходное значение и скрытое состояние, которое передается на следующий шаг. Скрытое состояние можно рассматривать как память РНС, которая сохраняет информацию о прошлых значениях и используется для принятия решений на последующих шагах.

Сверточная нейронная сеть представляет из себя класс нейронных сетей, которые используются для обработки и анализа различных типов данных, имеющих структурированный характер, и способный выделять признаки из данных и находить зависимости между ними. СНС состоит из нескольких слоев, каждый из которых выполняет определенную функцию в обработке входных данных. Основные типы слоев СНС включают в себя:

- слой свертки: извлечение признаков операцией свертки входных данных с набором фильтров (сверточным ядром);

- слой объединения: уменьшение размерности входных данных за счет суммирования или выбора максимального значения внутри фиксированного окна;

- слой активации: добавление нелинейности в модели путем применения нелинейной функции активации к выходным данным сверточного слоя;

- слой нормализации: нормализация входных данных для более эффективного обучения модели;

- слой полносвязной нейронной сети: преобразование выходных данных сверточных слоев и слоев объединения в одномерный вектор.

Основная идея сверточного слоя состоит в том, чтобы вместо одного линейного слоя, связывающего каждый вход с каждым выходом, использовать в каждой позиции на входе множество маленьких линейных слоев, обычно имеющих не более 25 входов и один выход (сверточное ядро).

Глубокая сверточная нейронная обычно состоит из нескольких слоев свертки и объединения, а также может содержать полносвязные слои и слои нормализации. Основное отличие СНС и ГСНС заключается в их глубине и сложности. Каждый блок ГСНС имеет большее количество параметров и способен выделять более сложные признаки, чем СНС.

В исследовании [5] архитектура РНС-ГСНС демонстрирует хорошие результаты при диагностике неисправностей подшипников качения, в том числе и в условиях повышенного шума (среднее значение точности модели от 96.2 % до 99.79 %). Также одной из причин выбора этой архитектуры является то, что весь программный код экспериментов оценки точности находится в открытом доступе [9]. Структурная схема архитектуры модели нейронной сети представлена на рис. 3.

Как видно из структурной схемы архитектуры модели, наряду с использованием очень широкого ядра сверточного фильтра в первом слое пути ГСНС (СНС Блок 1), перед блоком рекуррентной нейронной сети в пути РНС также добавляется одномерный сверточный слой с широким ядром фильтра (СНС фильтр 1). Это помогает, прежде всего, подавить высокочастотный шум в необработанных входных сигналах, а также узнать полезные характеристики для подачи в блок РНС. Основная задача блока РНС в двухканальной архитектуре - помочь захватить динамические временные характеристики, охватывающие большое количество временных шагов. Эти разнообразные по времени признаки, полученные блоком РНС, дополняют локально расположенные признаки, полученные сверточным блоком, улучшают конечные результаты классификации.

Путь ГСНС и путь РНС объединяются вместе и подаются на выходной слой классификации, который использует функцию Softmax для преобразования необработанных логитов в распределение вероятностей, соответствующее классам неисправности подшипника (где все элементы лежат в диапазоне [0, 1] и в сумме равны 1). Эта функция Softmax определяется как:

$$\text{Softmax}(x_i) = \frac{\exp(x_i)}{\sum_j \exp(x_j)}, \quad (1)$$

где x_i , x_j – i -й и j -й элементы вектора сырых логитов из модели, соответственно.

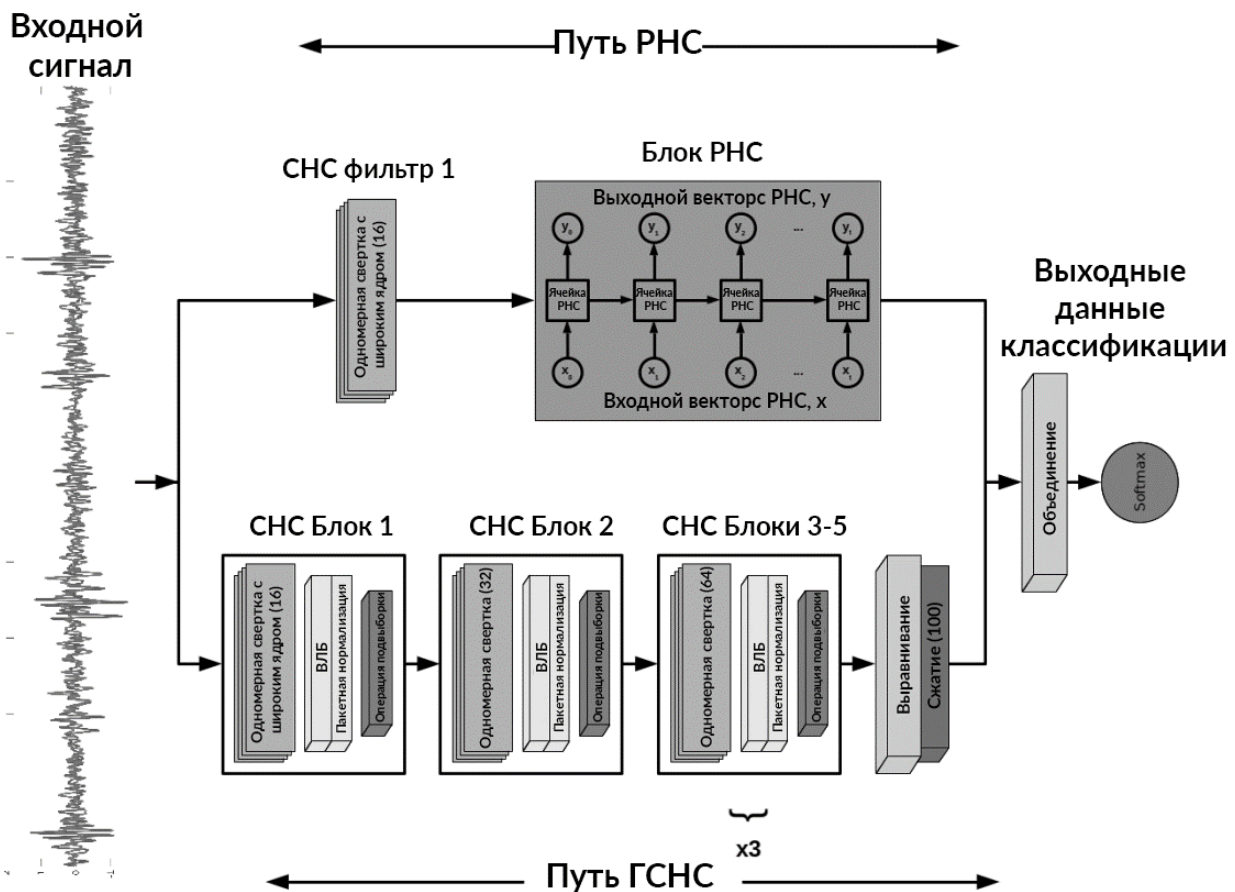


Рис. 3. Структурная схема рекуррентной нейронной сети с широким первым ядром и глубоким сверточным путем (РНС-ГСНС)

Как уже было обозначено, важной особенностью диагностической системы является то, что она должна выявлять неисправности на раннем этапе. В исследовании [7] приводятся три последовательных состояния, характеризующие неисправность:

- зарождающаяся неисправность с устойчивым распространением;
- развитая неисправность с ускоренным распространением;
- катастрофический этап прогрессирования неисправности с ускоренным распространением.

На первом этапе деградация начинает развиваться, но при этом электропривод может продолжать работать без явных симптомов, этот этап обычно занимает большую часть срока службы компонента и обнаружение неисправности на этом этапе является наиболее сложным. На втором этапе неисправность начинает прогрессировать и ее влияние вносит значительные изменения в работу электропривода. На втором этапе скорость развития неисправности многократно возрастает и в итоге переходит в состояние, соответствующему последнему этапу развития неисправности, катастрофическому этапу. На последнем этапе неисправность распространяется на другие компоненты системы и приводит электропривод к выходу из строя. Для выявления величины неисправностей внутреннего и внешнего кольца подшипников качения предлагается оценивать специфичные частоты, возникающие при дефекте [8]:

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right), \quad (2)$$

$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right), \quad (3)$$

где f_r – частота вращения, N_b – количество шариков подшипника, D_c – диаметр сепаратора, D_b – диаметр шариков, β – угол контакта между шариком и дорожкой качения.

Величина частоты неисправности прямо пропорционально связана со степенью неисправности. Существуют разные способы определения границ состояний развития неисправностей и для разных элементов он отличается. В исследовании [7] определяют границу ранней стадии развития неисправности до момента, пока размер трещины на внутренней или внешней дорожке качения составляет менее 12.5% от диаметра шарика подшипника и определяется по формуле (3). После преодоления этой границы ход подшипника претерпевает значительные изменения и изменяет симметрию ротора, что позволяет рассматривать повреждение как развитое.

$$\gamma = 100 \frac{\lambda}{\Theta}, \quad (4)$$

где λ – диаметр трещины, Θ – диаметр шарика.

Эти данные могут быть полезны на этапе мониторинга и доработки модели нейронной сети, позволят определить, справляется ли диагностическая система с выявлением неисправности на раннем этапе развития и, в случае необходимости, провести настройку гиперпараметров или добавление новых, неучтенных признаков.

После того как данные будут собраны, модель нейронной сети обучена и ее точность будет проверена на подготовленных данных, можно будет переходить к этапу интеграции модели нейронной сети в диагностическую систему. На этом этапе наилучшим решением будет внедрение модели в систему мониторинга состояния подшипников качения электропривода на производстве с уже реализованным традиционным или статистическим подходом диагностики и использованием тех же сигналов с датчиков, что позволит в дальнейшем более точно сравнить различные подходы между собой.

Финальным этапом является непосредственно оценка эффективности применения ИНС в системах диагностики путем сравнения с результатами других методов по следующим критериям:

- 1) точность диагностики: оценка количества правильно определенных неисправностей по сравнению с общим количеством диагностированных объектов;
- 2) скорость диагностики: оценка времени, затрачиваемого на диагностику одного объекта, с использованием и без использования нейронных сетей;
- 3) стадия выявления неисправности: оценка стадии развития неисправности на моменте ее выявления с использованием и без использования нейронных сетей;

- 4) надежность диагностики: оценка вероятности ошибок при диагностике, а также оценка степени уверенности в полученных результатах;
- 5) стоимость реализации системы диагностики: оценка затрат на разработку, внедрение и обслуживание системы диагностики с использованием нейронных сетей по сравнению с аналогичными системами без использования нейронных сетей;
- 6) экономическая выгода: совокупная оценка экономического влияния работы диагностической системы с применением ИНС.

Также стоит отдельно подытожить и отметить текущие проблемы в области диагностики подшипников качения, которыми можно столкнуться в процессе оценки эффективности применения ИНС в системах диагностики:

- 1) для создания наборов данных в большинстве случаев используются данные, полученные в лаборатории, что не всегда совпадает с реальными данными;
- 2) сбор данных из различных источников упрощает создание наборов данных, но для получения точных результатов необходимо иметь размеченные данные. Это затрудняет получение высокоточных результатов моделей машинного и глубокого обучения;
- 3) дисбаланс данных в основном вызвано тем, что данные собираются при здоровом состоянии подшипников, и ограниченное количество образцов собирается при неисправных состояниях, что приводит к неравномерности данных в наборах данных, что также влияет на производительность моделей;
- 4) обычно для сбора информации используются вибрационные сигналы, которые записываются в лаборатории с помощью акселерометров, но реальные данные содержат много шума в своих измерениях.

Среди перспективных направлений в области развития диагностики состояния подшипников качения стоит выделить:

- 1) разработку и внедрение в производство системы сбора и структуризации данных и непрерывного обучения нейронной сети на основе Промышленного Интернета вещей;
- 2) внедрение нескольких методов короткого обучения в сочетании с трансфертным обучением, которое обладает способностью учиться на прошлом опыте для выявления неожиданных неисправностей, для устранения несбалансированности и нехватку данных [4].

В статье приводится описание алгоритма оценки эффективности применения ИНС в задачах диагностики и выявления неисправности на раннем этапе ее развития. Также предложены и описаны альтернативные варианты формирования исходных данных для обучения нейронной сети; произведен выбор архитектуры нейронной сети для обучения и проведения сравнительного анализа; описаны критерии оценки эффективности методов диагностики; описаны существующие проблемы и перспективы развития в области диагностики подшипников качения.

Библиографический список

1. A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries // IEEE [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/464536> (дата обращения 18.04.23).
2. Increased Efficiency Versu Increased Reliability // IEEE [Электронный ресурс] <https://ieeexplore.ieee.org/document/4432942> (дата обращения 18.04.23).
3. A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery // MDPI, Applied sciences [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/972>: (дата обращения 20.04.2023).
4. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/296> The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines The State of the Art [Электронный ресурс]: MDPI, Energies [дата обращения 19.04.2023].
5. A Novel Deep Learning Model for the Detection and Identification of Rolling Element-Bearing Faults // MDPI Sensors [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5112> (дата обращения: 20.04.2023).
6. Bearing Data Center // Case Western Reserve University [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> (дата обращения: 25.04.2023).
7. Early Detection of Faults in Induction // Motors. A Review. MDPI, Energies [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/7855> (дата обращения: 02.05.2023).
8. Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring // IEEE [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4438690> – (дата обращения: 03.05.2023).
9. Rolling Element Bearing Fault Detection Using Deep Learning // Github [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://github.com/al3xsh/rolling-element-bearing-fault-detection> – (дата обращения: 05.05.2023).
10. Современные решения в области диагностики и прогнозирования состояния электрических приводов // Neftegaz.Ru [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/oborudovanie/662638-sovremennye-resheniya-v-oblasti-dagnostiki-i-prognozirovaniya-sostoyaniya-elektricheskikh-privodov/> – (дата обращения 07.05.2023).
11. Применение искусственных нейронных сетей в задачах диагностики электродвигателей // Тенденции развития науки и образования [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44499696> – (дата обращения 08.05.2023).

N.A. Sbitnev**ALGORITHM FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE TASKS OF EARLY FAULT DIAGNOSIS**

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers and analyzes the causes of faults and the main methods of diagnostics of the condition of rolling bearings. An overview of diagnostic methods using artificial neural networks (ANN) is given. An algorithm for evaluating the effectiveness of using ANN in early diagnosis tasks is described. The topical problems and prospects of development of rolling bearings diagnostics with the use of ANN are outlined.

Key words: Fault diagnosis; rolling bearings; diagnostic methods; artificial neural networks; condition prediction.

References

- [1] A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries in IEEE [Online]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/464536> (Accessed: Apr. 18, 2023)
- [2] Increased Efficiency Versus Increased Reliability in IEEE [Online]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4432942> (Accessed: Apr. 18, 2023)
- [3] A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating in MDPI, Applied sciences [Online]. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/972> (Accessed: Apr. 20, 2023)
- [4] The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—The State of the Art in MDPI, Energies [Online]. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/296> (Accessed: Apr. 19, 2023)
- [5] A Novel Deep Learning Model for the Detection and Identification of Rolling Element-Bearing Faults in MDPI, Sensors [Online]. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5112> (Accessed: Apr. 20, 2023)
- [6] Bearing Data Center in Case Western Reserve University [Online]. Available at: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> (Accessed: Apr. 25, 2023)
- [7] Early Detection of Faults in Induction Motors—A Review in MDPI, Energies [Online]. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/7855> (Accessed: May 02, 2023)
- [8] Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring in IEEE [Online]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4438690> (Accessed: May 03, 2023)
- [9] Rolling Element Bearing Fault Detection Using Deep Learning in Github [Online]. Available at: <https://github.com/al3xsh/rolling-element-bearing-fault-detection> (Accessed: May 05, 2023)

УДК 621.3.078

DOI: 10.46960/apeen_2023_137

В.В. Федотов, В.В. Рожков**СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ
ДЛЯ ОТРАБОТКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ**Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»
г. Смоленск

Аннотация. В статье рассмотрен синтез системы управления с нелинейным регулятором положения для двигателя постоянного тока. Расчет регулятора осуществлен без использования задатчика интенсивности, который используют при синтезе подобных систем управления электроприводов. Произведена количественная оценка диапазонов перемещения в зависимости от настройки регуляторов. Моделированием проведена оценка точности отработки задания при настройке регуляторов на технический оптимум и при использовании нелинейного регулятора положения.

Ключевые слова: регулятор положения, позиционный электропривод, нелинейный регулятор, точность, быстродействие.

Задачи точного позиционирования в электроприводе (ЭП) являются одними из самых сложных, что наиболее ярко проявляется в робототехнических, станочных, антенных системах, где технологические требования к точности расположения рабочего органа на плоскости или в пространстве составляют единицы мкм или угловых секунд [1], [2]. Общепринятых методик синтеза позиционных ЭП для механизмов, обеспечивающих столь высокие требования, не существует. Главным образом, для решения таких задач наиболее широко используются системы подчиненного регулирования. Они выполняются, как правило, трехконтурными. Причем основным элементом, обеспечивающим заданную точность позиционирования, служит регулятор положения, отличающийся по своей структуре (непрерывный, релейный, параболический, нелинейный) и имеющий у различных авторов характерные особенности синтеза [3]-[5]. Перемещения в позиционном электроприводе классифицируют, например, в [4] и [5], по некоторым диапазонам на «большие», «средние» и «малые», которые напрямую зависят от настроек регуляторов, в частности, определяемых работой в режиме их ограничения. Здесь при синтезе позиционных систем управления особое внимание уделяется наличию задатчика интенсивности (ЗИ), формирующего темп изменения скорости для ограничения допустимого углового ускорения. Кроме того, дополнительные возможности открываются при синтезе цифровых позиционных ЭП [6].

Целью данной статьи является проведение синтеза регулятора углового положения на основе идей [4], но при отказе от ЗИ.

В качестве объекта управления принят двигатель постоянного тока ПЯ 250Ф номинальной мощности 250 Вт и напряжением якоря 36 В. Структурная схема ЭП с трехконтурной системой автоматического управления (САУ) представлена на рис.1.

Регуляторы тока, скорости и положения САУ (РТ, РС и РП соответственно) настраиваются на технический оптимум (ТО), например, в относительных единицах (о.е.) [4], [5]. При этом, как и в [1], РП принимается (П-) пропорциональной структуры, а его настройка определяется как:

$$k_n = \frac{k_{oc}}{8 \cdot T_\mu \cdot k_m \cdot k_{on}}, \quad (1)$$

где k_n – коэффициент усиления РП, k_{oc} – коэффициент обратной связи (ОС) по скорости $1/(2 \cdot \pi \cdot 50)$, k_{on} – коэффициент ОС по положению $1/(2 \cdot \pi)$, k_m – передаточное число измерительного редуктора (принято 1), $T_\mu = 0,001$ с – некомпенсируемая постоянная времени. Для ПЯ 250Ф получаем $k_n = 2,5$. По стандартной методике определяется коэффициент П-регулятора скорости $k_c = 203,62$. Стандартно настроен и РТ якоря с ПИ-структурой [3].

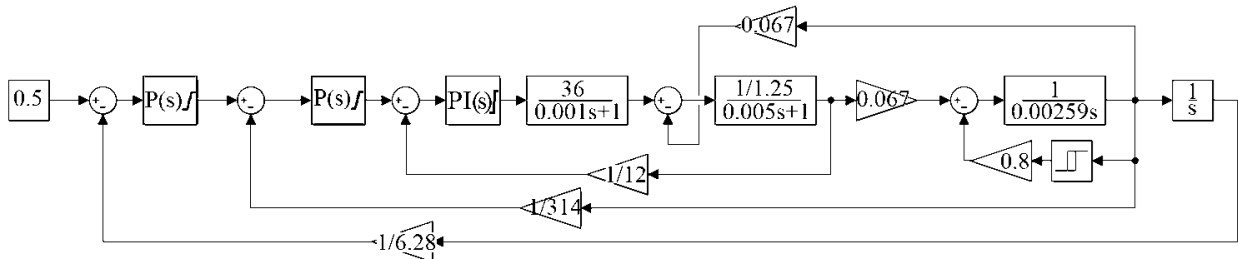


Рис. 1. Структурная схема электропривода с трехконтурной САУ

Количественную оценку диапазонов перемещения осуществим через накладываемые в [1] ограничения регуляторов САУ. Если выходы РП и РС не находятся в насыщении, то такие перемещения относятся к малым (МП):

$$\Delta\varphi_1 = \frac{U_{\text{вых max c}}}{k_c \cdot k_n}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_1$ – точка, до достижения которой перемещения относятся к МП, $U_{\text{вых max c}}$ – ограничение выхода РС, принято равным 1. Подставив численные данные, получаем $\Delta\varphi_1 = 0,00196$ о.е. или 0,012 рад при умножении на $2 \cdot \pi$ (число, обратное коэффициенту ОС по положению).

Если выход РС находится в насыщении, а выход РП – нет, то перемещения можно отнести к средним (СП). Тогда:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{U_{\text{вых max c}}}{k_c}, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi_2$ – точка, до которой перемещения относятся к СП, $U_{\text{вых max c}}$ – максимальное значение выхода регулятора скорости (ограничение), в о.е. принято равным 1. Подставив численные данные, получаем $\Delta\varphi_2 = 0,4$ о.е. или 2,512 рад при умножении на $2 \cdot \pi$. Если оба регулятора (и РС, и РП) в насыщении – перемещения относят к большим (БП).

Обобщив выполненные расчеты, получаем следующие диапазоны перемещения при $k_n = 2,5$ и $k_c = 203,62$:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{\text{мал}} = \Delta\varphi < 0,00196 \text{ о. е.} \\ \Delta\varphi_{\text{ср}} = 0,00196 \text{ о. е.} \leq \Delta\varphi \leq 0,004 \text{ о. е.}, \\ \Delta\varphi_{\text{бол}} = \Delta\varphi > 0,4 \text{ о. е.} \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_{\text{мал}}$ – МП, $\Delta\varphi_{\text{ср}}$ – СП, $\Delta\varphi_{\text{бол}}$ – БП.

Моделирование работы САУ выполнено при следующих углах задания: $\Delta\varphi_{\text{бол}} = 0,5 \text{ о. е.}$, $\Delta\varphi_{\text{ср}} = 0,3 \text{ о. е.}$, $\Delta\varphi_{\text{мал}} = 0,001 \text{ о. е.}$. По результатам моделирования в статике угловая ошибка для задания угла $0,5 \text{ о. е.}$ составила $0,0014 \text{ рад}$, для $0,3 \text{ о. е.}$ – $0,0054 \text{ рад}$, а $0,001 \text{ о. е.}$ – не отрабатывается, появляются колебания положения около нуля с малой амплитудой.

Увеличение k_n не приводит к повышению точности системы, которую в [4] улучшают использованием ЗИ. Без него подстройка k_n далее выполняется экспериментально, а оценка ее корректности выполняется по установившемуся режиму и факту устойчивости системы при отработке угла. В результате серии экспериментов получены k_n : для МП $k_n = 2,5 \cdot 3,182$ – ошибка близка к $0,0001 \text{ рад}$, для СП $k_n = 2,5/1,314$ – к $0,00001 \text{ рад}$, для БП $k_n = 2,5/2,982$ – к $0,000006 \text{ рад}$. Состояния РП, РС и РТ (сверху вниз) при этом показаны на рис.2. Углы задания остались неизменными. Корректировка k_n приводит к изменению диапазонов перемещений (и ограничений). Проведенный анализ рис.2 показывает, что диапазон МП и БП отрабатывается с хорошей точностью. При СП проявляется перерегулирование.

Определим для СП настройку РП в соответствии с:

$$k_{\text{нсп}} = k_{\text{ос}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_{\text{доп}}}{k_m \cdot k_{\text{он}} \cdot \Delta u_n}}, \quad (5)$$

где $k_{\text{нсп}}$ – коэффициент пропорциональной части РП для СП, $\varepsilon_{\text{доп}}$ – допустимое ускорение, Δu_n – ошибка по положению.

Ориентировочную оценку допустимого ускорения произведем при ограничении РТ на 24 А (двукратный номинальный ток якоря ПЯ 250Ф, допускаемый производителем двигателя) и уравнения динамики:

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \frac{k\Phi \cdot I - M_H}{J_\Sigma}, \quad (6)$$

где $k\Phi$ – коэффициент машины, принят равным $0,067 \text{ Нм/А}$, I – ток якоря 24 А , M_H – номинальный момент $0,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$, J_Σ – суммарный момент инерции $0,00259 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. При подстановке в (6) численных данных $\varepsilon_{\text{доп}} = 312 \text{ рад/с}^2$. Используя полученное значение в (5), для РП СП получаем:

$$k_{\text{псп}} = 0,2 \cdot \sqrt{1/\Delta u_{\text{п}}}, \quad (7)$$

Моделирование при использовании настройки РП СП дает ошибку при БП и СП – $0,0025 \text{ рад}$, а при МП – более чем двукратную ошибку.

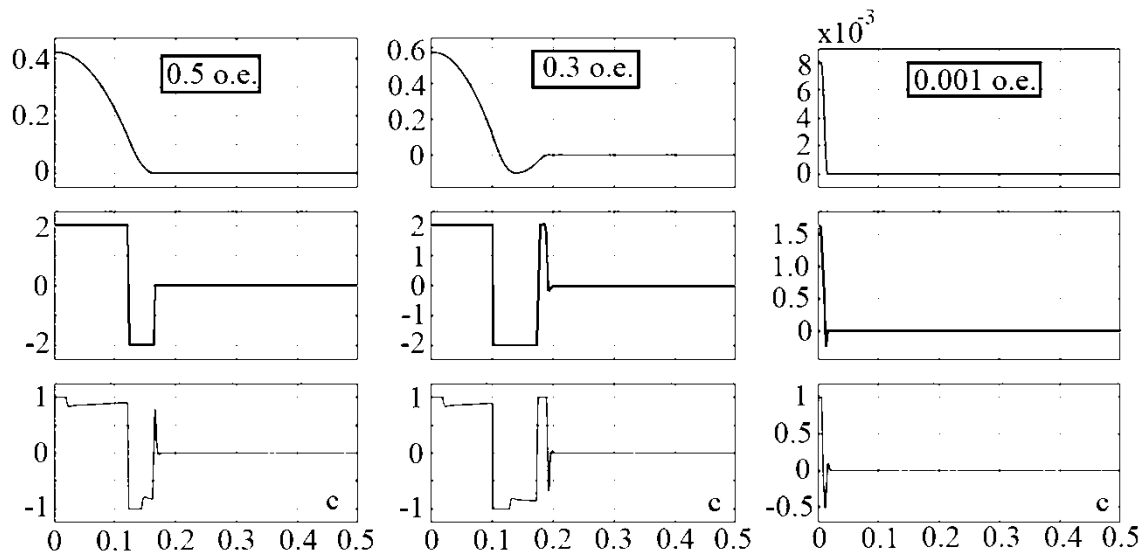


Рис. 2. Состояния регуляторов при ручной подстройке регуляторов

Таблица 1

Параметры нелинейного РП

| Ошибка позиционирования, рад | Коэффициент усиления регулятора положения $k_{\text{п}}$ | Выход регулятора на уровне, о.е. |
|------------------------------|--|----------------------------------|
| 0,00196 | 2,5·3,182 | 0,015592 |
| 0,01 | 2,000 | 0,02 |
| 0,1 | 0,632 | 0,063246 |
| 0,2 | 0,447214 | 0,089443 |
| 0,3 | 0,365148 | 0,109545 |
| 0,4 | 0,316228 | 0,126491 |
| 8,1 | 0,838 | 1,00278 |

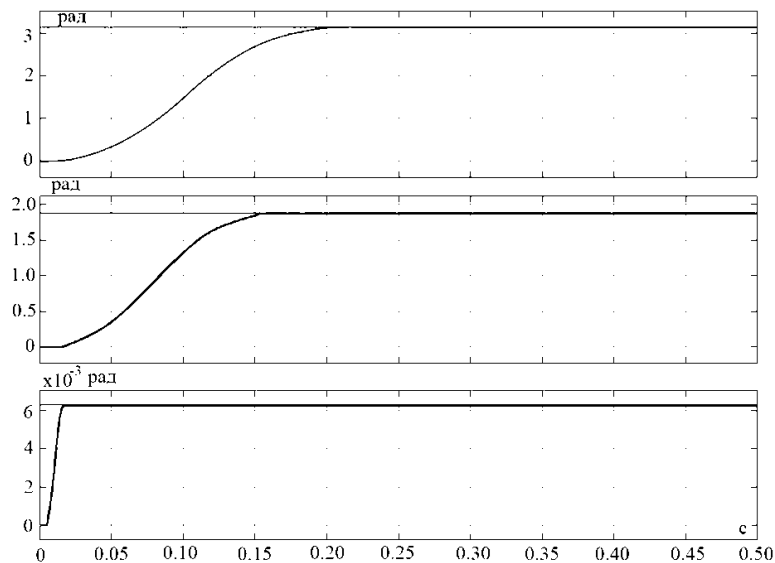


Рис. 3. Отработка углов при использовании нелинейного регулятора положения (сверху вниз углы задания 0,5 о.е.; 0,3 о.е.; 0,001 о.е.; по горизонтальной оси время, с)

Во всех диапазонах в итоге РП работает как нелинейный с параметрами табл. 1. Моделирование отработки угла при таких настройках показано на рис.3 для БП, СП и МП (сверху вниз).

Синтезированная система с нелинейным РП и скорректированными по сравнению с ТО настройками при отработке любых перемещений обеспечивает ошибку в установившемся режиме, не превышающую значения 0,0025 рад (или 0,14 град. = 8,4 угловых минуты). При БП и СП появляется небольшое перерегулирование.

В дальнейшем синтез подобного регулятора с автоподстройкой коэффициента РП позволит отказаться от контура скорости и перенести рассмотренные принципы, например, на позиционные системы с ядром векторного управления асинхронными и синхронными машинами.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012.

Библиографический список

1. **Вычков, М.**, Kuznetsova, V. Optimum and quasioptimum control of the position electric drive by criterion of electric losses minimum / 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). Moscow, Russia, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWED.2018.8321393.
2. **Saha, B.**, Singh B. A Position Sensorless Brushless DC Motor Drive with Inherent Torque Control for EV Application // 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080095.
3. **Ключев, В.И.** Теория электропривода. 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
4. **Фомин, Н.В.** Системы управления электроприводами: учебное пособие [Электронный ресурс] URL: <https://studfile.net/preview/6217055/> (дата обращения 20.05.2023).
5. **Башарин, А.А.**, Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. **Рожков, В.В.** Имитационное моделирование адаптивного идентификатора скорости асинхронного двигателя агломерационной машины / В.В. Рожков, В.В. Федотов // Прикладная информатика. – 2022. – Т. 17. – № 6. – С. 36–55.

V.V. Fedotov, V.V. Rozhkov

SYNTHESIS ANGULAR POSITION REGULATOR FOR WORKING OUT OF MOVEMENTS IN A WIDE RANGE

Branch of the National Research University Moscow Power Engineering
Institute in Smolensk, Russia

Abstract. The article considers the synthesis of a control system with a non-linear position controller (NLPC) for a DC motor. The calculation of the controller was made with the refusal to use the intensity generator. A quantitative assessment of the ranges of movement was made depending on the settings of the regulators. Simulation has been used to evaluate the accuracy of task processing when adjusting the controllers to the technical optimum and when using a NLPC.

Key words: position controller, positional electric drive, non-linear controller, accuracy, speed.

References

- [1] M. Bychkov and V. Kuznetsova. Optimum and quasioptimum control of the position electric drive by criterion of electric losses minimum // 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWED.2018.8321393
- [2] B. Saha and B. Singh. A Position Sensorless Brushless DC Motor Drive with Inherent Torque Control for EV Application // 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES56012.2022.10080095
- [3] Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda. [Theory of the electric drive]. - 2nd ed. revised and additional — M.: Energoatomizdat, 2001. – 704 p.: ill.
- [4] Fomin N.V. Control systems for electric drives [Online]: URL: <https://studfile.net/preview/6217055/> (Accessed: May. 20, 2023)
- [5] Basharin A.A., Novikov V.A., Sokolovsky G.G. Upravleniye elektroprivodami [Electric drive control]. – L.: Energoizdat, 1982. – 392 p. (in Russian)
- [6] Rozhkov V., Fedotov V. Imitatsionnoye modelirovaniye adaptivnogo identifikatora skorosti asinkhronnogo dvigatelya aglomeratsionnoy mashiny [Simulation modeling of the adaptive speed identifier of an induction motor of a sintering machine]. *Prikladnaya informatika [Journal of Applied Informatics]*. – Vol.17. – No.6. – Pp.36-55, 2022 (in Russian).

УДК 621.311.1

DOI: 10.46960/apeen_2023_143

О.С. Хватов¹, А.Б. Дарьенков², Т.З. Билялетдинов¹

ОЦЕНКА ТОПЛИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Волжский государственный университет водного транспорта¹
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Аннотация. В статье проведены расчет и сравнительная оценка топливных показателей дизель-генераторных электростанций переменной частоты. Приведены энергетические диаграммы дизель-генераторных электростанций на основе асинхронного и синхронного генераторов переменной частоты вращения. Рассчитаны коэффициенты полезного действия элементов силовой структуры и электростанции в целом. Представлены гистограммы абсолютного расхода топлива электростанциями.

Ключевые слова: электростанция на основе асинхронного генератора переменной частоты вращения, нагрузочная диаграмма, топливные показатели, удельный и абсолютный расход топлива.

Развитие силовой полупроводниковой техники создало качественно новые возможности при разработке электротехнических генераторных комплексов. В частности, внедрение в практику транзисторных активных выпрямителей напряжения существенно расширило возможности по реализации силовой структуры генераторных комплексов, в том числе и дизель-генераторных электростанций переменной частоты вращения. Использование в составе силового оборудования дизель-генераторных электростанций активных выпрямителей напряжения позволяет успешно применять в качестве электрического генератора асинхронную машину, обладающую известными эксплуатационными преимуществами (стоимость, надежность, масса и др.) по сравнению с синхронной машиной. Отметим, что дизель-генераторные электростанции на базе асинхронной машины с активным выпрямителем напряжения являются бестрансформаторными комплексами генерирования, в отличие от аналогов с синхронными машинами, что является их важным конкурентным преимуществом.

Состав силового оборудования и топология силовой схемы дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения определяет ее основные эксплуатационные показатели (надежность, стоимость, масса, габариты и др.) [1,2]. Энергетические показатели, характеризующие эффективность использования углеводородного топлива, в отдельных случаях, могут быть приоритетными эксплуатационными показателями (электростанции автономных транспортных объектов, сложность транспортной логистики по доставке топлива и др.).

В статье авторами рассчитаны топливные показатели электростанций на базе асинхронного генератора переменной частоты вращения и проведено их

сравнение с соответствующими показателями у аналогов на основе синхронных машин.

Расчет топливных показателей основан на определении текущего значения мощности дизельного двигателя генераторной электростанции с учетом нагрузочной диаграммы и тахограммы ее работы, а также состава элементов силового оборудования. В качестве варианта для расчета топливных показателей выбрана дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения на базе асинхронной короткозамкнутой машины и полупроводникового преобразователем с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения (Π_1). Энергетическая диаграмма данной электростанции представлена на рис. 1.

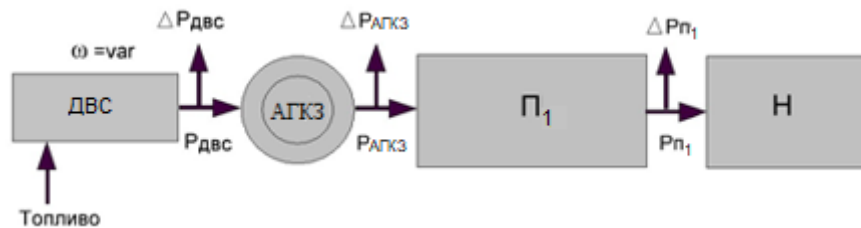


Рис. 1. Энергетическая диаграмма электростанции на базе асинхронного генератора переменной частоты вращения:

ДВС – двигатель внутреннего сгорания; АГКЗ – асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором; Π_1 – полупроводниковый преобразователь; Н – нагрузка; $P_{ДВС}$; $P_{АГКЗ}$; P_{Π_1} – соответственно мощность ДВС, АГКЗ, Π_1 ; $\Delta P_{ДВС}$, $\Delta P_{АГКЗ}$, ΔP_{Π_1} – соответственно потери мощности ДВС, АГКЗ, Π_1 .

Дизель-генераторная электростанция на базе синхронного генератора переменной частоты вращения содержит в своем составе полупроводниковый преобразователь на основе неуправляемого выпрямителя, широтно-импульсного преобразователя и автономного инвертора напряжения (Π_2). В состав силового оборудования также входит повышающий трансформатор (Т). Энергетическая диаграмма дизель-генераторной электростанции на базе синхронного генератора переменной частоты вращения представлена на рис. 2. Оценка топливных показателей электростанций данного типа представлена в [1,2].

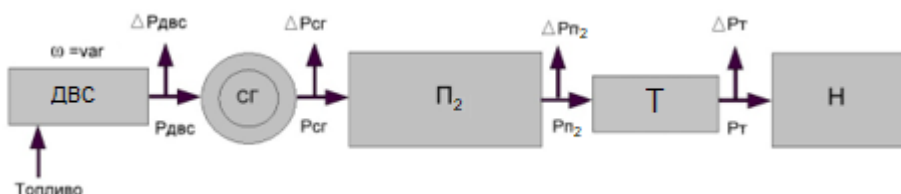


Рис. 2. Энергетическая диаграмма электростанции на базе синхронного генератора переменной частоты вращения:

ДВС – двигатель внутреннего сгорания; СГ – синхронный генератор; Π_2 – полупроводниковый преобразователь; Т – трансформатор; Н – нагрузка; $P_{ДВС}$, $P_{СГ}$, P_{Π_2} , $P_Т$ – соответственно мощность ДВС, СГ, Π_2 , Т; $\Delta P_{ДВС}$, $\Delta P_{СГ}$, ΔP_{Π_2} , $\Delta P_Т$ – соответственно потери мощности ДВС, СГ, Π_2 , Т.

Методика расчета топливных показателей основана на определении коэффициентов полезного действия элементов силового оборудования в составе энергетической структуры электростанции: электрического генератора (асинхронного η_{AG} или синхронного типа $\eta_{СГ}$), полупроводникового преобразователя с учетом его силовой схемы $\eta_{П}$ и трансформатора $\eta_{Т}$ (для варианта П₂ с широтно-импульсным преобразователем). Для заданной нагрузочной диаграммы электростанции получена соответствующая тахограмма - временная зависимость формируемой энергоэффективной частоты вращения двигателя внутреннего сгорания на долевых нагрузочных режимах. Данная тахограмма и нагрузочная диаграмма изображены на рис. 3 [1,2].

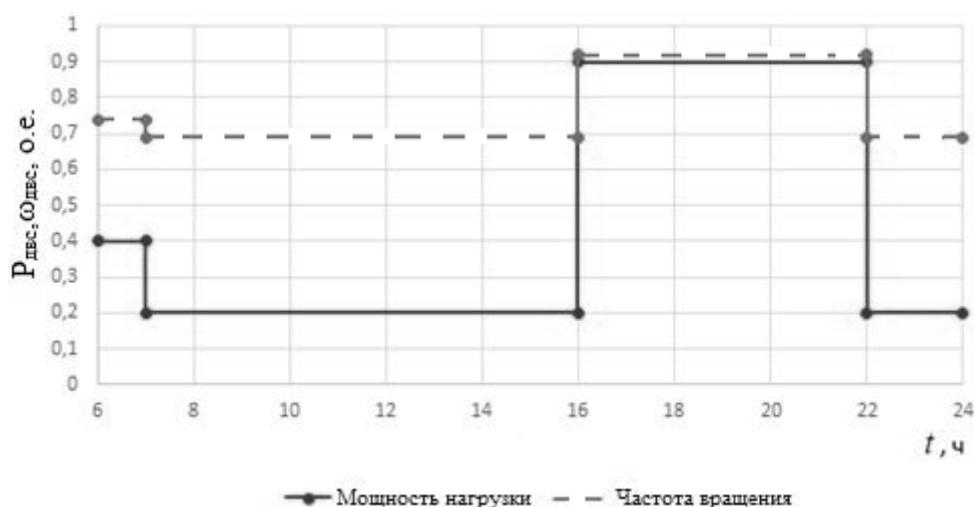


Рис. 3. Нагрузочная диаграмма и тахограмма электростанции переменной частоты вращения

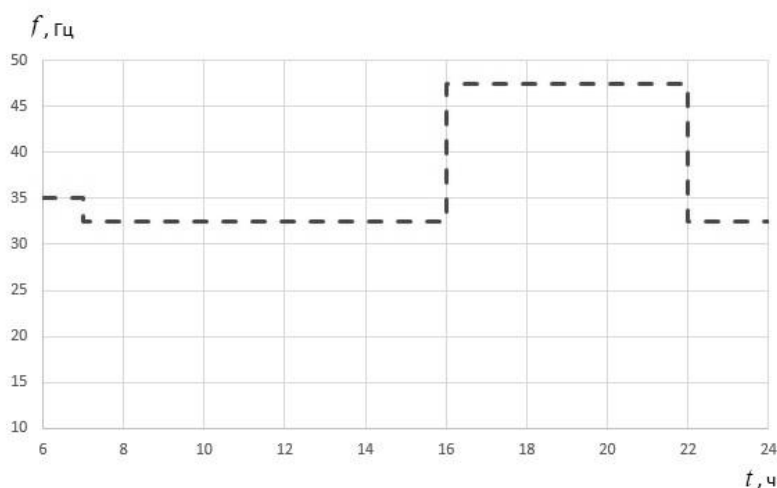


Рис.4. Зависимость частоты напряжения в статоре генератора от нагрузочной диаграммы и тахограммы электростанции

Зависимости коэффициентов полезного действия элементов силового оборудования определяются как функционалы нагрузки на каждой ступени нагрузочной диаграммы, при этом учитывается, что электрический генератор работает

при регулируемой частоте вращения вала, т.е. при переменном значении частоты и величины напряжения в статоре, как показано на рис. 4. Таким образом, коэффициент полезного действия генератора зависит как от нагрузки электростанции, так и от частоты его вращения.

На рис. 5-8 представлены расчетные зависимости коэффициентов полезного действия: асинхронного и синхронного генераторов (η_{AG} и η_{CG}), полупроводниковых преобразователей на основе активного выпрямителя Π_1 (η_{Π_1}) и широтно-импульсного преобразователя Π_2 (η_{Π_2}), а также трансформатора T (η_T).

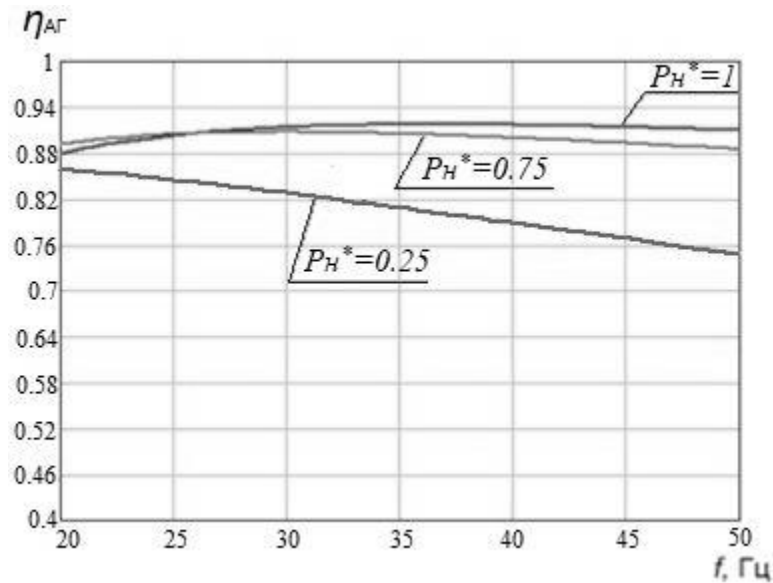


Рис. 5. Зависимость η_{AG} от частоты напряжения в статоре для различной мощности нагрузки

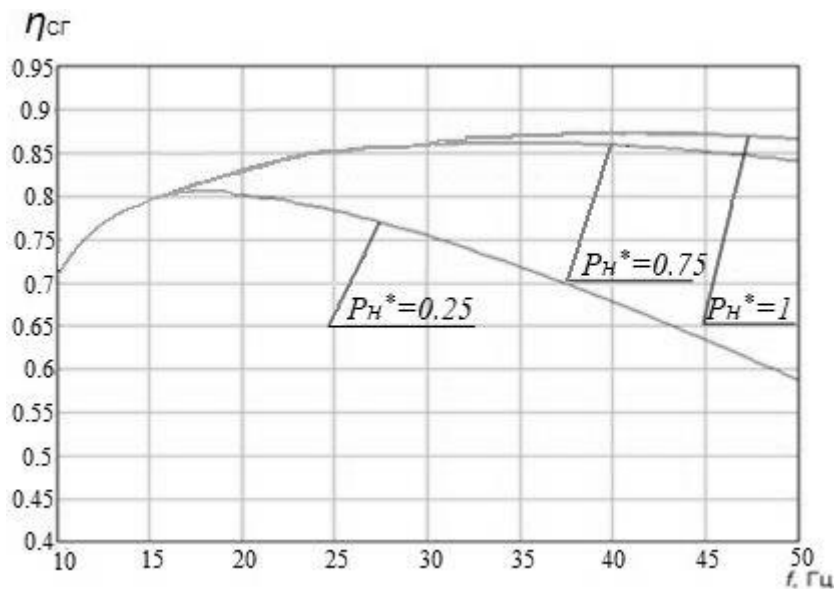


Рис. 6. Зависимость η_{CG} от частоты напряжения в статоре для различной мощности нагрузки

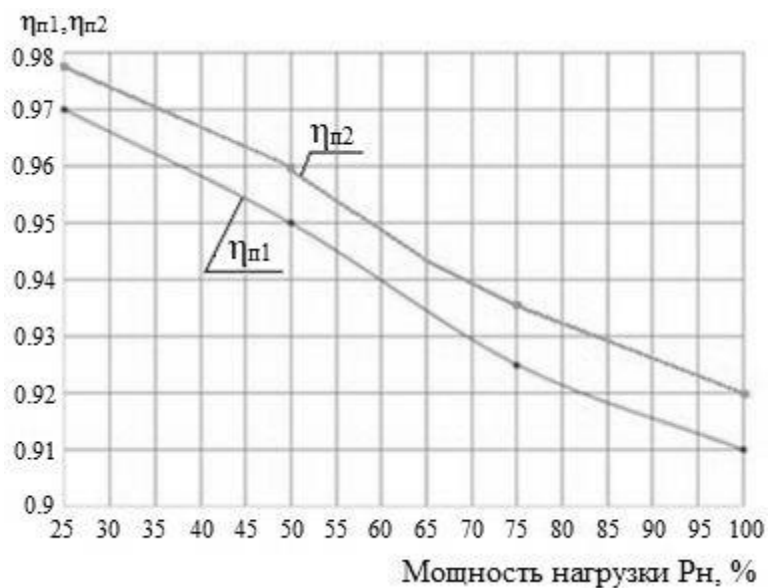


Рис. 7. Зависимости η_{n1} и η_{n2} полупроводниковых преобразователей от мощности нагрузки



Рис. 8. Зависимость η_T трансформатора от мощности нагрузки

На основании зависимостей, изображенных на рис. 5-8, для вариантов электростанции мощностью 40 кВт определена потребная мощность на валу двигателя внутреннего сгорания, график которой представлен на рис. 9, в соответствии с заданной нагрузочной диаграммой, тахограммой работы и общим коэффициентом полезного действия электростанции:

на базе асинхронного генератора

$$\eta = \eta_{AG} \cdot \eta_{n1}; \tag{1}$$

и на базе синхронного

$$\eta = \eta_{сг} \cdot \eta_{n2} \cdot \eta_{т}. \tag{2}$$

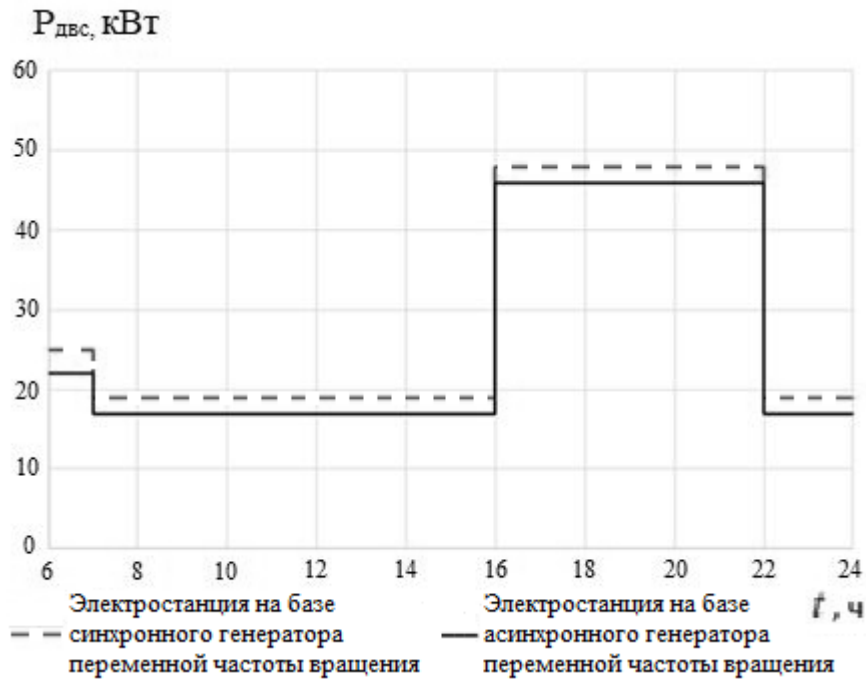


Рис. 9. Зависимости мощности на валу ДВС от нагрузочной диаграммы и тахограммы электростанции переменной частоты вращения

Временная зависимость удельного расхода топлива двигателя внутреннего сгорания для заданного графика нагрузки электростанции, который приведен на рис. 3 определена в соответствии с его многопараметровой характеристикой [2] и представлена на рис. 10.

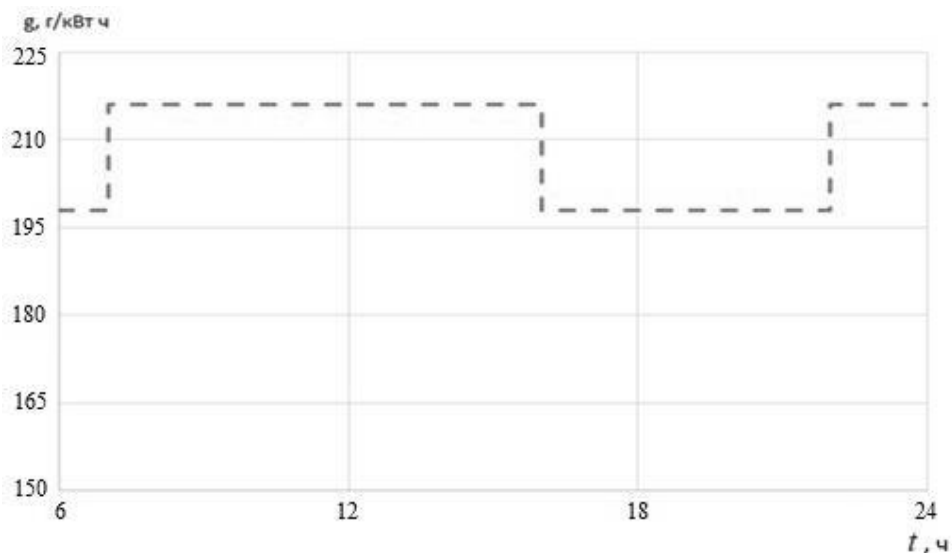


Рис. 10. Удельное потребление топлива ДВС в составе электростанции переменной частоты вращения

На рис. 11 приведены гистограммы абсолютного расхода топлива ДВС в составе электростанций на основе асинхронного и синхронного генераторов переменной частоты вращения за цикловой период (24 часа) работы.

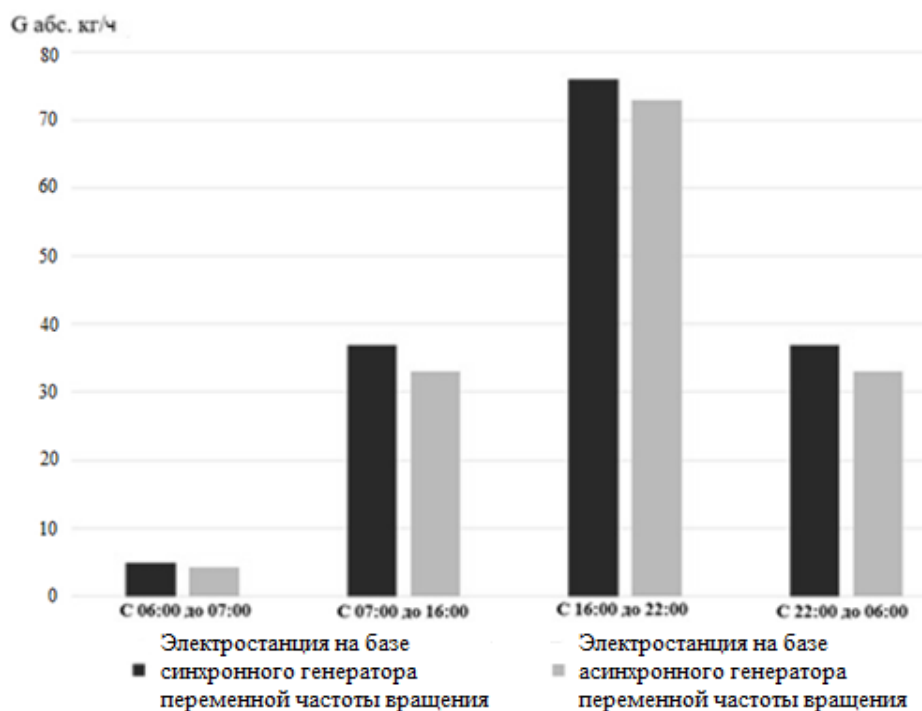


Рис. 11. Гистограммы абсолютного расхода топлива ДВС в составе электростанций переменной частоты вращения

Анализ гистограмм показывает, что вариант электростанции на базе асинхронного генератора переменной частоты вращения обладает повышенной топливной эффективностью по сравнению с электростанцией на базе синхронного.

Отметим, что топливные показатели являются важными, но не единственными в ряду эксплуатационных показателей. Надежность, стоимость, масса и габариты в отдельных случаях могут быть не менее важными для определения выбора конкретной силовой структуры генераторного комплекса. Задача данного выбора является многофакторной и должна решаться в каждом отдельном случае с учетом приоритетных требований к конкретному объектному применению электростанции переменной частоты вращения [3-6].

Библиографический список

1. Дарьенков, А.Б. Повышение эффективности автономных генераторных установок на основе ДВС переменной частоты вращения. Автореф. дисс. доктора техн. наук. – Н.Новгород, 2020. – 40 с.
2. Хватов, О.С., Дарьенков, А.Б., Самоявчев, И.С., Поляков, И.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: моногр. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. – 172 с.
3. Хватов, О.С., Дарьенков, А.Б. Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения // Электротехника. – 2016. – № 3. – С. 35-40.
4. Хватов, О.С., Кобяков, Д.С., Тарпанов, И.А. Дизель-генераторная электростанция с вентильным генератором по схеме машины двойного питания // Вестник АГТУ. Морская техника и технологии. – 2020. – № 3. – С. 82-90.

-
5. **Хватов, О.С.** Электротехнические генераторные комплексы переменной частоты вращения на основе машины двойного питания: моногр. – Н.Новгород: ВГУВТ, 2015. – 276 с.
 6. **Обухов, С.Г.** Повышение эффективности комбинированных автономных систем электропитания с возобновляемыми источниками энергии: дисс. ... доктора техн. наук 05.09.03. НИТПУ. – Томск, 2013. – 392 с.

O.S. Khvatov¹, A.B. Darienkov², T.Z. Bilyaletdinov¹

EVALUATION OF FUEL PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS POWER PLANTS OF VARIABLE SPEED

Volga State University of Water Transport¹
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev²

Abstract. The calculation and comparative evaluation of fuel indicators of diesel generator power plants of variable frequency are carried out in the article. The energy diagrams of asynchronous and synchronous diesel generator power plants of variable speed are given. The efficiency coefficients of the elements of the power structure and the power plant as a whole are calculated. Histograms of absolute fuel consumption by power plants are presented.

Keywords: asynchronous power plant of variable speed, load diagram, fuel indicators, specific and absolute fuel consumption.

References

- [1] A.B. Darienkov, Improving the efficiency of autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines. Autoref. diss. Doctors of Technical Sciences. N.Novgorod, 2020.
- [2] O. S. Khvatov, A. B. Darienkov, I. S. Samoyavchev and I. S. Polyakov, Autonomous generator sets based on variable-speed internal combustion engines: monogr. N. Novgorod: Publishing House of the R. E. Alekseev NSTU, 2016. 172 p.
- [3] O. S. Khvatov and A. B. Darienkov, Unified power plant of a transport facility with electric propulsion based on a diesel generator set of variable speed // Electrical engineering. 2016. No. 3. pp. 35-40.
- [4] O. S. Khvatov, D. S. Kobayakov and I.A. Tarpanov, Diesel generator power plant with a valve generator according to the scheme of a dual-power machine. Bulletin of the AGTU. Marine Engineering and Technology, No.3, 2020, pp.82-90.
- [5] O.S. Khvatov, Electrotechnical generator sets of variable speed based on a dual-power machine: monogr. N.Novgorod: VGUVT Publishing House, 2015. 276 p.
- [6] S.G. Obukhov, Improving the efficiency of combined autonomous power supply systems with renewable energy sources: diss. ... Doctor of Technical Sciences 05.09.03. NITPU. – Tomsk, 2013. – 392 p.

А.Е. Храмов, А.С. Плехов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье излагаются результаты разработки и исследования управляемой системы виброзащиты, которая может быть применена в качестве виброизолирующей опоры дизельной установки с переменной частотой вращения вала двигателя. Описан принцип работы виброизолирующего устройства на основе магнитореологической жидкости. Разработаны имитационные модели пассивной и управляемой систем виброзащиты в среде *MatLab / Simulink*. Приведены результаты имитационного исследования динамических процессов указанных систем.

Ключевые слова: дизель-генератор, магнитореологические жидкости, управляемые системы виброзащиты, контроллер нечеткой логики, параметры вибрации.

В условиях современного непрерывного научно-технологического прогресса создаются все более совершенные виды технических устройств. Вместе с этим наблюдается ужесточение требований по ограничению значений параметров вибрационных полей, таких как виброперемещение, виброскорость и виброускорение [1, с 8-15]. В отдельных отраслях промышленности, например, в прецизионном производстве, традиционные пассивные системы виброзащиты, такие как обычные стальные пружинные изоляторы или опоры типа «металл-резина» не обеспечивают необходимого гашения вибраций [2]. Кроме этого, применение данного вида виброизолирующих устройств оказывается нецелесообразным при возбуждении колебаний в области низких частот, а также при действии вибрации с широким спектром.

Как правило, любое электротехническое устройство, включая дизель-генераторную установку (ДГУ), является источником вибрационных колебаний. Последние оказывают неблагоприятное действие не только на саму ДГУ, но и влияют на здоровье и самочувствие человека. Например, длительное воздействие вибрации на оператора, который находится в непосредственной близости от виброактивного объекта, может привести к серьезным последствиям, таким как онемение пальцев рук и ног, отклонение ритма сердцебиения, ухудшение зрения [3, с. 23].

В целом, дизельная установка является источником виброколебаний, которые расположены в диапазоне частот (0...1000) Гц [4]. Следует подчеркнуть, что наиболее ощутимое влияние на человека-оператора оказывают вибрации, которые находятся в интервале (0...30) Гц [3, с. 366]. Причем особо опасны колеба-

ния в диапазоне (0...10) Гц [5, с. 120]. Данное утверждение объясняется совпадением отдельных значений в приведенном частотном интервале с естественными частотами колебаний органов человека.

При указанных частотах вибровозмущений пассивные системы изоляции не способны снижать вибрации, так как в низкочастотном диапазоне коэффициент передачи вибрации традиционных изоляторов примерно равен единице. Ввиду этого появляется необходимость создания иных методов и средств виброзащиты. Актуальным можно считать разработку управляемых виброизоляторов, которые обладают небольшими массогабаритными показателями, пониженным энергопотреблением и позволяют за малый промежуток времени изменять свои жесткостные и демпфирующие свойства.

Авторами разработана технологическая схема управляемого виброизолятора, которая изображена на рис. 1.

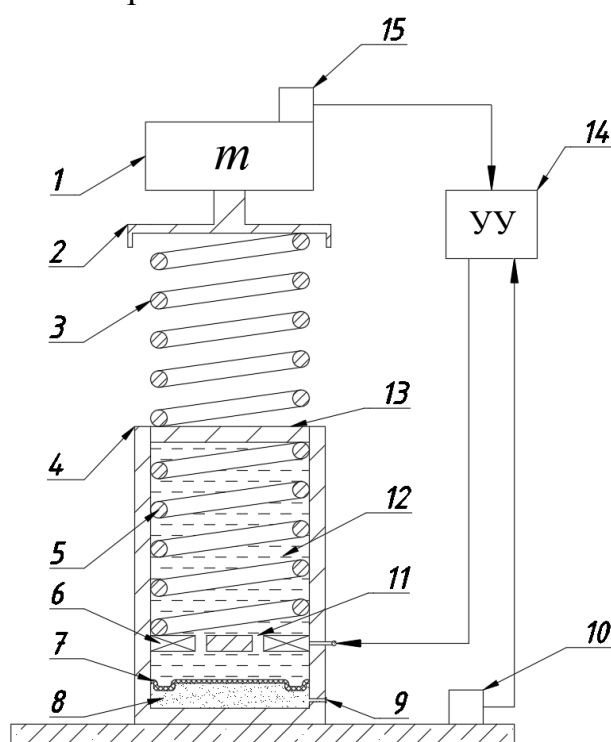


Рис. 1. Технологическая схема управляемого виброизолятора;

- 1 – объект виброзащиты; 2 – посадочное место пружины; 3 – верхняя пружина;
- 4 – корпус изолятора; 5 – нижняя пружина; 6 – электромагнит; 7 – диафрагма; 8 – камера газовая; 9 – клапан газовый; 10 – датчик вибрации основания; 11 – демпфирующие каналы;
- 12 – рабочая жидкость; 13 – перегородка разделительная; 14 – управляющее устройство;
- 15 – датчик вибрации объекта вибровозмущений

Из рис. 1 можно отметить, что представленный виброизолятор спроектирован путем последовательного соединения пружин 3 и 5. Последние при колебаниях объекта 1 массой m , кг, попеременно сжимаются-растягиваются. При этом разделительная перегородка 13 перемещается, а диафрагма 7 под давлением магнитореологической жидкости (МРЖ) изгибается.

Также МРЖ 12 через демпферные каналы 11 перетекает из одной полости в другую. Вязкость магнитореологической жидкости регулируется с помощью магнитного поля электромагнита б.

Сущность разработанного виброизолятора заключается в том, что при изменении вязкости МРЖ, можно регулировать суммарную жесткость опоры. Выполняется это следующим образом. Сначала обозначим жесткость верхней пружины 3 как c_1 , Н/м, а у нижней пружины 5 - c_2 , Н/м. Так как эти два упругих элемента соединены последовательно, то их суммарная жесткость будет определяться равенством (1)

$$c_{\text{общ}} = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2}. \quad (1)$$

Как показывает (1) – это наименьшая величина $c_{\text{общ}}$, Н/м, которую имеет виброизолятор при отсутствии управляющего тока $I_{\text{эм}}$, А, электромагнита. Если начать увеличивать ток до некоторого среднего значения $I_{\text{эм}}^{\text{сред}}$, А, то нижняя пружина 5 по рис. 1 будет сжиматься в меньшей степени, так как сила демпфирования МРЖ $F_{\text{мрж}}$, Н, увеличится, а значит жидкость через каналы 11 будет протекать при большей силе со стороны нагрузки 1. Если увеличить силу тока до некоторого максимального значения $I_{\text{эм}}^{\text{макс}}$, А, то каналы 11 закроются – нижняя пружина будет заблокирована, и жесткость всей опоры будет определяться величиной c_1 , Н/м.

Для исследования разработанного виброизолятора (рис. 1), создана имитационная модель управляемой системы виброзащиты, которая показана на рис. 2.

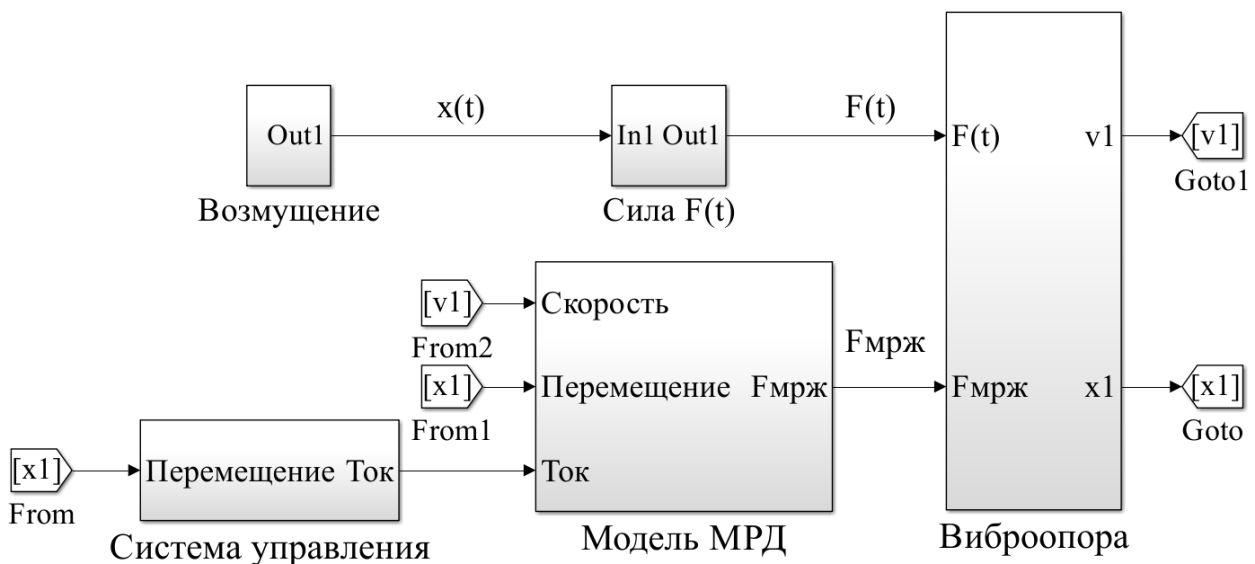


Рис. 2. Имитационная модель управляемого виброизолятора

По рис. 2 отметим, что виброопора имеет собственную систему управления на основе нечеткого контроллера (рис. 3), который синтезирован с помощью подпрограммы *Fuzzy Logic Designer* системы *MatLab*.

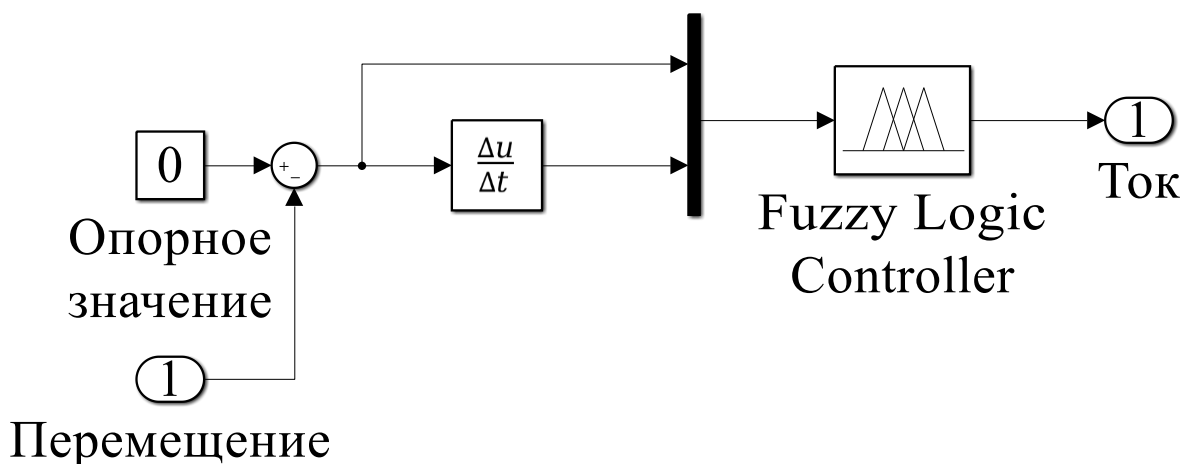


Рис. 3. Блок «Система управления»

Для сравнительной оценки степени гашения вибраций управляемым виброизолятором, одновременно проводилось имитационное исследование пассивной опоры – стальной пружины, схема которой в нотации *MatLab* показана на рис. 4.

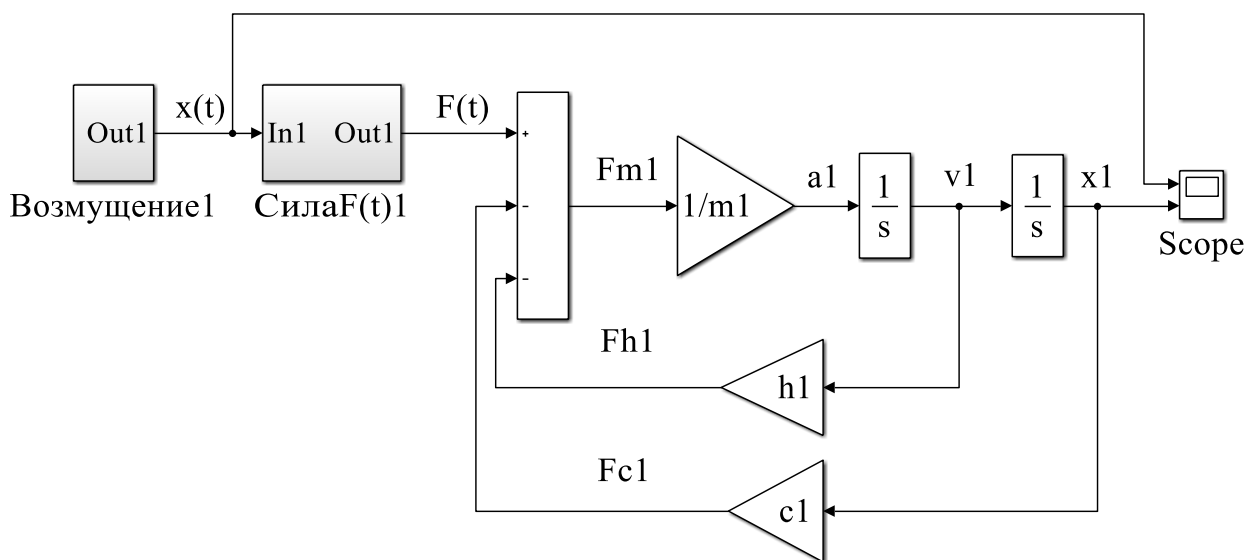


Рис. 4. Имитационная модель пассивной системы виброзащиты

Исследования указанных систем проводилось при различных типах возмущающего воздействия: синусоидальное виброперемещение с амплитудой 3 мм и частотой 40 Гц и 5 Гц; случайный негармонический сигнал; виброперемещение типа «белый шум». На рис. 5-8 представлены полученные на модели диаграммы возмущающего воздействия – виброперемещения $s_{\text{возм}}(t)$, м, результирующей вибрации при применении пассивной $s_{\text{пс}}(t)$, м, и управляемой $s_{\text{yc}}(t)$, м, систем виброзащиты.

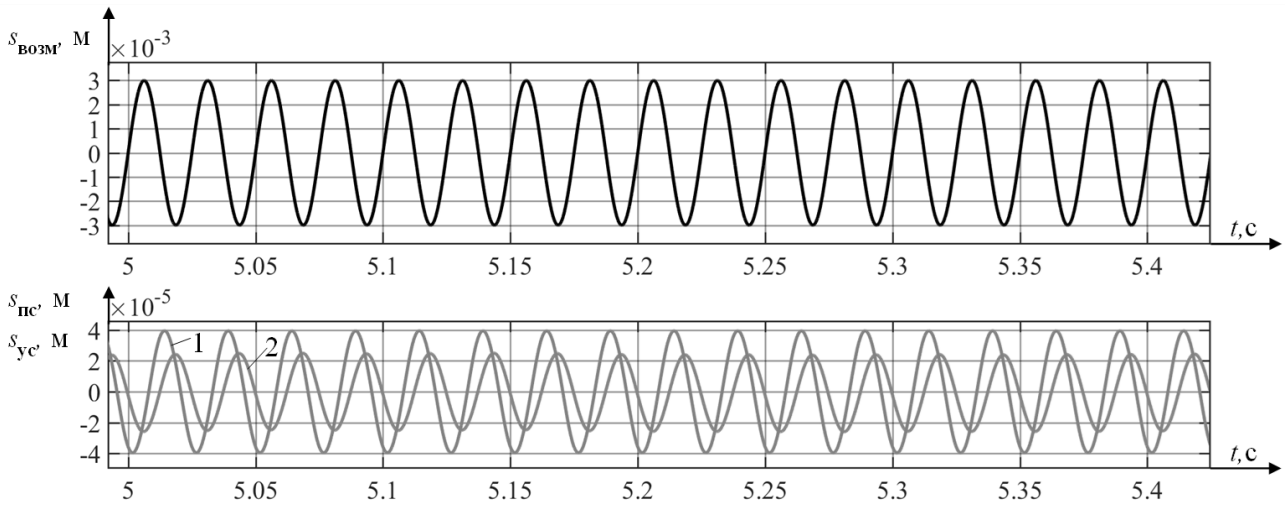


Рис. 5. Осциллограммы виброперемещений при синусоидальном воздействии с частотой 40 Гц:

- 1 – виброперемещение объекта при применении управляемой опоры;
- 2 – виброперемещение объекта при применении пассивной опоры

Рис. 5 показывает следующее: при скорости вращения вала двигателя 2400 об/мин, виброзащитные системы пассивного и управляемого типов снижают синусоидальную вибрацию до допустимых значений [4].

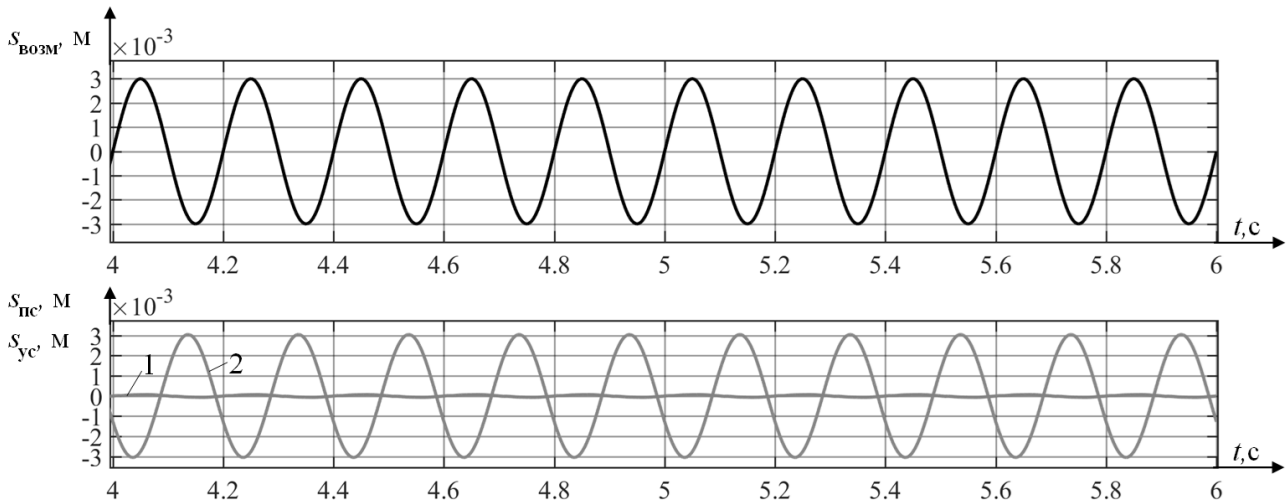


Рис. 6. Осциллограммы виброперемещений при синусоидальном воздействии с частотой 5 Гц:

- 1 – виброперемещение объекта при применении управляемой опоры;
- 2 – виброперемещение объекта при применении пассивной опоры

Как видно из рис. 6, управляемая система виброзащиты примерно в 45 раз снижает исходную вибрацию, по сравнению с пассивной опорой.

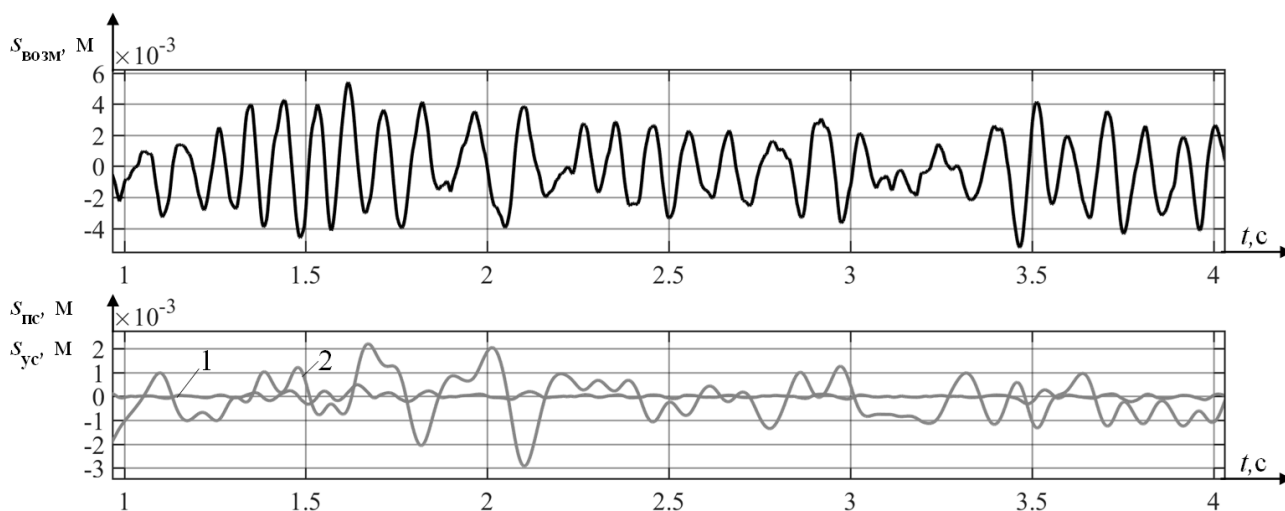


Рис. 7. Осциллограммы виброперемещений при случайном воздействии:

- 1 – виброперемещение объекта при применении управляемой опоры;
- 2 – виброперемещение объекта при применении пассивной опоры

Как показано на рис. 7, результирующие колебания виброактивного объекта на управляемых опорах значительно меньше (в среднем в 20-30 раз), чем на обычных изоляторах.

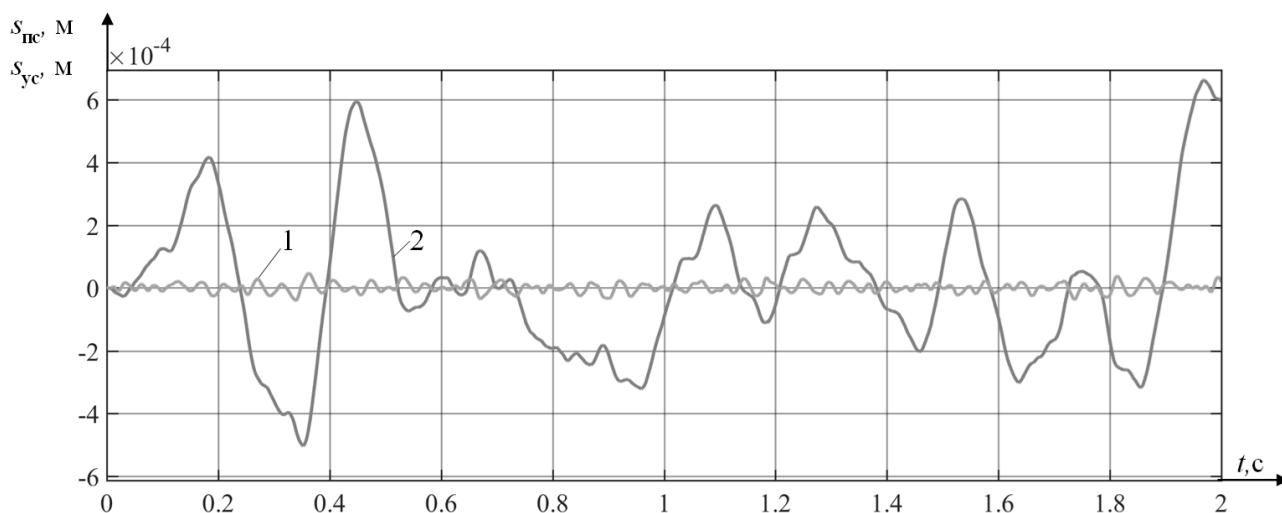


Рис. 8. Осциллограммы виброперемещений при воздействии типа «белый шум»:

- 1 – виброперемещение объекта при применении управляемой опоры;
- 2 – виброперемещение объекта при применении пассивной опоры

Выводы

1. Пассивная система виброзащиты позволяет подавлять вибрации средней и высокой частоты (15 Гц и выше). Однако на низких частотах в диапазоне (0...15) Гц такие системы не обеспечивают гашение колебаний.

2. Управляемая система виброзащиты с регулированием тока электромагнита на основе нечеткой логики позволяет снижать вибрацию виброактивного объекта как в области низких, так и в области высоких частот. Отметим, что в

диапазоне частот (0...10) Гц такая опора способна в 20 - 45 раз снижать колебания нагрузки по сравнению с пассивным виброизолятором. Это особенно важно, когда стоит задача обеспечения нормированного вибрационного фона на рабочем месте оператора согласно ГОСТ 31319- 2006 «Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах» [6].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00372-П, <https://rscf.ru/project/20-19-00372/>.

Библиографический список

1. **Куцубина, Н.В.** Теория виброзащиты и акустической динамики машин: учеб. пособие / Н. В. Куцубина, А. А. Санников. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2014. –167 с.
2. **Жуков, Ю.А.** Виброзащита прецизионного оборудования космических аппаратов от внутренних источников возмущений / Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, С.А. Матвеев, Н.С. Слободзян, О.В. Ширококов // Космические аппараты и технологии. – 2021. – № 4 (38). – С.217-226.
3. **Челомей, В. Н.** Вибрации в технике: справочник в 6-ти томах / В. Н. Челомей [и др.]. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. – 456 с.
4. ГОСТ Р ИСО 8528-9-2021. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния. – М.: Стандартиформ, 2021. – 16 с.
5. **Платонов, А.В.** Безопасность жизнедеятельности: учеб. пособие / А.В. Платонов, Е.Н. Филонин. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. – 345 с.
6. ГОСТ 31319- 2006. Вибрация. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах. – М.: Стандартиформ, 2008. – 23 с.

A.E. Khramov, A.S. Plekhov

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A VIBRATION ISOLATION SYSTEM FOR A VARIABLE-SPEED DIESEL POWER PLANT

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

Abstract. The article presents the results of the development and research of a controlled vibration protection system, which can be used as a vibration-isolating support of a diesel plant with variable engine shaft speed. The principle of operation of a vibration isolating device based on a magnetorheological fluid is described. Simulation models of passive and controlled vibration protection systems have been developed in the MatLab/Simulink software. The results of a simulation study of the dynamic processes of these systems are presented.

Keywords: diesel generator, magnetorheological fluids, controlled vibration protection systems, fuzzy logic controller, vibration parameters.

References

- [1] Kutsubina N.V., Sannikov A. A. Teoriya vibrozashchity i akusticheskoy dinamiki mashin: ucheb. posobiye [Theory of vibration protection and acoustic dynamics of machines: textbook manual]. – UGLTU. – Yekaterinburg, 2014. - 167 p. (in Russian)
- [2] Zhukov Yu.A., Korotkov E.B., Matveev S.A., Slobodzyan N.S., Shirobokov O.V. Vibrozashchita pretsizionnogo kosmicheskogo oborudovaniya [Vibration protection of precision equipment of spacecraft from internal sources of disturbances] // Space vehicles and technologies, No. 4(38), pp. 217-226, 2021. (in Russian)
- [3] Chelomey, V. N. [et al.] Vibratsii v tekhnike: spravochnik v 6-ti tomakh [Vibrations in technology: handbook in 6 volumes]. – Moscow: Mashinostroenie, 1981. – Vol. 6. – 456p. (in Russian)
- [4] GOST R ISO 8528-9-2021. Elektroagregaty generatornyie peremennogo toka s privodom ot dvigatelya vnutrennego sgoraniya. Chast' 9. Izmereniya vibratsii i otsenka vibratsionnogo sostoyaniya [Alternator electric units driven by an internal combustion engine. Part 9. Vibration measurements and evaluation of the vibration state]. - Moscow : Standartinform, 2021. – 16 p. (in Russian)
- [5] Platonov A.V., Filonin E.N. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: ucheb. posobiye [Life safety: studies. manual] - NSTU n. a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2012. – 345 p. (in Russian)
- [6] GOST 31319- 2006. Vibratsiya. Izmereniye obshchey vibratsii i otsenka yeyo vozdeystviya na cheloveka. Trebovaniya k provedeniyu izmereniy na rabochikh mestakh [Vibration. Measurement of total vibration and assessment of its impact on a person. Requirements for measurements in the workplace]. - Moscow : Standartinform, 2008. – 23p. (in Russian)

Л.Н. Языкова, И.В. Музылева, В.Н. Мещеряков, Е.Г. Митин

КОРРЕКЦИЯ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Липецкий государственный технический университет

Аннотация. В статье предлагается универсальный метод обобщенного анализа машин переменного тока, в том числе асинхронного двигателя, который может быть использован в инженерной практике для анализа сложных электромеханических систем, математические модели которых могут быть представлены блок-схемами, содержащими перекрестные обратные связи. Предлагается применение гибкой обратной связи, обеспечивающей подавление колебаний. Проведен численный эксперимент для режима пуска двигателя.

Ключевые слова: электропривод, векторное управление, математическое моделирование, структурно-топологический анализ, метод пространства состояний.

Введение

Асинхронный электропривод и мехатронные системы на его основе являются самым массовым типом электромеханического преобразователя. Большое количество этих систем работает при периодическом изменении нагрузки. Кроме того, для них характерны периоды работы и останова. В таких условиях ухудшаются энергетические показатели системы. В частности, в широком диапазоне изменяется температура компонентов двигателя [1]. Это является темой отдельного сложного исследования. Примером может служить исследование термического ресурса изоляции обмотки двигателя [2].

На металлургических предприятиях, на мостовых кранах есть колебания момента и скорости асинхронного электропривода. Это ограничивает область применения системы скалярного управления. Для подавления этих колебаний разрабатываются специальные методы подавления указанных колебаний [3]. Одним из таких методов является система коррекции напряжения в функции вычисляемого электромагнитного момента [4].

Работа электроприводов с резко переменной нагрузкой вызывает колебания напряжения электрической сети. Колебания сети нарушают нормальную работу электрооборудования, уменьшают срок службы электронной аппаратуры и плохо воздействуют на зрение работников [5, 6].

Кроме того, нагрев двигателя из-за колебаний приводит к изменению сопротивления его обмоток. Неучет этого фактора ведет к снижению качества управления. Это изменение электромагнитного момента и снижение диапазона регулирования скорости. Следовательно, наличие колебаний приводит к необходимости проведения уточняющих расчетов параметров двигателей [7]. Например, при наличии колебаний и соответствующих потерь, сопротивление ротора и статора асинхронного двигателя могут изменяться в 1,5...2 раза по сравнению

с их номинальными значениями. При этом работоспособность электропривода резко снижается. Для обеспечения работоспособности привода осуществляют идентификацию сопротивлений в реальном времени [8, 9]. Полученные оценки используют в алгоритмах управления, что приводит к их усложнению.

В работе [10] методом компьютерного моделирования в MATLAB/SIMULINK исследованы существующие способы частотного управления асинхронного двигателя. Для исследования в данной работе взят двигатель с мощностью 30 кВт. Анализ механических и электромеханических характеристик показал следующие результаты. Во всех системах управления имеют место колебательные процессы, негативно сказывающиеся на энергетических показателях.

Таким образом, тема поиска эффективного метода подавления колебаний в электромагнитной системе асинхронного двигателя является чрезвычайно актуальной.

Материалы и методы

Математическое описание асинхронного двигателя в матричной форме является наиболее компактным [11]. В уравнениях (1) – (4):

\dot{U}_1 – результирующий вектор напряжения статора; \dot{I}_1 – результирующий вектор тока статора; \dot{I}'_2 – результирующий вектор нормализованного тока ротора; $\dot{\Psi}_1$ – результирующий вектор потокосцепления статора; $\dot{\Psi}_2$ – результирующий вектор потокосцепления ротора; R_1, R'_2 – активные сопротивления статора и ротора, приведенного к статору; $\dot{I}_{1a}, \dot{I}_{1b}, \dot{I}_{1c}, \dot{I}'_{2a}, \dot{I}'_{2b}, \dot{I}'_{2c}$; $\dot{\Psi}_{1a}, \dot{\Psi}_{1b}, \dot{\Psi}_{1c}, \dot{\Psi}_{2a}, \dot{\Psi}_{2b}, \dot{\Psi}_{2c}$ – фазовые токи и потокосцепления статора и ротора; $L_1, L_{1\sigma}$ – полная индуктивность и индуктивность рассеяния статора; $L'_2, L'_{2\sigma}$ – полная индуктивность и индуктивность рассеяния ротора, приведенные к статору; L_m – взаимная индуктивность обмоток ротора и статора.

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= R_1 \cdot \dot{I}_1 + \frac{d}{dt} \dot{\Psi}_1; \\ 0 &= \dot{I}'_2 \cdot R'_2 + \frac{d}{dt} \dot{\Psi}_2; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Psi}_1 &= L_1 \cdot \dot{I}_1 + L_m \cdot \dot{I}'_2; \\ \dot{\Psi}_2 &= L_m \cdot \dot{I}_1 + L'_2 \cdot \dot{I}'_2; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \begin{bmatrix} \dot{U}_{1a} \\ \dot{U}_{1b} \\ \dot{U}_{1c} \end{bmatrix}; \quad \dot{I}_1 = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1a} \\ \dot{I}_{1b} \\ \dot{I}_{1c} \end{bmatrix}; \quad \dot{\Psi}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{1a} \\ \dot{\Psi}_{1b} \\ \dot{\Psi}_{1c} \end{bmatrix}; \\ \dot{I}'_2 &= \begin{bmatrix} \dot{I}'_{2a} \\ \dot{I}'_{2b} \\ \dot{I}'_{2c} \end{bmatrix}; \quad \dot{\Psi}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{2a} \\ \dot{\Psi}_{2b} \\ \dot{\Psi}_{2c} \end{bmatrix}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L_{1\sigma} + L_m; \\ L'_2 &= L'_{2\sigma} + L_m. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для аналитических исследований наиболее удобной представляется система координат X, Y, вращающаяся со скоростью, равной установившейся скорости электромагнитного поля статора [11, 12]. Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в асинхронном двигателе, имеет вид:

$$U_{1x}(p) = i_{1x}(p) \cdot R_1 + p \cdot \Psi_{1x}(p) - \omega_1(p) \cdot \Psi_{1y}(p); \quad (5)$$

$$U_{1y}(p) = i_{1y}(p) \cdot R_1 + p \cdot \Psi_{1y}(p) + \omega_1(p) \cdot \Psi_{1x}(p); \quad (6)$$

$$0 = i'_{2x}(p) \cdot R'_2 + p \cdot \Psi_{2x}(p) - S(p) \cdot \omega_1(p) \cdot \Psi_{2y}(p); \quad (7)$$

$$0 = i'_{2y}(p) \cdot R'_2 + p \cdot \Psi_{2y}(p) + S(p) \cdot \omega_1(p) \cdot \Psi_{2x}(p); \quad (8)$$

$$S(p) = \frac{\omega_1(p) - \omega(p)}{\omega_1(p)} = \frac{\Delta\omega(p)}{\omega_1(p)}; \quad (9)$$

$$\Psi_{1x}(p) = L_1 \cdot i_{1x}(p) + L_m \cdot i'_{2x}(p); \quad (10)$$

$$\Psi_{1y}(p) = L_1 \cdot i_{1y}(p) + L_m \cdot i'_{2y}(p); \quad (11)$$

$$\Psi_{2x}(p) = L'_2 \cdot i'_{2x}(p) + L_m \cdot i_{1x}(p); \quad (12)$$

$$\Psi_{2y}(p) = L'_2 \cdot i'_{2y}(p) + L_m \cdot i_{1y}(p). \quad (13)$$

Уравнения для момента двигателя и уравнение вращения ротора имеют вид:

$$M(p) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot p_n \cdot (\Psi_{2x}(p) \cdot i_{1y}(p) - \Psi_{2y}(p) \cdot i_{1x}(p)); \quad (14)$$

$$M(p) - M_c(p) = p \cdot J \cdot \omega(p), \quad (15)$$

где $\omega_1(p) = \omega_k(p)$ – скорость вращения поля статора и системы координат; J – момент инерции двигателя; $\omega(p)$ – скорость ротора; p_n – количество пар полюсов. Структурная схема, построенная при условии, что вектор напряжения расположен на оси X, когда $U_{1y}(p) = 0$, показана на рис. 1. В таблице 1 приведены передаточные функции и коэффициенты элементов структурной схемы.

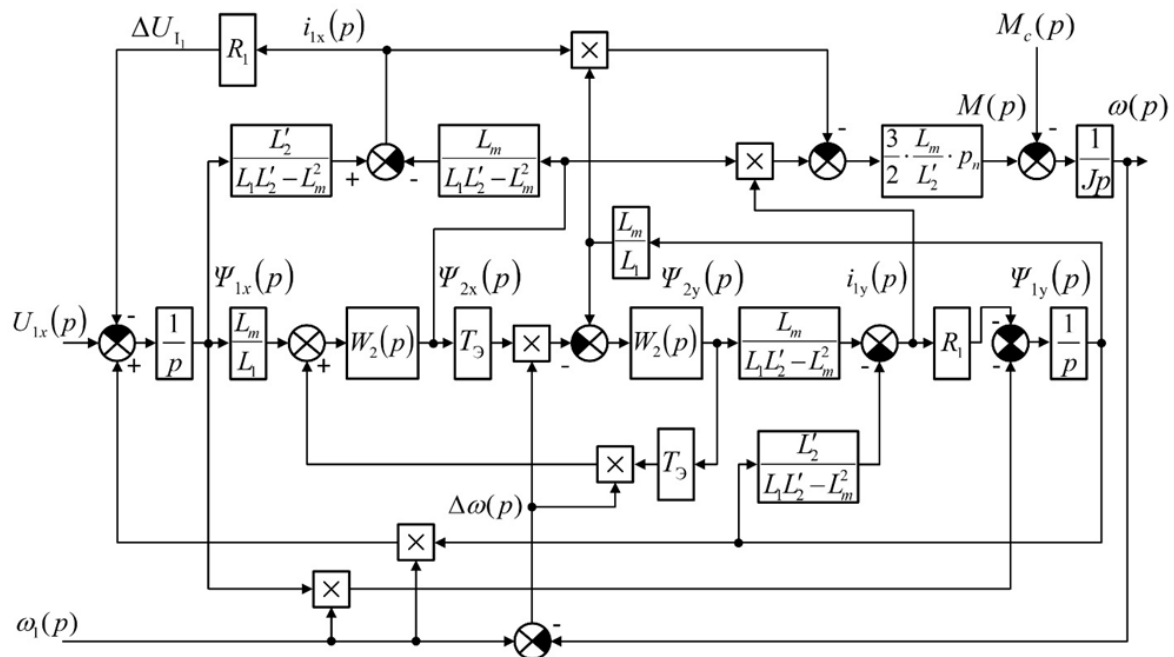


Рис. 1. Структурная схема асинхронного двигателя

Таблица 1

Передаточные функции и коэффициенты элементов структурной схемы

| $W_1(p)$ | $W_2(p)$ | k_0 | k_3 | k_4 | k_5 | k_6 |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|--|
| $\frac{1}{T_1 \cdot p + 1}$ | $\frac{1}{T_e \cdot p + 1}$ | $\omega_1 \cdot T_1$ | $\frac{L_m}{L_1}$ | $\frac{L_m}{L'_2}$ | $\Delta\omega \cdot T_e$ | $\frac{3 \cdot p_n \cdot L_m}{2 \cdot (L_1 \cdot L'_2 - L_m^2)}$ |

Структурная схема, показанная на рис. 1, содержит нелинейности вида $\Psi_1(p) \cdot \omega_1(p)$, $\Psi_2(p) \cdot \omega_1(p) \cdot T_e$. Асимптотическая линеаризация возможна при рассмотрении электромагнитных переходных процессов при постоянной частоте вращения ротора ($\omega = \text{const}$). В этом случае можно принять, что электромагнитная постоянная времени двигателя T_M намного больше, чем электромагнитные постоянная времени двигателя $T_1 = \frac{L_1 \cdot L'_2 - L_m^2}{R_1 \cdot L'_2}$, $T_e = \frac{L_1 \cdot L'_2 - L_m^2}{L_1 \cdot R_2}$, а в ходе электромагнитных переходных процессов частота вращения ротора изменяется незначительно.

Результаты

Линеаризованная блок-схема асинхронного двигателя показана на рис. 2.

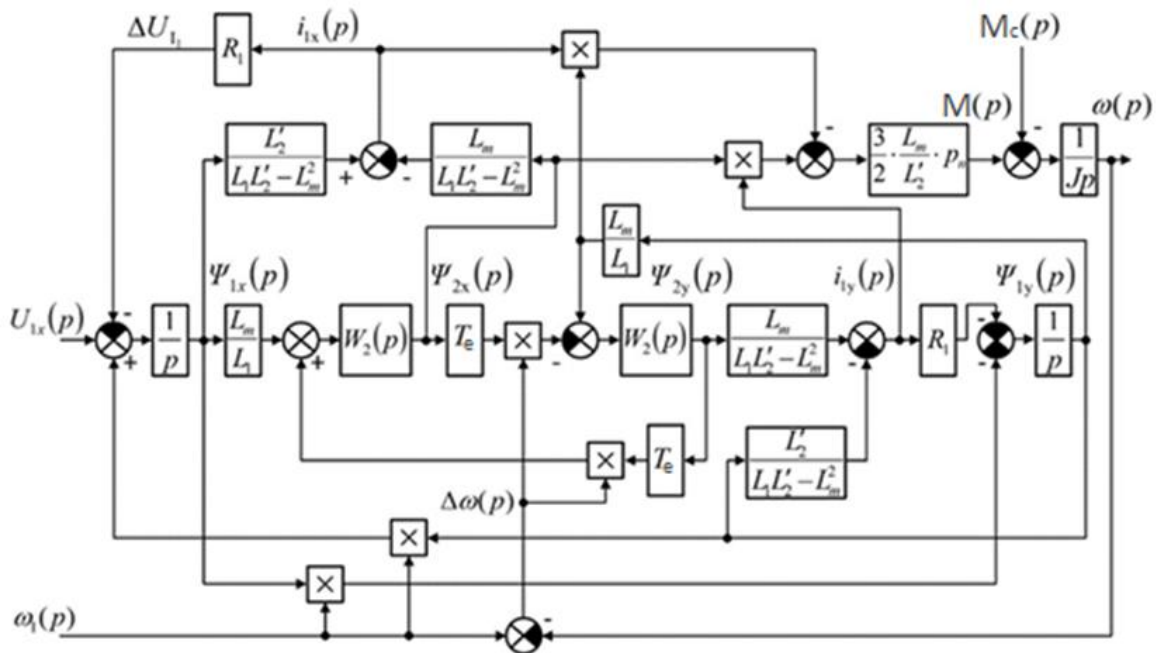


Рис. 2. Линеаризованная блок-схема асинхронного двигателя

Используя правило некасающихся контуров Мейсона [13], можно определить зависимости, связывающие переменные двигателя с входной переменной, по следующим формулам:

$$\Psi_{1x}(p) = \frac{W_1(p) \cdot [1 + W_2^2(p) \cdot k_5^2 - W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot k_3 \cdot k_4] \cdot U_1(p)}{\Delta(p)}; \quad (16)$$

$$\Psi_{1y}(p) = \frac{[-W_1^2(p) \cdot k_0 \cdot (1 + W_2^2(p) \cdot k_5^2) - W_1^2(p) \cdot W_2^2(p) \cdot k_5 \cdot k_3 \cdot k_4] \cdot U_1(p)}{\Delta(p)}; \quad (17)$$

$$\Psi_{2x}(p) = \frac{[W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot k_1 \cdot (1 - W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot k_3 \cdot k_4) + W_1^2(p) \cdot k_0 \cdot k_5 \cdot W_2^2(p)]}{\Delta(p)} \quad (18)$$

$$\Psi_{2y}(p) = \frac{[-W_1(p) \cdot W_2^2(p) \cdot k_5 \cdot k_3 + W_1^2(p) \cdot W_2(p) \cdot k_0 \cdot k_3] \cdot U_1(p)}{\Delta(p)}; \quad (19)$$

$$\Delta(p) = 1 + W_2^2(p) \cdot k_5^2 + W_1^2(p) \cdot k_0^2 - 2 \cdot W_1(p) \cdot k_3 \cdot W_2(p) \cdot k_4 + 2 \cdot W_1^2(p) \cdot W_2^2(p) \cdot k_0 \cdot k_5 \cdot k_4 \cdot k_3 + W_1^2(p) \cdot k_0^2 \cdot W_2^2(p) \cdot k_5^2 + W_1^2(p) \cdot W_2^2(p) \cdot k_3^2 \cdot k_4^2. \quad (20)$$

Численный эксперимент с исходными данными $R_2 = 0.2; L_m = 0.091; L_2 = 0.1; \omega_1 = 314; d\omega = \omega_1; R_1 = 0.4; L_1 = 0.1$ показал, что переходный процесс в исследуемой системе имеет колебательный характер. С целью подавления чрезмерных колебаний в систему введены корректирующие устройства, функционирующие в течение времени, равного $0.075(T_1 + T_e)$. В этом интервале работает реальное дифференцирующее звено, полученное охватом усилительного звена отрицательной обратной связью с интегратором. В дальнейшем корректирующий элемент отключен. Структурно-топологическая реализация данного алгоритма представлена на рис. 3.

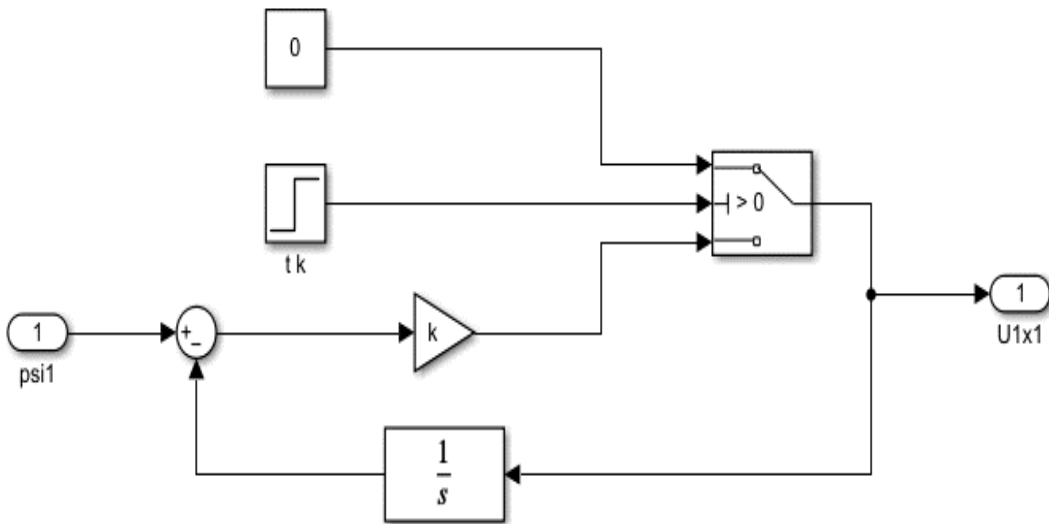


Рис. 3. Структурно-топологическая реализация корректирующего элемента

На рис. 4 показана функциональная схема модели электромеханического преобразователя на основе асинхронного двигателя с корректирующими элементами, на рис. 5 приведены результаты моделирования потокосцепления в исходном варианте и с применением коррекции. Результаты моделирования показывают, что корректирующее устройство предлагаемого принципа действия позволяет успешно подавить колебания.

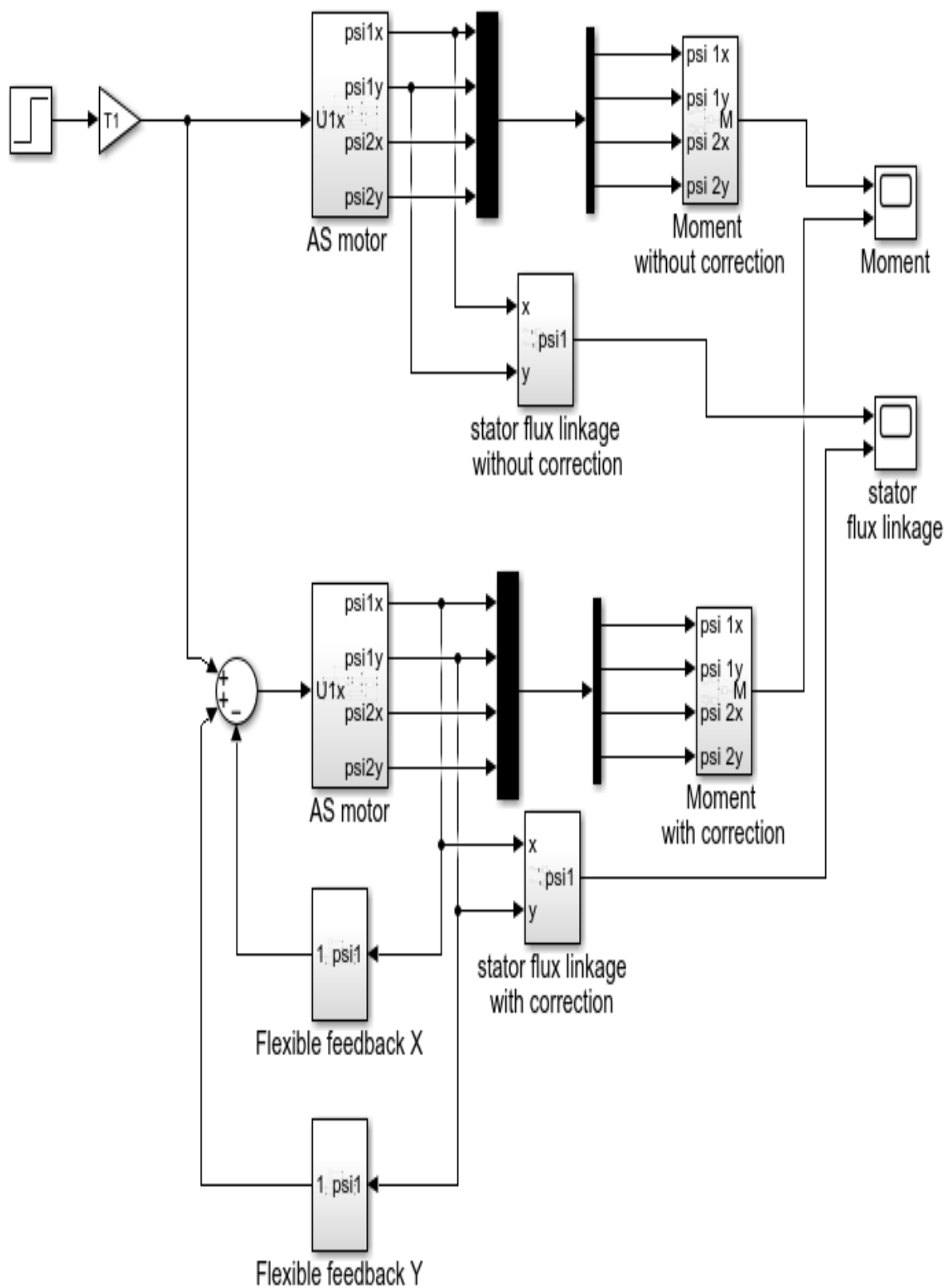


Рис. 4. Модель преобразователя с предлагаемыми корректирующими устройствами

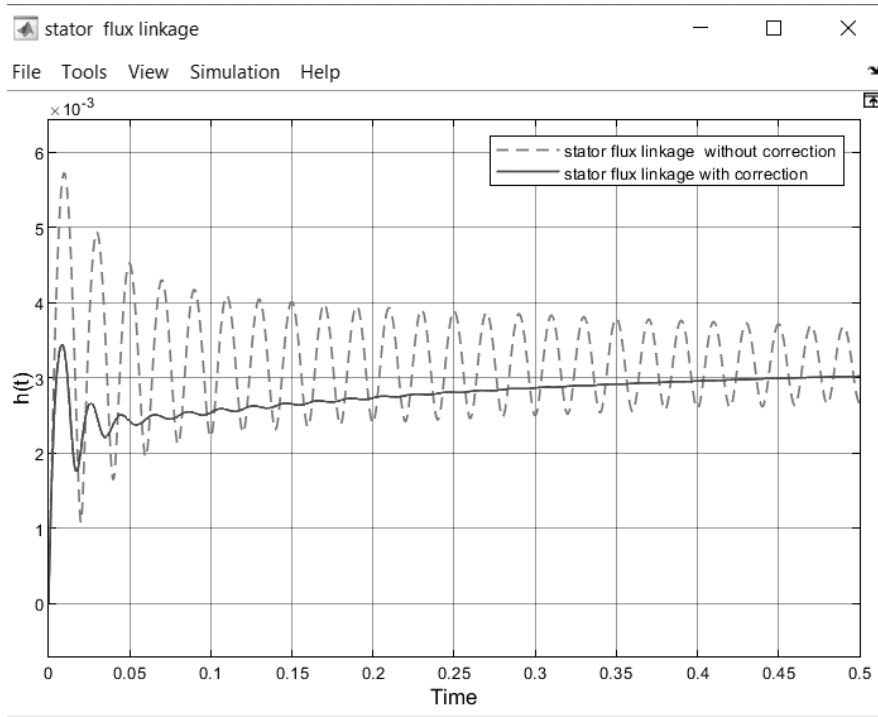


Рис. 5. Результаты моделирования: пунктирная кривая – работа прототипа; сплошная кривая – работа преобразователя с предлагаемыми корректирующими устройствами

Численный эксперимент для момента проведен с помощью модели, представленной на рис. 6. Соответствующие результаты приведены на рис. 7. Здесь видно, что колебания, присущие исходной системе (рис. 2), благополучно подавлены с помощью предлагаемого корректирующего устройства (рис. 3).

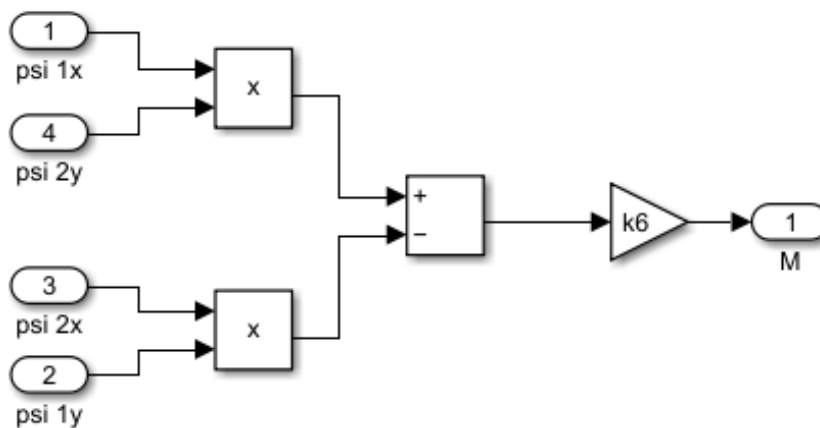


Рис. 6. Структурно-топологическая схема расчета момента

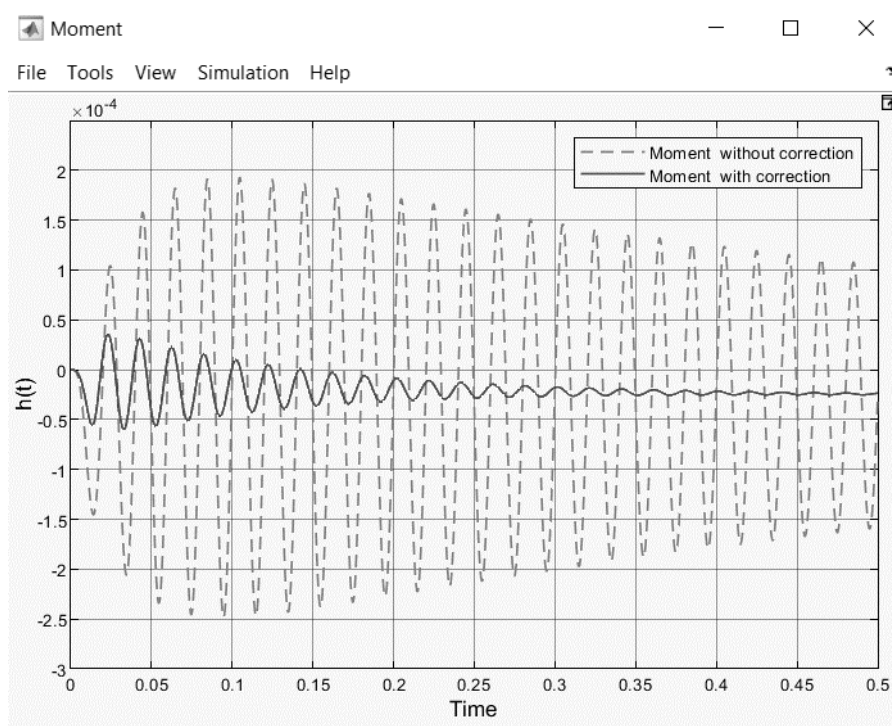


Рис. 7. Результаты моделирования расчета момента: пунктирная кривая – работа прототипа; сплошная кривая – работа преобразователя с предлагаемыми корректирующими устройствами

Выводы

Электромагнитная система асинхронного двигателя является звеном четвертого порядка с колебательным переходным процессом, который негативно сказывается на характеристиках системы. Применение гибкой обратной связи позволяет подавить эти колебания. Физическая реализация предлагаемых корректирующих устройств может быть осуществлена на основе датчиков потокосцепления, размещенных на зубцах статора. Колебания могут быть подавлены в системе скалярного управления, за счет воздействия на мгновенные значения питающего напряжения.

Библиографический список

1. **Браславский, И. Я.**, Метельков, В. П., Есаулкова, Д. В., Костылев, А. В. Оценка влияния колебаний нагрузки на ресурс изоляции асинхронных двигателей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2018. – № 3. – С. 81-87.
2. **Braslavskiy, I.Ya.**, Metelkov V.P., Kostylev, A.V., Esaulkova, D.V. Evaluation of dynamic properties of the TEFC induction motors thermal models // Conf. Proc. 2016 9th Int. Conf. on Power Drives Systems, ICPDS 2016, Perm, Russian Federation, 3-7 Oct. 2016. DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756677.
3. **Емельянов, А.П.** Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора / А.П. Емельянов, Б.А. Чуркин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014, – Т. 14, № 3. – С. 85-90.

4. **Мещеряков, В. Н.**, Данилов, В. В. Ограничение колебаний электромагнитного момента асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – № 3. – С. 88-97.
5. **Черепанов, В.В.**, Калинина, Е. А. Расчет колебаний напряжения электрической сети при работе асинхронных двигателей с резкопеременной нагрузкой // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 3 (32). – С. 20-26.
6. **John DeDad.** Flicker: Causes, Symptoms, and Cures. Electrical Construction and Maintenance. Jan 1, 2007.
7. **Самосейко, В.Ф.**, Гуськов В.О. Алгоритм векторного управления асинхронным электроприводом с оценкой сопротивления ротора // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2021. – № 3.
8. **Потапенко, Е. М.**, Душинова, Е.В., Левыкина, В.И., Васильева, Е.В. Оценка сопротивления ротора с использованием инжекции при высокоточном векторном управлении асинхронным приводом // Электротехника і електроенергетика. – 2009. – № 2.
9. **Vas P.** Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines / P. Vas // Clarendon Press. – Oxford: 1993. – 360 p.
10. **Синюкова, Т.В.**, Мещеряков, В.Н., Синюков, А.В. Исследование систем управления для подъемно-транспортных механизмов // Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 167-181. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-167-181.
11. **Ключев, В.И.** Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. С. 565-571.
12. **Мещеряков, В.Н.**, Ласточкин Д.В. Структурный анализ динамики электромеханических систем с упругими связями. –чЛипецк: Издательство ЛГТУ, 2021. С. 47-49.
13. **Бесекерский, В.А.**, Попов Е.П. Теория автоматического управления. – М.: Профессия, 2004. С. 332-337.

L.N. Yazykova, I.V. Muzyleva, V.N. Meshcheryakov, E.G. Mitin

SUPPRESSION OF VIBRATIONS IN THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF AN INDUCTION MOTOR

Lipetsk State Technical University Lipetsk, Russia¹

Abstract. The article proposes a universal method for generalized analysis of an induction motor. It can be used in engineering practice to analyze complex electromechanical systems. Their mathematical models can be represented by block diagrams containing cross-feedback. It is proposed to use a flexible feedback that provides vibration damping. The numerical experiment was carried out for the engine start mode.

Key words: electric drive, vector control, mathematical modeling, structural-topological analysis, state-space method.

References

- [1] Braslavsky I. Ya., Metelkov V. P., Yesaulkova D. V., Kostylev A. V. *Ocenka vliyaniya kolebaniy nagruzki na resurs izolyatsii asinhronnyh dvigatelej* [Evaluation of the impact of load fluctuations on the insulation life of asynchronous motors] // Bulletin of SUSU. Series: Energy. 2018. No.3. pp. 81-87. [Online]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-kolebaniy-nagruzki-na-resurs-izolyatsii-asinhronnyh-dvigatelay> [Accessed: June 09, 2023]. Bulletin of SUSU. The series "Energy". 2018. Vol. 18, No. 3 (in Russian).
- [2] Evaluation of dynamic properties of the TEFC induction motors thermal models / I.Ya. Braslavskiy, V.P. Metelkov, A.V. Kostylev, D.V. Esaulkova // Conf. Proc. 2016 9th Int. Conf. on Power Drives Systems, ICPDS 2016, Perm, Russian Federation, 3–7 Oct. 2016. DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756677.
- [3] Emelyanov A.P., Churkin B.A. *Skalyarnoe upravlenie asinhronnym korotkozamknutym dvigatelom po aktivnoy sostavlyayushchej toka statora* [Scalar control of an asynchronous short-circuited motor by the active component of the stator current] // Bulletin of SUSU. The series "Energy". – 2014, – Vol. 14, No. 3. – pp. 85-90 (in Russian).
- [4] Meshcheryakov V. N., Danilov V. V. *Ogranichenie kolebaniy elektromagnitnogo momenta asinhronnogo dvigatelya pri skalyarnom chastotnom upravlenii* [Limitation of oscillations of the electromagnetic torque of an asynchronous motor with scalar frequency control] // Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. 2018. No.3. pp. 88-97. [Online]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ogranichenie-kolebaniy-elektromagnitnogo-momenta-asinhronnogo-dvigatelya-pri-skalyarnom-chastotnom-upravlenii> [Accessed: June 09, 2023] (in Russian).
- [5] Cherepanov V. V., Kalinina E. A. *Raschet kolebaniy napryazheniya elektricheskoy seti pri rabote asinhronnyh dvigatelej s rezkoperemnoy nagruzkoy* [Calculation of voltage fluctuations of the electrical network during operation of asynchronous motors with a sharply variable load] // Electrical systems and complexes. 2016. No.3 (32). pp. 20 – 26. [Online]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-kolebaniy-napryazheniya-elektricheskoy-seti-pri-rabote-asinhronnyh-dvigatelay-s-rezkoperemnoy-nagruzkoy> [Accessed: June 09, 2023] (in Russian).
- [6] John DeDad, Flicker: Causes, Symptoms, and Cures. Electrical Construction and Maintenance. Jan 1, 2007.
- [7] Samoseiko V. F., Guskov V. O. *Algoritm vektornogo upravleniya asinhronnym elektroprivodom s ocenкой soprotivleniya rotora* [Vector control algorithm for asynchronous electric drive with rotor resistance estimation] // Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of the Sea and River Fleet. 2021. №3. [Online]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm->

- vektornogo-upravleniya-asinhronnym-elektroprivodom-s-otsenkoy-soprotivleniya-rotora [Accessed: June 09, 2023] (in Russian).
- [8] Potapenko E. M., Dushinova E. V., Levykina V. I., Vasilyeva E. V. *Ocenka soprotivleniya rotora s ispol'zovaniem inzhekcii pri vysokotochnom vektornom upravlenii asinhronnym privodom [Evaluation of rotor resistance using injection with high-precision vector control of asynchronous drive]* // Electrical engineering and power engineering. 2009. №2. [Online]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-soprotivleniya-rotora-s-ispolzovaniem-inzheksii-pri-vysokotochnom-vektornom-upravlenii-asinhronnym-privodom> [Accessed: June 09, 2023] (in Russian).
- [9] Vas P. Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines / P. Vas // Clarendon Press. – Oxford: 1993. – 360 p.
- [10] Sinyukova T.V., Meshcheryakov V.N., Sinyukov A.V. *Issledovanie sistem upravleniya dlya pod'emno-transportnyh mekhanizmov. PROBLEMY ENERGETIKI [Research of control systems for lifting and transport mechanisms.]* 2021. Vol. 23. No. 1. pp. 167-181. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-167-181 (in Russian).
- [11] Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda [Theory of electric drive]*. Moscow: Energoatomizdat, 2001, pp. 565 – 571 (in Russian).
- [12] Meshcheryakov V.N., Lastochkin D.V. *Strukturnyj analiz dinamiki elektromekhanicheskikh sistem s uprugimi svyazyami [Structural Analysis of the Dynamics of Electromechanical Systems with Elastic Constraints]*. Lipetsk: Publishing house of LGTU, 2021, pp. 47 – 49 (in Russian).
- [13] Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]*. Moscow: Profession, 2004, pp. 332 – 337 (in Russian).

Секция 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

УДК 621.311

DOI: 10.46960/apeen_2023_171

Н.В. Гринев**К ВОПРОСУ ОБ АРХИТЕКТУРЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ БУДУЩЕГО**

ООО «Эверест»

Аннотация. В статье приведены предложения для архитектуры интеллектуальных электроэнергетических систем будущего. Описание и обоснование предлагаемой архитектуры выполнено с использованием элементов теории систем, а именно приемов бионики и топологических методов оценки.

Ключевые слова: передача электроэнергии, электроэнергетические системы, надежность, высоковольтное распределительное устройство.

Интеллектуализация электроэнергетических систем (сокращенно – ЭЭС или энергосистем) как внедрение новых информационных технологий для управления, защиты и мониторинга состояния оборудования и систем является одной из важнейших, но не единственной тенденцией развития ЭЭС. Помимо повышения управляемости на основе информационных технологий, особенностями сетей XXI века должны стать появление линий электропередачи с большей пропускной способностью, внедрение новых видов электрооборудования, надежность и компактность электросетевых объектов, их экологичность и безопасность.

Уже сегодня в развитых районах страны плотность электрических связей возросла настолько, что все шире находит применение критерий «n-2» (как развитие известного критерия «n-1»), заключающийся в том, что рассматриваются всевозможные сочетания отказов и ремонтов.

По критерию «n-2» узким местом ЭЭС неизбежно станут распределительные устройства электрических станций и узловых подстанций (сокращенно – РУ). И будут им являться, пока будут содержать такие элементы централизации, как секции/системы сборных шин с соединяющими их выключателями, ведь централизация на понятийном уровне не совместима с живучестью. В этом смысле необходимо развитие архитектуры ЭЭС. Структура управляемой системы не должна ограничивать возможности систем управления. В этом смысле необходимо развитие архитектуры ЭЭС.

К РУ предъявляются высокие конструктивные, функциональные, эргономичные требования. Они формируют костяк ЭЭС, их параметры имеют стратегическое

значение для страны, а надежности следует уделять особое внимание [1].

Согласно [2], облик ЭЭС будущего определяют условия развития и функционирования, обусловленные рядом объективных факторов. Растут масштабы ЭЭС, увеличиваются обслуживаемые ими территории, объединяются различные ЭЭС, формируются межрегиональные, межгосударственные и межконтинентальные объединения. Развиваются крупные агломерации и одновременно электропотребление рассредоточивается по территории страны. Тенденция децентрализации развивается и со стороны генерации. В будущем ЭЭС будут включать крупные генерирующие источники и заметную долю распределенной генерации.

В [3] предсказывается переход к новой технологической парадигме, в которой новая энергоинформационная структура «умной энергетики» будет развиваться на основе следующих принципиально новых подходов.

1. Она будет не радиально-кольцевой, с явно выраженными крупными центрами генерации и потребления, а ячеистой (распределенной), обладающей большей надежностью и живучестью и отражающей необходимость сочетания электрических связей большой и малой мощностей, централизованных и децентрализованных систем, традиционной и нетрадиционной энергетик.

2. Она не будет однородно-сетевой. Она будет интегрировать региональные и межгосударственные объединения, физические, силовые и информационные потоки энергии, а также рыночные связи, посредством которых будут формироваться энергообъединения нового типа.

В то же время, геополитическая обстановка вынуждает нашу страну развивать производство собственной генерации, которая на первом этапе вероятно будет не столь совершенной как уже ставшие привычными импортные аналоги, и (или) сохранять существующую генерацию, в том числе за счет применения альтернативных запчастей.

Одним из известных перспективных направлений интеллектуализации энергосистем является электрическая сеть гексагонального типа [4].

Достаточно давно известно о схожести искусственных и биологических систем. В теории систем выделилось отдельное направление – бионика. А, например, Б. И. Кудрин предложил теорию техноценозов [5]. РУ может рассматриваться как пример техноценоза, под которым понимается ограниченное в пространстве и времени любое выделенное единство, включающее сообщество изделий.

С учетом перечисленных обстоятельств можно ожидать, что известные, проверенные временем принципы развития и построения ЭЭС постепенно потребуют новых подходов.

Поэтому появилась гипотеза о применении топологии, пожалуй, одной из самых известных биоструктур - молекулы ДНК (рис. 1).

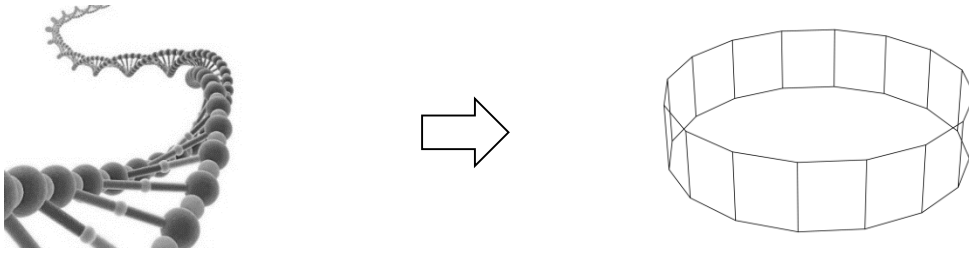


Рис. 1. Спираль ДНК

Можно заметить, что структура ДНК топологически эквивалентна многограннику, а именно многогранной призме. Структура многогранника имеет высокую связность, но при этом является децентрализованной.

Данная структура, как РУ нового типа, может быть реализована следующим образом: каждое присоединение подключается через развилку из разъединителей и таким образом присоединение и его разъединители образуют ребро, в вершинах многогранника устанавливаются выключатели, причем в каждой вершине соединяются не более трех ребер; присоединение отключается выключателями инцидентных вершин.

Используя теорему Эйлера о многогранниках и лемму о рукопожатиях, можно рассчитать необходимое число вершин N_B и разъединителей N_P в зависимости от числа присоединений N_H :

$$N_B = N_H \times 2/3; \quad N_P = N_H \times 2. \quad (1)$$

Из условия соединения трех ребер в вершине в каждой вершине должно быть по меньшей мере два выключателя. Отсюда следует, что для РУ в целом общие капитальные затраты сохранятся близкими к существующему уровню. Увеличение числа выключателей компенсируется снижением числа разъединителей. Это важно, так как новое решение должно иметь экономическое обоснование.

Все современные РУ близки друг к другу по числу выключателей, трансформаторов тока, различаясь между собой количеством разъединителей. В отличие от них, предлагаемое решение имеет иной состав оборудования, с иной структурой, в нем число разъединителей меньше, чем во всех известных аналогах.

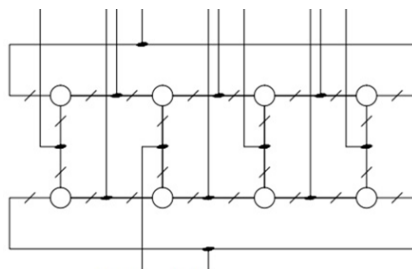


Рис. 2. Пример схемы ОРУ с топологией куба

Примером предлагаемой структуры на 12 присоединений является куб. Схема такого ОРУ показана на рис. 2. Для 12 присоединений требуется 8 вершин

(16 выключателей). В традиционных схемах общее число выключателей немного меньше и составляет 13-14.

Потеря любых двух элементов в таком РУ (рис. 2) не приводит к отключению более одного присоединения. Имеются все основания для повышения экономичности и надежности.

В подтверждение используем топологические методы оценки, а именно структурные характеристики [6]. Эти методы сами по себе в проектной практике не используются, так как считается, что они не позволяют перейти к последующей технико-экономической оценке вариантов. Ценность этих характеристик - в том, что они получены исключительно на основе информации о составе элементов и их связях.

В [6] Н. И. Воропай выделил для электроэнергетики такие применяемые структуры: последовательная, кольцевая, радиальная, древовидная, полный граф, несвязная. Их характеристики - в табл. 1. Для сравнения с ними рассчитаны характеристики структуры куба.

Таблица 1

Структурно-топологические характеристики различных структур

| Показатель \ Вид структуры | R | K_C | ε^2 | Q | d | δ | r_i |
|----------------------------|-------|-------|-----------------|------|-----|----------|-------|
| последовательная | 0 | 1 | 1,2 | 1 | 4 | 0,67 | 0,25 |
| кольцевая | 0,25 | 2 | 0 | 0,5 | 2 | 0 | 0,2 |
| радиальная | 0 | 1 | 7,2 | 0,6 | 2 | 1 | 0,5 |
| древовидная | 0 | 1 | 3,2 | 0,75 | 3 | 0,76 | 0,38 |
| полный граф | 1,5 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 |
| несвязная | -0,25 | 0 | - | - | - | - | 0,25 |
| многогранник | 0,71 | 2 | 0 | 0,71 | 3 | 0 | 0,13 |

Для объектов электроэнергетики важны первые три показателя: показатель R (структурная избыточность) является косвенной оценкой экономичности и надежности и определяет принципиальную возможность функционирования и сохранения связей системы при отказе некоторых ее элементов, система с большей избыточностью потенциально более надежна; показатель K_C (связность) характеризует возможность повреждения и ремонта элемента; показатель ε^2 (квадратическое отклонение распределения степеней вершин) характеризует недоиспользование возможностей структуры и является косвенной оценкой экономичности. Остальные – менее важны.

В результате, структура многогранника имеет самые близкие характеристики к эталонной структуре «полный граф».

Полученные показатели демонстрируют, что РУ нового типа с предлагаемой структурой многогранника будет иметь лучшие свойства связности, надежности, гибкости, экономичности, является открытым, масштабируемым. Исходя из этого, параметры РУ будут не ограничивать, но способствовать интеллектуализации ЭЭС.

Полученные для РУ нового типа результаты свидетельствуют о целесообразности их дальнейшего изучения и внедрения. Такие РУ могут быть использованы при сооружении новых и реконструкции действующих РУ, имеющих 5 присоединений и более.

Пример реализации РУ нового типа на напряжение 110 кВ на базе текущих серийно выпускаемых электроаппаратов приведен на рис. 3.

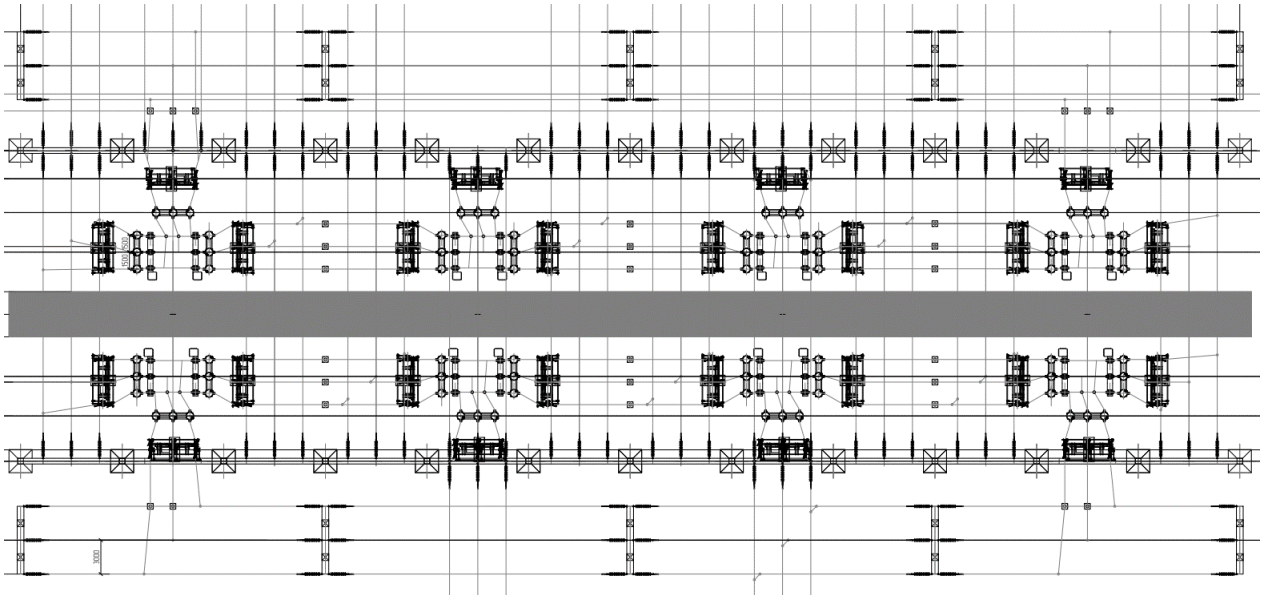


Рис. 3. Пример ОРУ нового типа

Рис. 3 позволяет выполнить первую экономическую оценку РУ нового типа (обозначено - 3D) в сравнении с существующими аналогами (см рис. 4).

Рассмотрим капитальные затраты на основное оборудование, которые найдем с помощью укрупненных нормативов цен из [7, сс. 64-65]: элегазовый выключатель 110 кВ – 3,46 млн руб.; трехполюсный разъединитель 110 кВ – 2,74 млн руб.; однополюсный разъединитель 110 кВ – 1,23 млн руб.; трехфазный комплект трансформаторов тока 110 кВ – 2,96 млн руб. Тогда:

$$C = 3,46 \times N_B + 2,74 \times N_{P3} + 1,23 \times N_{P1} + 2,96 \times N_{TT}, \quad (2)$$

где c - капитальные затраты на оборудование ОРУ, млн руб.; N_B – количество элегазовых выключателей, соответственно; N_{P3}, N_{P1} – количество трехполюсных и трехфазных комплектов однополюсных разъединителей, соответственно; N_{TT} – количество трансформаторов тока.

Даже первая оценка демонстрирует, что РУ нового типа не уступает по экономичности существующим аналогам, но, в отличие от них, имеет обоснованные возможности для сокращения затрат, а именно:

- объединение двух выключателей в одно изделие - выключатель на три направления (конструктив такого выключателя уже проработан);
- объединение двух трансформаторов тока в одно изделие - трансформатор тока на три направления (с трехлучевым первичным токопроводом);

- применение комбинированных выключателей-разъединителей.

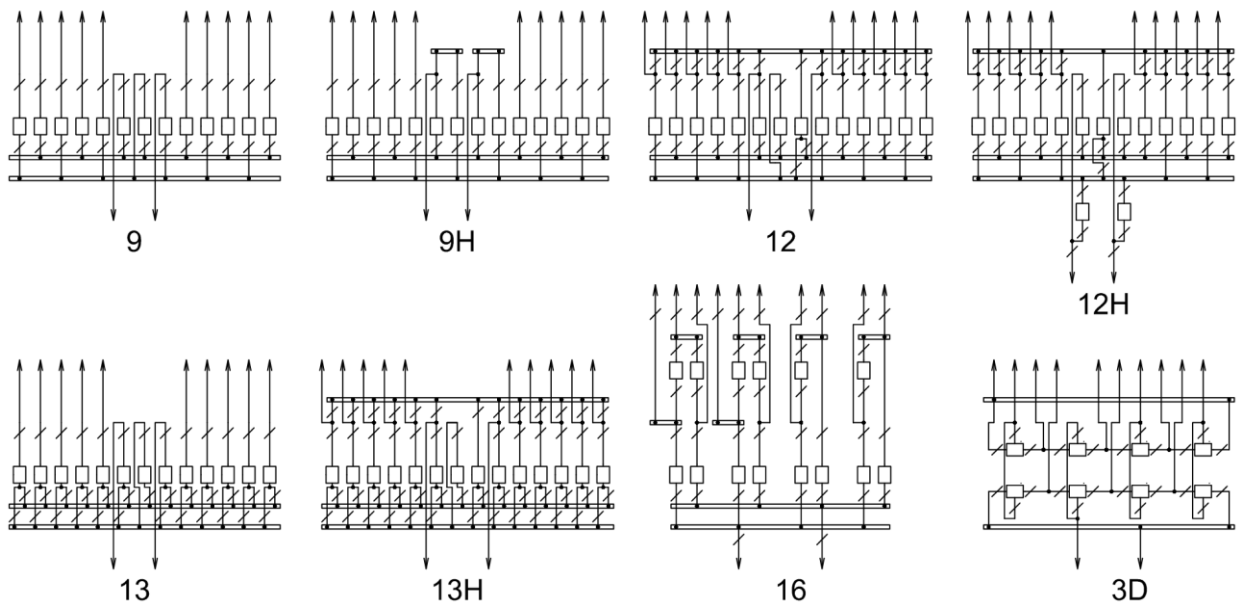


Рис. 4. Сравнение РУ нового типа с существующими аналогами

Таблица 2

Капитальные затраты на оборудование ОРУ 110 кВ нового типа

| Схема РУ | 9 | 9H | 12 | 12H | 13 | 13H | 16 | 3D |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| N_B | 13 | 14 | 14 | 15 | 13 | 14 | 14 | 16 |
| N_{P3}/N_{P1} | 26/- | 28/- | 41/- | 43/- | 38/- | 39/14 | 40/- | 24/- |
| N_{TT} | 13 | 14 | 14 | 15 | 13 | 14 | 14 | 24 |
| C , млн. руб. | 154,7 | 166,6 | 202,22 | 214,12 | 187,58 | 248,4 | 199,48 | 192,16 |
| То же, % | 62% | 67% | 81% | 86% | 76% | 100% | 80% | 77% |

В силу связности структуры многогранника ее целесообразно в первую очередь применять в сетях, где практикуется параллельная работа элементов: это сети 110 кВ и выше, а также РУ генерации. В сетях с раздельной работой (РУ 6-35 кВ) такие РУ могут стать альтернативой секциям сборных шин. Поскольку как РУ нового типа, так и сети гексагонального типа содержат в своей основе трехлучевые узлы, то в перспективе от их совместного применения вполне вероятен синергетический эффект.

Библиографический список

1. **Вариводов, В.Н.**, Ковалев, Д.И. и др. Развитие распределительных устройств высокого и сверхвысокого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 1 (40). – С. 32-38.
2. **Воропай, Н.И.**, Осак, А.Б. Электроэнергетические системы будущего / Энергетика XXI века: философия и форсайт. – 2014. – Выпуск 5. – С. 60-63.
3. **Бушуев, В. В.** Электроэнергетика будущего как фактор активного развития цивилизации // Окружающая среда и энерговедение (ОСЭ). – 2019. – № 3. – С. 22-28.

4. **Лоскутов, А.Б.**, Соснина, Е.Н., Лоскутов, А.А., Зырин, Д.А. Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией // Промышленная энергетика: производственно-технический журнал. – 2013. – № 12. – С. 3-7.
5. **Кудрин, Б. И.** Исследования технических систем как сообществ изделий техноценозов / Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1980. – М.: Наука, 1981. – С. 236 -254.
6. **Воропай, Н. И.** Теория систем для электроэнергетиков: Учебное пособие. – Новосибирск: Наука, Сибирская изд. фирма РАН, 2000. – 73 с.
7. Укрупненные нормативы цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства. Утв. Приказом Минэнерго России от 17.01.2019 г. № 10.

N.V. Grinev

TO THE QUESTION OF THE ARCHITECTURE OF THE POWER SYSTEMS OF THE FUTURE

Everest LLC, Russia

Abstract. The article presents proposals for the architecture of smart grid of the future. The description and justification of the proposed architecture is carried out using elements of the theory of systems, namely bionics techniques and topological evaluation methods.

Key words: power transmission, electric power systems, reliability, high-voltage switchgear, selection of electrical schemes.

References

- [1] Varivodov, V.N., Kovalev, D.I. & others. «Razvitie raspredelitel'nyh ustroystv vysokogo i sverhвысокoго napryazheniya» // «ELEKTROENERGIYA. Peredacha i raspredelenie», 2017. - №1 (40) - pp. 32-38.
- [2] Voropai, N. I., Osak, A. B. «Elektroenergeticheskie sistemy budushchego» // «ENERGETIKA XXI VEKA: FILOSOFIYA I FORSAJT», 2014. - Issue 5. - pp. 60-63.
- [3] Bushuev, V. V. «Elektroenergetika budushchego kak faktor aktivnogo razvitiya civilizacii» // Okruzhayushchaya sreda i energovedenie (OSE), 2019. - No. 3. – pp. 22-28.
- [4] Loskutov, A. B. «Intellektual'nye raspredelitel'nye seti 10-20 kV s geksgonal'noj konfiguraciej» // «Promyshlennaya energetika», 2013. - № 12. - pp. 3–7
- [5] Kudrin, B. I. «Issledovaniya tekhnicheskikh sistem kak soobshchestv izdelij — tekhnocenozov» // «Systemnye issledovanya. Metodologicheskiye problem. Ezegodnik 1980», 1981.- pp. 236-254.
- [6] Voropai, N. I. «Teoriya sistem dlya elektroenergetikov: Uchebnoe posobie». Novosibirsk: Nauka, Siberian Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2000, 73 p.
- [7] «Ukrupnennyye normativy ceny tipovykh tekhnologicheskikh reshenij kapital'nogo stroi-tel'stva ob"ektov elektroenergetiki v chasti ob"ektov elektrosetevogo hozyajstva». Approved by the Order of the Ministry of Energy of Russia dated January 17, 2019 No. 10.

УДК 621.311.25

DOI: 10.46960/apeen_2023_179

А.Д. Данилов¹, Д.А. Ширяев², А.И. Зимин², А.А. Дружаев³

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА ПРИМЕРЕ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПОКОЛЕНИЯ «3+» С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1200

Воронежский государственный технический университет¹
АО «Концерн Росэнергоатом» Филиал «Нововоронежская атомная станция»²
АО «Всероссийский научно-исследовательский институт
по эксплуатации атомных электростанций»³

Аннотация. В рамках данной статьи рассматриваются системы контроля и диагностики состояния турбогенератора (ТГ) энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 (ключевой единицы оборудования как с точки зрения безопасности, так и экономической эффективности эксплуатации энергоблока), анализируются их достоинства и недостатки, а также делается вывод о возможном направлении дальнейшего развития данных систем в целях повышения качества контроля состояния оборудования.

Ключевые слова: Нововоронежская АЭС; энергоблок; турбогенератор; контроль; диагностика; информационная система; предиктивная аналитика.

Атомные электрические станции (АЭС) с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) строятся и эксплуатируются в России и за рубежом с 60-х годов прошлого столетия (первый энергоблок с реактором типа ВВЭР пущен на Нововоронежской АЭС в 1964 г.).

В настоящее время энергоблоки проекта «АЭС-2006» с реакторами типа ВВЭР-1200 успешно эксплуатируются на Нововоронежской АЭС (площадка Нововоронежской АЭС-2, энергоблоки № 1 и № 2), на Ленинградской АЭС (площадка Ленинградской АЭС-2, энергоблоки № 1 и № 2). Как отмечено выше, энергоблоки АЭС с реакторами типа ВВЭР-1200 сооружаются не только в России, но и во многих зарубежных странах, в том числе в Белоруссии, Бангладеш и Турции. Определяющим фактором, который позволил заключать контракты и сооружать АЭС с энергоблоками типа ВВЭР-1200 за рубежом является референтность блоков с подтвержденным высоким уровнем безопасности и эксплуатационной надежности.

Обеспечение безопасной и надежной эксплуатации энергоблока АЭС – это разноплановая и важнейшая задача, которую необходимо решать комплексно, обращая внимание на все аспекты деятельности. Одним из ключевых факторов, влияющих как на безопасность, так и на надежность, являются используемые при эксплуатации методы контроля и диагностики оборудования, в частности электротехнического.

Описание методов контроля турбогенератора энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2

ТГ энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 (тип ТЗВ-1200-2АУЗ, завод-изготовитель «Электросила») оснащен большим количеством систем контроля и диагностики. Эти системы обеспечивают эксплуатационный контроль оборудования, индикацию статуса текущего состояния, регистрацию технологических параметров, а также отклонения от нормального режима работы, включая отклонения при функционировании вспомогательных систем (в том числе и в работе отдельных измерительных каналов).

В состав общего объема технологического контроля ТГ входят:

- система теплового контроля ТГ;
- система контроля вибрации опор ТГ и конструктивных элементов статора;
- системы технологического контроля систем обеспечения ТГ;
- системы контроля электрических параметров.

Системы контроля и диагностики ТГ осуществляют измерение заданного набора технологических параметров, таких как: температура активных частей, подшипников, охлаждающих сред, электрических величин, вибрационных параметров конструктивных элементов, параметров влажности воздуха. В процессе работы систем выполняется проверка нахождения этих параметров в пределах заданного диапазона с выдачей соответствующих сигнализаций (более подробное описание эксплуатируемых систем контроля и диагностики состояния ТГ энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 приведено в подразделах 2.1 – 2.3).

Текущий объем контроля и диагностики ТГ позволяет эксплуатационному персоналу АЭС в любой момент времени получить большое количество информации о текущем состоянии оборудования, а также об истории его эксплуатации за длительный период. При этом ручной анализ данной информации крайне затруднителен по следующим причинам:

- величина объема информации;
- взаимная коррелированность параметров, обусловленная как физическими, так и технологическими причинами.

Системы контроля вибрации и теплового состояния ТГ

Вибрационное состояние подшипниковых опор ТГ и возбуждителя контролируется виброакселерометрами (датчиками вибрации), входящими в состав автоматизированной системы контроля вибрации и механических величин основного роторного оборудования (АСВД).

Вибрация подшипниковых опор ТГ и возбуждителя измеряется в трех взаимно-перпендикулярных направлениях: вертикальном, горизонтально-поперечном и горизонтально-осевом по отношению к оси вала – определяется среднее квадратичное значение виброскорости (мм/с).

Для обеспечения вибрационного контроля конструктивных элементов статора ТГ установлено следующее оборудование:

- программно-технический комплекс технологического мониторинга параметров генератора «СТК-ЭР-М»;
- система контроля вибрации конструктивных элементов статора (СКВ);
- виброакселерометры оптические одно и двухосные типа FOA-100E и FOA-200 (установлены, как со стороны турбины, так и со стороны возбuditеля);
- виброакселерометры пьезоэлектрические типа PCB W355B03 (установлены, как со стороны турбины, так и со стороны возбuditеля).

Вибрацию турбогенератора ТЗВ-1200-2АУЗ измеряют более 160 датчиков, которые поступают в различные информационные системы (систему верхнего блочного уровня, панель «Ракурс»).

Более подробно рассмотрим программно-технический комплекс системы технологического контроля турбогенератора (ПТК СТК ТГ), который выполняет непрерывный контроль следующих технологических параметров:

- вибрации конструктивных элементов статора ТГ;
- температурных режимов статора ТГ;
- технологического контроля системы обеспечения ТГ.

ПТК СТК ТГ выполняет сбор и обработку аналоговых сигналов с контролем достоверности, фильтрацией помех и измерением значений:

- от датчиков вибрации (пьезоэлектрический акселерометр типа 355B03 фирмы «PCB PIEZOTRONICS»);
- от термопреобразователей сопротивления, имеющих номинальную статическую характеристику по ГОСТ 6651-2009, с автоматической компенсацией сопротивления соединительных проводов;
- унифицированные токовые сигналы в диапазонах от 0 до 20 мА и от 4 до 20 мА.;

ПТК СТК ТГ выполняет сбор и обработку дискретных сигналов в виде коммутации «сухого» контакта» 24В с фильтрацией помех, подавлением «дребезга» контактов от измерительных преобразователей технологического контроля систем обеспечения ТГ с выходным сигналом в диапазоне от 4 до 20мА, обеспечивает подключение датчиков вибрации к функциональной модели через блок сопряжения. Сигнал от датчиков передается на Блок сопряжения и далее в модуль ТПТС51-2.1722 сигналом от 4 до 20мА. Питание датчиков вибрации осуществляется от блока сопряжения.

ПТК СТК ТГ выполняет:

- измерение значений принятых аналоговых сигналов и преобразование измеренных значений в значения технологических параметров;
- расчет вычисляемых технологических параметров согласно заданным алгоритмам;
- контроль граничных значений и перехода значения технологического параметра через уставку с формированием дискретных сигналов предупредительных и аварийных защит (признака перехода значения сигнала через уставку).

Контроль теплового состояния ТГ производится с помощью термопреобразователей сопротивления, которые подключаются к контролирующим приборам. В ТГ предусмотрено измерение температуры дистиллята, вытекающего из каждой цепи охлаждения обмотки статора, а также температуры поверхности изоляции между стержнями и активной стали на дне паза. Для подшипниковых опор ТГ организован контроль температуры баббитовых вкладышей.

На турбогенераторе энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС ТЗВ-1200-2АУЗ установлено более 260 датчиков измерения температуры.

Системы контроля технологических параметров

Система контроля и защит возбудителя включает в себя следующие функции:

- контроль температуры посредством термопреобразователей сопротивления (холодного воздуха на выходе из воздухоохладителей; горячего воздуха на выходе из межполюсного пространства магнитной системы и вращающихся выпрямителей; воды на сливе из труб воздухоохладителей; масла на сливе из трубы подшипника; баббита вкладыша подшипника);
- контроль влажности охлаждающего воздуха перед входом в зону вращающихся выпрямителей и якоря посредством преобразователей температуры и влажности (типа «РОСА»);
- контроль течи воздухоохладителей посредством датчика уровня;
- защиту от увлажнения изоляции в период длительного останова возбудителя при помощи электронагревателей.

На ТГ используется защита по потоку дистиллята каждого водоохлаждаемого элемента в статорной и роторной системах. Расходомеры предназначены не только для измерения расхода дистиллята, циркулирующего в замкнутой системе охлаждения, но также и для сигнализации об отклонении значения измеряемого параметра от заданных предельных значений.

Система вентиляции корпуса генератора предназначена для обеспечения непрерывного потока воздуха через статор для предотвращения попадания влаги или увлажненного воздуха внутрь статора из сливных камер, расположенных в наружных щитах генератора. Напор воздуха, нагнетаемого в статор, а также давление (разрежение) в камерах лабиринтных уплотнений, давление в корпусе статора контролируется датчиками давления-разрежения. Относительная влажность воздуха контролируется измерительными преобразователями температуры и влажности, установленными в генераторе и на трубопроводе подачи воздуха в генератор. Для создания потока воздуха к датчикам влажности камера установки датчиков в генераторе соединена со смотровым патрубком, в котором образуется разрежение при работе генератора.

Системы контроля электрических параметров

Системы контроля электрических параметров ТГ включают в себя:

- устройства релейной защиты и автоматики (УРЗА);
- шкаф защиты, контроля и управления системы возбуждения;
- программно-технический комплекс системы мониторинга переходных режимов (ПТК СМНР);

– комплекс регистрации аварийных событий (РАС).

ПТК СМПР предназначен для регистрации, архивирования, и передачи на уровне диспетчерского управления синхронизированных векторных измерений параметров электроэнергетического режима эксплуатации ТГ.

РАС выполнен на основе регистратора электрических процессов цифрового «ПАРМА РП4.11». Данный регистратор предназначен для:

- измерения напряжения и силы постоянного тока, действующих значений напряжения и силы переменного тока, частоты, активной, реактивной и полной мощности;
- регистрации, хранения и анализа информации о стационарных и переходных процессах, предшествующих и сопутствующих аварийным отклонениям параметров в электрических сетях и оборудовании;
- регистрации, хранения и анализа информации о стационарных электрических процессах в электрических сетях и оборудовании, контроля состояния оборудования типа «включено – выключено», регистрации коротких замыканий и определения места повреждения на линиях электропередач 35 кВ и выше на промышленной частоте.

РАС функционирует в непрерывном круглосуточном режиме, осуществляет измерение и регистрацию параметров энергетического режима, синхронизированных с помощью сигналов единого точного времени глобальных навигационных систем. Все зарегистрированные в РАС параметры имеют метки единого астрономического времени, присваиваемые с дискретностью 1 микросекунда.

На Нововоронежской АЭС персонал имеет возможность проводить мониторинг, динамику и наблюдать тенденции состояния электротехнического оборудования в конкретный момент времени, без учета углубленной обработки данных. Существующие системы контроля и диагностики состояния ТГ предоставляют оператору значительное количество информации о текущем состоянии оборудования, однако в них можно выделить следующие типовые недостатки:

- наличие только предупредительной и аварийной сигнализации, без сигнализации по изменению параметров;
- отсутствие возможности анализа взаимосвязанных величин;
- недостаточная глубина хранения информации;
- отсутствие возможности математических операций с контролируруемыми параметрами;
- часть систем выполняют функции защиты, без диагностического анализа контролируемых величин.

Можно сделать следующий вывод: качество контроля и диагностики состояния ТГ можно поднять на более высокий уровень за счет применения специализированных автоматизированных систем, направленных на автоматический математический анализ всего объема информации, поступающего с оборудования в комплексной постановке (т.е. с учетом одновременного рассмотрения и анализа

общего многообразия параметров)¹. В данном контексте особое внимание стоит уделить общемировому тренду на цифровизацию, включающего в себя ряд направлений, развитие и внедрение в практику которых с высокой степенью вероятности может привести к значительным улучшениям в процессе контроля и диагностики состояния оборудования и, как следствие, к повышению безопасности и эксплуатационной надежности энергоблока АЭС в целом.

Библиографический список

1. Инструкция по эксплуатации турбогенератора типа ТЗВ-1200-2АУЗ блока № 1 Нововоронежской АЭС-2 NW2O.E.058.1.0UMA&&.MKA&&.031.EA.0001.
2. Система АСВД. Руководство по эксплуатации. ИЦФР.402141.017РЭ NW2O.W.133.1.&&&&&.CN&&.070.KC.0006. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция».
3. Автоматизированная система контроля вибраций и механических величин основного роторного оборудования (АСВД). Описание базы данных 643.07623615.80000 – 01 90 01. NW2O.E.433.2.0UMA&&.CND&&.070.CZ.0001. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» – 2013 г.
4. **Овчаренко, Н.И.** Автоматика энергосистем: учебник для вузов. – 4-е изд., стереот. – 2018. – 476 с.
5. **Старшинов, В.А.,** Пираторов, М.В., Козина, М.А. Электрическая часть электростанций и подстанций: учебное пособие. – М.: МЭИ, 2015. – 296 с.
6. **Зорин, В.М.** Атомные электростанции: учеб. пособие для вузов/ В.М.Зорин. – М.: МЭИ, 2012. – 672 с.
7. **Ширяев, Д.А.,** Зимин, А.И. Устойчивость энергосистемы, при использовании бесщеточной диодной системы возбуждения турбогенератора энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 с регулятором сильного действия AVR-ЗМТ // Известия вузов. Атомная энергетика – 2017. – № 3. – С. 131-141.
8. **Степин, Н.В.,** Ширяев, Д.А., Зимин, А.И. Комплекс мероприятий по обеспечению надежности системы электроснабжения энергоблоков НВАЭС // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 89-95.
9. **Ширяев, Д.А.,** Зимин, А.И., Электротехническое оборудование энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-1200: уч. пос. – Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. – 256 с.

¹ Данный тезис может быть обобщен на любое сложное технологическое оборудование (не только электротехническое), состояние которого контролируется большим количеством систем одновременно.

A.D. Danilov¹, D.A. Shiryaev², A.I. Zimin², A.A. Druzhaev³

**ANALYSIS OF METHODS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS
OF TURBO GENERATORS ON THE EXAMPLE OF POWER UNITS
OF GENERATION "3+" WITH VVER-1200 REACTORS.**

Voronezh State Technical University¹

Rosenergoatom Concern JSC Novovoronezh Nuclear Power Plant Branch ²

JSC «All-Russian Research Institute for the Operation of Nuclear Power Plants»³

Abstract. Within the framework of this article, the systems for monitoring and diagnosing the condition of the turbine generator (TG) of the Novovoronezh NPP-2 power unit No. 1 (a key piece of equipment both from the point of view of safety and economic efficiency of operation of the power unit) are considered, their advantages and disadvantages are analyzed, and a conclusion is made about the possible direction of further development of these systems in order to improving the quality of equipment condition monitoring.

Keywords: Novovoronezh NPP; power unit; turbo generator; control; diagnostics; information system; predictive analytics.

References

- [1] Operating instructions for the turbogenerator type T3B-1200-2AU3 unit No. 1 of Novovoronezh NPP-2 NW2O.E.058.1.0UMA&&.MKA&&.031.EA.0001.
- [2] ASVD system. Operation manual. ICFR.402141.017RE NW2O.W.133.1.&&&&&.CN&&.070.KC.0006. A branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant.
- [3] Automated vibration control system and mechanical values of the main rotary equipment (ASVD). Description of the database 643.07623615.80000 – 01 90 01 . NW2O.E.433.2.0UMA&&.CND&&.070.CZ.0001. Branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant – 2013
- [4] Ovcharenko N.I. Automation of power systems: textbook for universities. – 4th ed., stereot. – 2018. - 476 p. – ISBN 978-5-383-01299-4.
- [5] Starshinov V.A., Piratorov M.V., Kozinova M.A. Electrical part of power plants and substations: textbook. – M.: Ed. MEI House, 2015. – 296 p.
- [6] Zorin V.M. Nuclear power plants: studies. the manual for universities / V.M.Zorin. – M.: Publishing house of the MEI, 2012. – 672 p.: ill.; 60x90/16. – ISBN 978-5-383-00604-7 (in the lane), 1000 copies.
- [7] Shiryaev D.A., Zimin A.I. Stability of the power system when using a brushless diode excitation system of the turbogenerator of the Novovoronezh NPP-2 power unit No. 1 with a strong-acting regulator AVR-3MT. News of universities. Nuclear Power Engineering, 2017. No. 3. pp. 131-141.
- [8] Stepin N.V., Shiryaev D.A., Zimin A.I. A set of measures to ensure the reliability of the power supply system of NWPP.
- [9] Shiryaev D.A., Zimin A.I., Electrical equipment of power units with VVER-1200 type reactors: textbook. - LLC RPG "Ninth cloud". - Novovoronezh, 2021. - - 256 p.: tsv.il. – ISBN 978-5-6046275-1-8, 500 copies.

А.С. Джериу

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ PSCAD/EMTDC

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В данной работе алгоритм дифференциально-логической тестируется с помощью программы PSCAD/EMTDC. Раскрыт принцип и построение работы цифровых дифференциальных защит силовых трансформаторов от воздействия внутреннего короткого замыкания при отказе трансформатора тока на одной стороне защищаемого трансформатора. На основе этого описания в программе PSCAD/EMTDC была смоделирована дифференциально-логическая трансформатора. В зависимости от этого алгоритма повышается надежность системы защиты. Предлагаемые тестовые системы могут быть использованы для тестирования новых алгоритмов дифференциальной защиты трансформаторов и реальных дифференциальных реле.

Ключевые слова: дифференциально-логическая силовых трансформаторов, трансформатор тока, зона защиты, программное обеспечение PSCAD/EMTDC

Алгоритм реле энергосистемы, используемый в функциях защиты, должен быть испытан в соответствии со специальными процедурами. Возможности для представления всех энергосистем и анализа правильности проектирования и эксплуатации могут быть реализованы с помощью программного обеспечения для моделирования. Одним из таких программ является PSCAD/EMTDC. В библиотеке программы очень хорошо оборудованы, элементы и компоненты моделирования и тестирования энергосистемы. В данной работе проверена схема дифференциально-логической трансформатора по этой программе.

Дифференциальная защита является основной защитой больших силовых трансформаторов от последствий внутреннего короткого замыкания. Она должна действовать быстро и чувствительно при внутренних однофазных и многофазных коротких замыканиях. Зона защиты может быть определена в зависимости от расположения трансформаторов тока. В дифференциальной защите два трансформатора тока расположены для защиты объекта, например трансформатора, как показано на рис. 1.

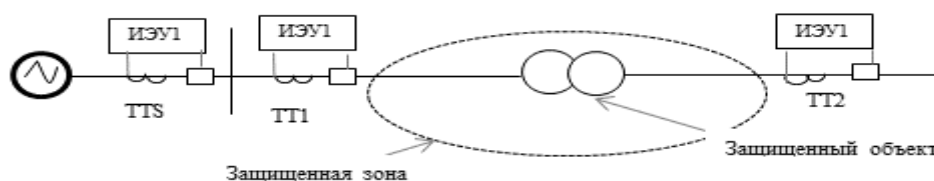


Рис. 1. Схема дифференциальной защита

Как видно из рис. 1, в защищаемой зоне только один элемент расположен между двумя трансформаторами тока ТТ1 и ТТ2. Это традиционная дифференциальная защита для любого элемента электрической сети. В защищаемой зоне, при внутреннем коротком замыкании однофазного или многофазного, защиты должны действовать быстродействующие и отключают защищаемый элемент, расположенный в этой зоне.

С другой стороны, схема дифференциально-логической должна оставаться нечувствительной при внешнем КЗ вне своей зоны. В нормальном состоянии или при внешнем замыкании, дифференциальный ток должен быть равен нулю. Из-за насыщения трансформатора тока и погрешности коэффициента трансформации ТТ приводит к ненулевому значению тока и неправильному срабатыванию защиты. Таким образом, в предлагаемом методе и в зависимости от протокола IEC61850 информация может обмениваться между интеллектуальными электронными устройствами по каналу связи и автоматически принимать правильное решение об изоляции элемента при возникновении замыкания.

Моделирование и анализ схемы дифференциальной защиты силового трансформатора

На рис. 2 показан случай исследования этой статьи. Изменение информации в электрической сети зависит от принципа IEC61850 дает допуск для повышения надежности системы защиты. В случае отказа трансформатора тока ТТ2, ИЭУ 2, ИЭУ 4 и ИЭУ 5 управляют сигнал чтобы отключить питание от трансформатора при возникновении КЗ. В этом случае в зоне защиты находятся трансформатор и шин.

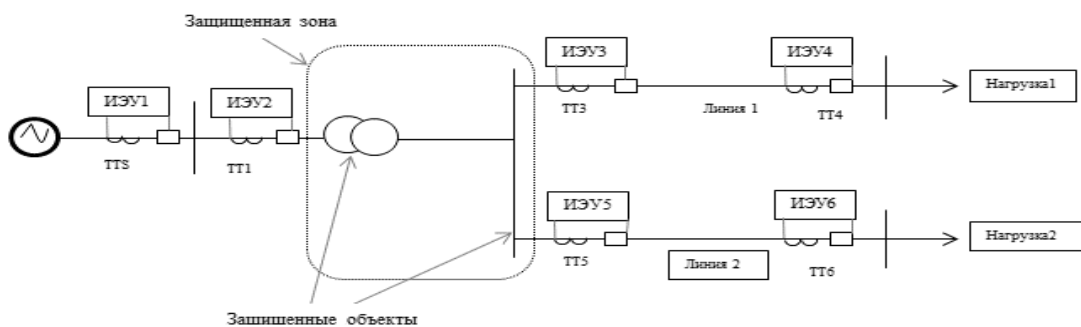


Рис. 2. Зона защиты при отказе ТТ2

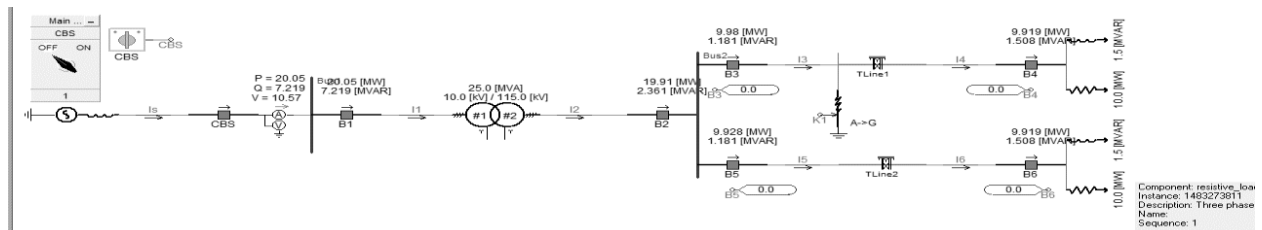


Рис. 3. PSCAD

В табл. 1 представлены параметры и данные электрической сети

Таблица 1

Параметры и данные электрической сети

| | Мощность, MVA | | Напряжения, KV | | Импеданс, Ω | | | | |
|---------------|---------------|---------|----------------|------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------|-----------|
| | | | ВН | НН | X_T, Ω | R_T, Ω | $\Delta R_k, \text{кВТ}$ | $R_x, \text{кВТ}$ | $U_k, \%$ |
| Генератор | 30 | | 10 | | 5 | | | | |
| трансформатор | 25 | | 115 | 10,5 | 55,9 | 2,54 | 120 | 27 | 10,5 |
| Линия 1 | - | | 115 | | $X_{уд}, \Omega / \text{Km}$ | $R_{уд}, \Omega / \text{Km}$ | Длина, Km | | |
| | | | | | 0,4 | 0,1 | | | |
| Линия 2 | - | | 115 | | 0,4 | 0,1 | 10 | | |
| Нагрузка1 | P, Мват | Q, Мвар | 115 | | | | | | |
| | 10 | 1,5 | | | | | | | |
| Нагрузка2 | 10 | 1,5 | 115 | | | | | | |

Процессы моделирования были сосредоточены на логике защиты операций. Реализация модели в PSCAD показана на рис. 3, а логическое управление на рис. 4

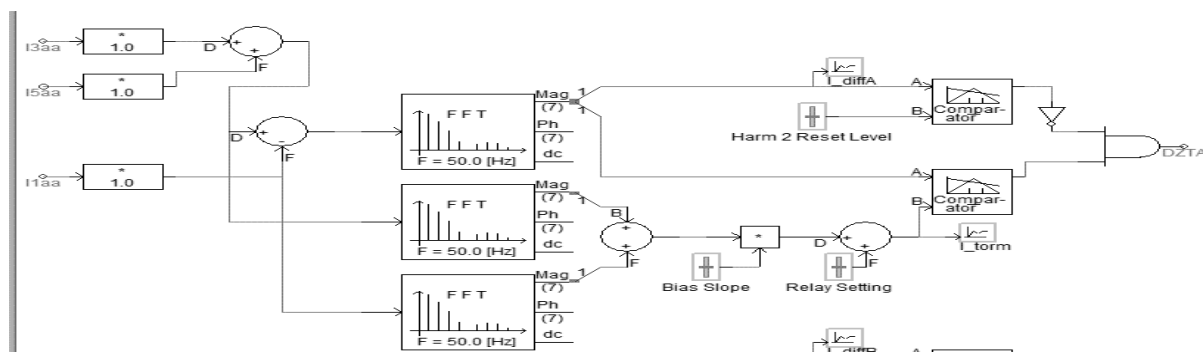
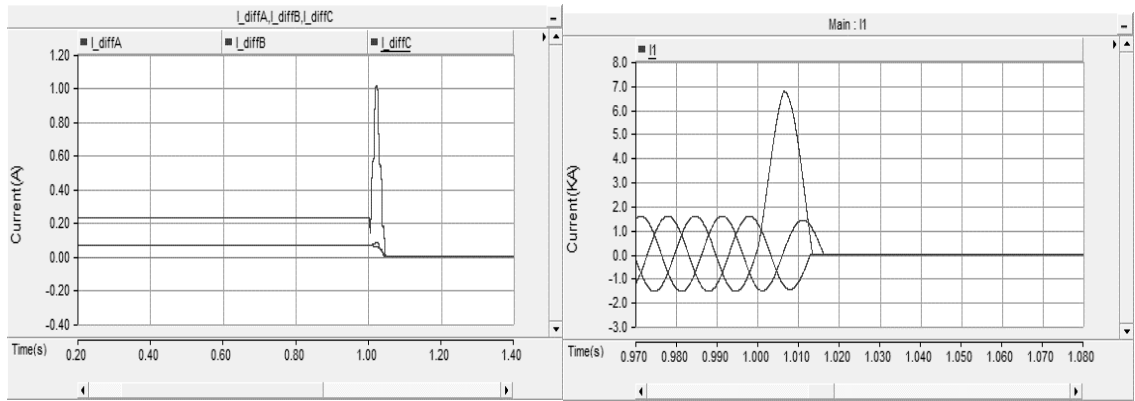


Рис. 4. PSCAD. Схема логического управления

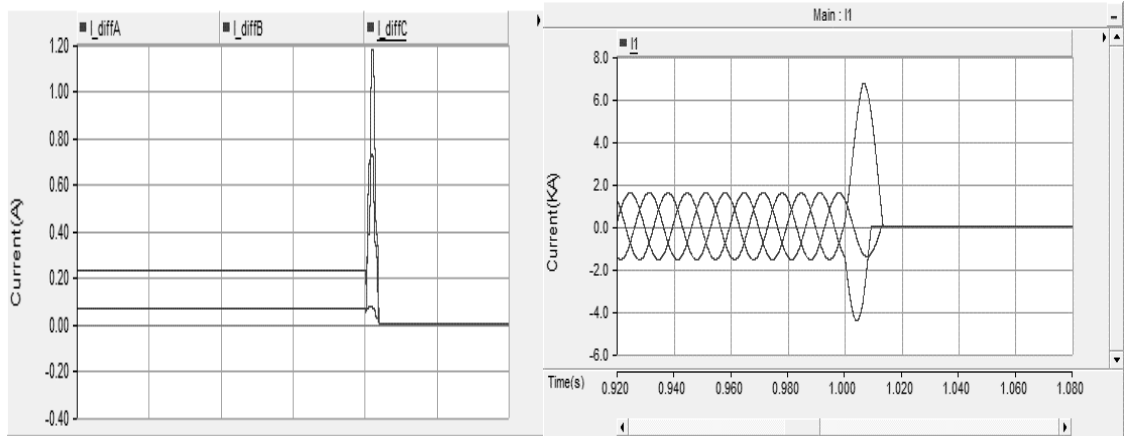
Из рис .2 и спецификации, приведенной в табл.1, можно определить следующие компоненты:

- первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А: сторона ВН = 125 А, сторона НН = 1374А;
- коэффициент трансформации трансформатора тока: ВН = 150/5, НН=1500/5;
- вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А: сторона ВН = 4,16 А, сторона НН = 4,58А;
- максимальное сопротивление трансформатора = 74,36 Ω ;
- минимальное сопротивление трансформатора = 36,5 Ω ;
- максимальный ток внешнего КЗ (К1) на стороне ВН = 166,09 А;
- расчетный ток максимального внешнего КЗ, приведенный к номинальному току трансформатора (в о.е.) = 1,328

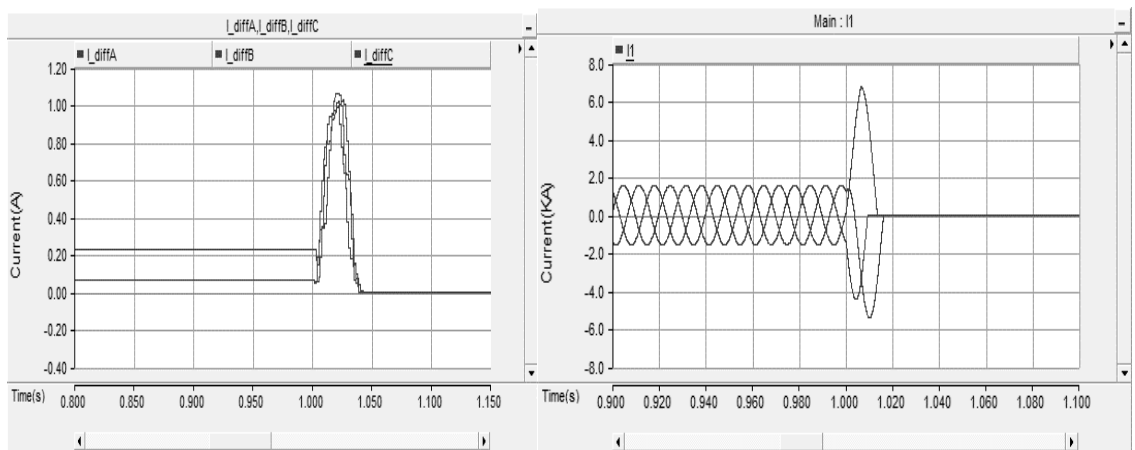
- расчетный ток небаланса при внешнем КЗ = 0,8366.



а) б)
Рис. 5. Однофазное замыкание в зоне защиты:
 а) дифференциальный ток, б) номинальный ток



а) б)
Рис. 6. двухфазное замыкание всей зоны защиты:
 а) дифференциальный ток, б) номинальный ток



а) б)
Рис. 7. Трехфазное замыкание всей зоны защиты:
 а) дифференциальный ток, б) номинальный ток

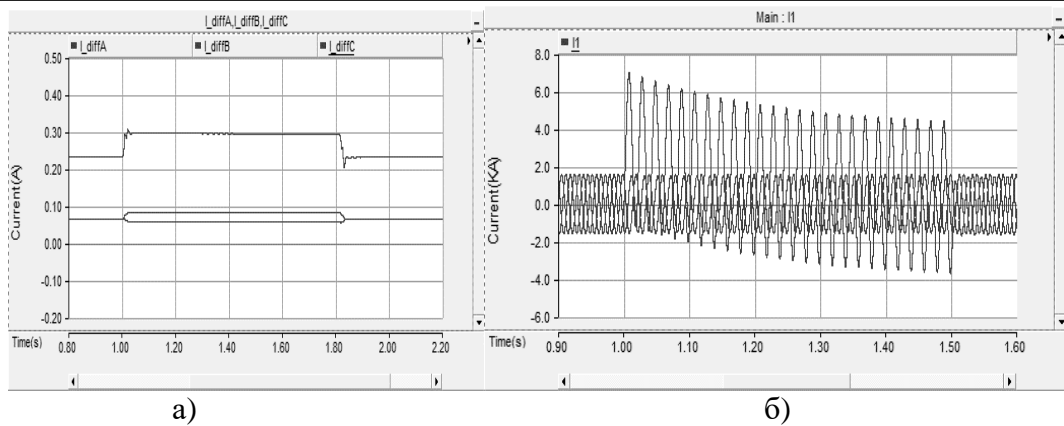


Рис. 8. Однофазное замыкание вне зоны защиты:
а) дифференциальный ток, б) номинальный ток

Тестирование моделирования проводится для всех типов разломов по всей зоне и вне зоны. Результаты имитационных испытаний показаны на рис. 5, 6 и 7 и срабатывания защиты. Время подачи замыкания 1 с и длительностью 0,5 с.

Симметрично результаты теста на двухфазное и трехфазное замыкание вне зоны защиты, нет реакции от реле защиты из-за замыкания расположено вне зоны защиты. Результаты моделирования показывают, что при выходе из строя трансформатора тока на одной стороне защищаемого трансформатора другие реле защиты подают сигнал на отключение питания трансформатора при возникновении короткого замыкания в защищаемой зоне. Аналогично, алгоритм может быть применен, когда другая сторона трансформатора (СТ1) не смогла предоставить необходимые данные о статусе работы. Из этой модели можно получить увеличение зоны защиты и повысить надежность всей системы защиты при выходе из строя одного или нескольких трансформаторов тока.

Выводы

С помощью программы PSCAD/EMTDC была протестирована новая процедура дифференциально-логической. В модели были протестированы реакция защиты и управления выключателями, чтобы изолировать неработоспособную часть сети во всей зоне защиты. Также из логического управления можно определить отправку сигнала отключения на другие автоматические выключатели для отключения источника питания от неисправной части, если в сети есть другой ресурс энергии. Недостатком данной схемы является потеря системы связи между интеллектуальными электронными устройствами.

Библиографический список

1. **Куликов, А.Л.** Дифференциально-логический принцип релейной защиты сетей электроснабжения / А.Л. Куликов, М.В. Шарыгин // Электрические станции. – 2018. – № 3. – С. 37–46.
2. **Брахма, С.М.,** Гиргис, А.А. Разработка схемы адаптивной защиты распределительных систем с высоким проникновением распределенной генерации // IEEE Trans.Power Del. – 2004. – № 19. – С. 56-63.
3. Нормы времени на техническое обслуживание устройств релейной защиты и автоматики. – М.: Энергия, 2014. – 116 с.

4. **Шабад, М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ИЭИПК. – 350 с.
5. **Шин, Х.,** Че, С.Х., Ким, Э.-Х. Проектирование схем защиты микросетей с использованием программ PSCAD/EMTDC и ETAP // Энергии. – 2020. – № 13. – С. 5784.
6. **Цзи, Л.,** Цао, З., Хонг, К., Чанг, Х., Фу, Ю., Ши, Дж., Ми, Ю., Ли, З. Улучшенный метод защиты от перегрузки по току с обратнозависимой выдержкой времени для микросети с оптимизированным ускорением и координацией // Энергии. – 2020. – № 13. – С. 5726.
7. **Замани, М.А.,** Яздани, А., Сидху, Т.С. Стратегия защиты с помощью связи для микросетей среднего напряжения на основе инверторов // IEEE транс. Smart Grid. – 2012. – № 3. – С. 2088–2099.

A.S. Jeryo

SIMULATION DIFFERENTIAL LOGIC PROTECTION OF POWER TRANSFORMERS USING PSCAD/EMTDC

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. In this paper the algorithm of differential protection is tested by the PSCAD / EMTDC software. The principle and the construction of operation of power transformers' numerical differential protections against the effects of internal short circuit is expanded when there is a failure take place in current transformer in one side of protected transformer. On the basis of that description, in PSCAD/EMTDC software was modeled the differential protection of transformer. Depending on this algorithm, the reliability of protection system is increased. The proposed test systems can be used to test new transformer differential protection algorithms and the actual differential relays available on the market.

Key words: differential logic of power transformers, current transformer, protection zone, PSCAD/EMTDC software.

References

- [1] Kulikov A.L., Sharygin M.V. Differential-logical principle of relay protection of power supply networks // Electric Stations, 2018. No. 3. p. 37–46.
- [2] Brahma, S.M.; Girgis, A.A. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation. IEEE Trans.Power Del. 2004, 19,56–63.
- [3] Time limits for maintenance of relay protection and automation devices. M.: Energy,2014. - 116 p.
- [4] Shabad M.A. Calculations of protection and automation of distribution networks.
- [5] Shin, H.; Chae, S.H.; Kim, E.-H. Design of microgrid protection schemes using PSCAD/EMTDC and ETAPprograms. Energies 2020, 13, 5784.
- [6] Ji, L.; Cao, Z.; Hong, Q.; Chang, X.; Fu, Y.; Shi, J.; Mi, Y.; Li, Z. An improved inverse-time over-current protection method for a microgrid with optimized acceleration and coordination. Energies 2020, 13, 5726.
- [7] Zamani, M.A.; Yazdani, A.; Sidhu, T.S. A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids. IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 2088–2099.

А.А. Дьяконов, Н.Г. Семенова

СТРУКТУРА ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО ЛИКВИДАЦИИ НАРУШЕНИЙ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Аннотация. В статье рассмотрена структура процесса принятия решений по ликвидации нарушений нормального режима.

Ключевые слова: процесс принятия решений, ликвидация нарушений нормального режима, распределительные сети.

В соответствии с правилами предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистемы и объектов электроэнергетики [1], оперативный персонал должен обеспечить наиболее надежную послеаварийную схему объектов электроэнергетики. Так как системы электроснабжения современных городов состоят из большого количества распределительных сетей, работающих в разомкнутом режиме с большим количеством коммутационных аппаратов и ограниченной пропускной способности линий электропередач (далее ЛЭП), то выбор из множества послеаварийных схем наиболее надежной и удовлетворяющей требованиям действующего законодательства, регулирующее отношения в сфере электроэнергетики, является актуальным. Под выбором наиболее надежной послеаварийной схемы понимается схема, обеспечивающая электроснабжение всех отключенных потребителей с сохранением категории надежности электроснабжения потребителей и допустимого резерва.

Основываясь на классической теории принятия решения [2], для выбора наиболее надежной послеаварийной схемы предложена следующая структура процесса принятия решения по ликвидации нарушений нормального режима (табл. 1).

На I этапе осуществляется формализация нормального режима работы системы электроснабжения города, включающая в себя три подэтапа: ввод информации о параметрах режима, расчет установившихся режимов, оценка начального состояния.

При вводе информации о параметрах режима нами предложено описать систему электроснабжения города с помощью теории графов, в которой ветвями графа являются кабели и провода ЛЭП, а узлами являются шины, или контактные точки соединения нескольких ЛЭП. База узлов включает в себя: индикационный номер, диспетчерское наименование, наименование присоединения, значения активной и реактивной потребляемой мощности, потребляемого тока. База ветвей содержит: индикационный номер, диспетчерское наименование, наименование при-

соединения, текущее состояние (включено, отключено, неисправно), индикационный номер узла в начале, индикационный номер узла в конце, протяженность провода ЛЭП, сопротивление, длительно допустимый ток, ток нагрузки. Дополнительно описание объектов, которые присоединяются к узлам, описываются с помощью базы объектов, включающей в себя: индикационный номер узла, тип объекта, параметры в соответствии с эксплуатационной документацией. Список коммутационных аппаратов, соединяющих ЛЭП и шины включает: индикационный номер, оперативное состояние, тип коммутационного аппарата (выключатель, выключатель нагрузки, разъединитель, болтовое соединение).

Таблица 1

Структура процесса принятия решения по ликвидации нарушений нормального режима

| I этап | II этап | III этап | IV этап |
|--|---|--|---|
| Формализация нормального режима работы | Формирование альтернатив послеаварийного режима | Оценка альтернатив послеаварийного режима | Выбор наилучшей альтернативы послеаварийного режима |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ввод информации о параметрах режима • Расчет установившихся режимов работы • Оценка начального состояния | <ul style="list-style-type: none"> • Определение области отключившегося оборудования • Составление альтернатив • Проверка альтернатив на технические ограничения | <ul style="list-style-type: none"> • Выбор критериев оценивания • Оценивание альтернатив | <ul style="list-style-type: none"> • Ранжирование • Принятие решения оперативным персоналом |

Расчет установившихся режимов работы необходим для получения дополнительной информации, а именно для определения напряжения в узлах и токовой нагрузки. В работе предложено расчет установившихся режимов осуществлять методом Ньютона с использованием нелинейных узловых уравнений [3]. Для расчета необходимо:

- 1) матричное представление топологии распределительной сети;
- 2) записать нагрузку в узлах виде векторов мощностей;
- 3) напряжение в балансирующем узле, равное номинальному значению;
- 4) составить матрицу-столбец сопротивлений ветвей и матрицу узловых проводимостей.

Уравнение узловых напряжений при заданных нагрузках в мощностях определяется следующим образом:

$$\Delta U = U - U_{\text{БУ}} = Y_y^{-1} \cdot \bar{s}, \quad (1)$$

где ΔU – матрица-столбец падений напряжений в узлах относительно балансирующего, кВ; U – матрица напряжений в узлах; \bar{s} и U – сопряженные значения матриц узловых мощностей и напряжений.

При подстановке начальных приближений (номинальных напряжений) уравнение (1) примет вид:

$$U_{\text{Бу}} - U + Y_y^{-1} \cdot \frac{\bar{s}}{\bar{U}} = 0 \quad (2)$$

Задается точность расчета ε , далее итерационным процессом осуществляется расчет до достижения значений ε .

II этап. Формирование альтернатив послеаварийного режима, включает в себя три подэтапа: определение области отключившегося оборудования, составление альтернатив, проверка альтернатив на технические ограничения.

Определение области отключившегося оборудования осуществляется в этапе оценки начального состояния, результатом является список обесточенных узлов, ветвей, объектов и коммутационных аппаратов.

Создание альтернатив послеаварийного режима в работе предлагается осуществлять с помощью метода искусственного интеллекта – генетических алгоритмов [4]. В этом случае популяцией является максимальное число особей, особи состоят их хромосом, хромосомы состоят из генов, в генах закодирован параметр системы электроснабжения.

Проверка жизнеспособности сформированных особей осуществляется с помощью подэтапа проверки альтернатив на техническое ограничение, где определяется текущая способность альтернативы, обеспечить дополнительную нагрузку:

$$I_d = \min(I_{ds}, I_{dn}), \quad (3)$$

где I_{ds} – дополнительная токовая нагрузка, определяющая пропускную способность ЛЭП; I_{dn} – дополнительная токовая нагрузка, не приводящая к снижению напряжения в допустимых пределах.

III этап. Оценка альтернатив послеаварийного режима.

Полученные альтернативы послеаварийного режима, которые прошли техническое ограничение, оцениваются в соответствии со следующими критериями:

1) минимизации оперативных переключений. Данный критерий позволяет определить альтернативы с точки зрения временных затрат на производство оперативных переключений, чем меньше, тем быстрее;

2) максимизация текущего резерва. Формируются альтернативы, обладающие наибольшей пропускной способностью, данный признак позволяет определить надежность схемы, если помимо текущего нарушения электроснабжения произойдет повреждение оборудования в смежных альтернативах;

3) минимизация квадратичного отклонения напряжения. Выбираются альтернативы, имеющие наименьшее отклонения от напряжения. Согласно договору о техническом присоединении между территориальной сетевой организацией и потребителем указывается минимальное и максимальное допустимое передаваемое напряжение;

4) минимизация потерь активной мощности. Формируются альтернативы, обладающие наименьшими потерями мощности при транспортировке. Данный критерий позволяет определить экономическую эффективность;

5) максимизация надежности электроснабжения. Данный критерий позволяет определить сохранность категории надежности электроснабжения ответственных потребителей в выбранной альтернативе.

IV этап. Выбор наилучшей альтернативы

На этом этапе осуществляется ранжирование альтернатив по нормированному критерию надежного электроснабжения и выбор наилучшей альтернативы оперативным персоналом.

Предложенная структура процесса принятия решения по ликвидации нарушений нормального режима облегчит работу оперативного персонала и сократит время, необходимое для выбора наилучшей послеаварийной схемы в соответствии с выбранными приоритетами.

Библиографический список

1. Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистемы и объектов электроэнергетики. Утверждена приказом Министерства энергетики Российской Федерации № 548 от 12.07.2018.
2. **Соловьев, Н.А.** Основы теории принятия решений для программистов: учебное пособие. / Н.А. Соловьев, Е.Н. Чернопрудова, Д.А. Лесовой. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 187 с
3. **Костин, В.Н.,** Распопов Е.В., Родченко Е.А. Передача и распределение электроэнергии: Учеб. пособие / В.Н. Костин, Е.В. Распопов, Е.А. Родченко. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 147 с.
4. **Доросинский, Л. Г.** Папуловская Н. В. Основы теории принятия решений и ее применение для оптимальной обработки сигналов в РСА: учебное пособие. – Екатеринбург: УГУ, 2018. – 204 с.

A.A. Dyakonov, N.G. Semenova

**STRUCTURE OF THE DECISION-MAKING PROCESS
ON THE LIMINATION OF VIOLATIONS OF THE NORMAL MODE**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University"

Abstract. The article considers the structure of the decision-making process for the elimination of violations of the normal regime.

Key words: decision-making process, elimination of violations of the normal regime, distribution networks.

References

- [1] Rules for preventing the development and elimination of violations of the normal regime of the electrical part of the power system and electric power facilities. Approved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 548 dated July 12, 2018.
- [2] Solovyov, N.A. Fundamentals of Decision Making for Programmers: A Study Guide. / ON THE. Solovyov, E.N. Chernoprudova, D.A. Forest. - Orenburg: Orenburg state. un-t., 2012. - 187 p.
- [3] Kostin V.N., Raspopov E.V., Rodchenko E.A. Transmission and distribution of electricity: Proc. Benefit. - St. Petersburg: SZTU, 2003 - 147 p.
- [4] Dorosinsky L. G., Papulovskaya N. V. Fundamentals of the theory of decision making and its application for optimal signal processing in SAR: textbook - Ekaterinburg: Publishing house Ural. un-ta, 2018. - 204 p.

К.И. Золотухин¹, В.С. Котов¹, В.В. Барсков², И.А. Карпов¹

НОВЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ (ИССЛЕДОВАНИЕ ГРС «НИКОЛЬСКОЕ»)

ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» им. Н.Г. Кузнецова¹

Высшая школа энергетического машиностроения, Института энергетики,
Санкт-Петербургского Университета Петра Великого²

Аннотация. В результате исследования: выбрана оптимальная схема подключения детандер–генераторного агрегата, произведен расчет температуры подогрева с учетом ограничений и вырабатываемой мощности детандер–генератором в зависимости от расхода природного газа на ГРС, возникла неопределенность в компоновке ДГА, поэтому был произведен расчет и создана конструкция двух установок.

Ключевые слова: магистральный газопровод, природный газ, газопровод-отвод, газораспределительная станция (грс), узел редуцирования, узел подогрева, детандер–генераторный агрегат (дга).

Согласно региональной программе «Газификация жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций на 2022-2031 годы» мэр города Санкт-Петербурга ставит основной задачей постановления: «Развитие и модернизация существующей газораспределительной системы Санкт-Петербурга». Тем более, в среднем прирост потребления каждый год повышается на 12 миллиардов кубических метров газа. Тенденция развития сейчас направлена на: расширение зоны охвата территории Санкт-Петербурга газораспределительными сетями для подачи природного газа новым перспективным застройкам, как жилым, так и промышленным. В перспективе эти факторы позволят увеличить количество производимой электроэнергии на рассматриваемой ГРС.

«Никольское» ГРС предназначена для снабжения городов Никольское и Отрадное, а также поселков Красный Бор и Пустынка. В перспективе развития газ из ГРС будет подаваться на Красноборскую промзону, где планируется строительство новых промышленных предприятий. ГРС по плану газификации будет снабжать поселок Гладкое. Также будет соединена с ГРС «Отрадное» для лучшей стабильности работы и возможности полного отключения на ремонт.

Настоящая станция относится к газораспределительным станциям блочно-модульного проектирования, то есть проектирование подобной ГРС подразумевает несколько блоков (узлов) на открытом воздухе, в которых и находятся основные узлы. В блоках смонтировано оборудование на металлическом каркасе, а блоки снабжены свечами сброса газа и отключающей арматурой, которые находятся вне блоков. Данная станция возведена в 1981 году по проекту «Сибгипрогаз». Большим

преимуществом по сравнению, в частности с ГРС индивидуального проектирования, является простота и скорость монтажа узлов, легкость обслуживания и ремонта, а также низкая трудоемкость проектирования инженерных сетей. Следует отметить высокое качество бытовых условий эксплуатирующего персонала.

Стандартной задачей газораспределительной станции является снижение давления магистрального потока газа с его последующего распределения конечному потребителю. При такой простой схеме избыточная потенциальная энергия природного газа расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений в виде дроссельных устройств, что и создает пониженное давление, но это приводит к растрачиванию большого количества энергии потока газа. Для регенерации этой энергии на ГРС внедряют ДГА.

Сжигание газа на компрессорных станциях влечет за собой огромные выбросы тепла с температурой порядка 500 °С в атмосферу. Хотя и существует тенденция внедрения комбинированных установок для газоперекачивающего агрегата, эта технология все еще не повсеместна. Около половины всех тепловых загрязнений от промышленности выбрасывает именно сфера транспорта газа, включая сжигание газа на ГРС для его подогрева во избежание гидратообразования при дросселировании. Рационально подогревать природный газ перед адиабатным расширением в ДГА этими выбросами тепла на компрессорных станциях. Поэтому, например, целесообразно модернизировать подогреватель газа на использование электроэнергии для подогрева газа. Однако, невозможно создать электрический подогрев только за счет вырабатываемой ДГА мощности, так как он потребует больше, чем ДГА может выработать. Для создания равной температуры на входе и выходе ГРС потребуются подведение теплоты, эквивалентной располагаемой работе ДГА. А с учетом того, что внутренний КПД всегда меньше 100%, полезная работа будет меньше работы располагаемой, а, следовательно, генерируемая мощность будет всегда меньше подведенной теплоты с помощью электрического тока.

Внедрение турбодетандера приведет к бесперебойному электроснабжению ГРС. Основными потребителями на ГРС являются приборы освещения как внешние, так и внутренние. Второстепенными потребителями являются станции катодной защиты, расположенные вблизи ГРС. Надежность электростанций и ЛЭП Ленинградской области оставляет желать лучшего. К тому же резервные дизель-генераторы небезопасно применять на ГРС, поэтому в случае отключения электростанции, ГРС будет способна к автономному функционированию. Постоянный источник электроэнергии приведет к увеличению надежности рассматриваемой ГРС.

Более того, турбодетандер на ГРС средней производительности дает гораздо больше электроэнергии, чем может потребить, поэтому есть возможность отдавать электроэнергию обратно в ЛЭП, при условии введении правительством возможности производить электроэнергию и выводить в ЛЭП. Вопрос уже рассматривается, но если принять во внимание монополизированность рынка производства электроэнергии, то скорое разрешение данной возможности отсутствует, следовательно, постоянные споры об окупаемости детандер-генераторных агрегатов происходят

по причине невозможности стать индивидуальным производителем электроэнергии. При этом рационально постепенно заменять каждую линию редуцирования детандер-генераторным агрегатом в ожидании потребителей электроэнергии или разрешения продажи ее обратно в ЛЭП.

На рис. 1 изображена гистограмма потребностей ГРС в электроэнергии.

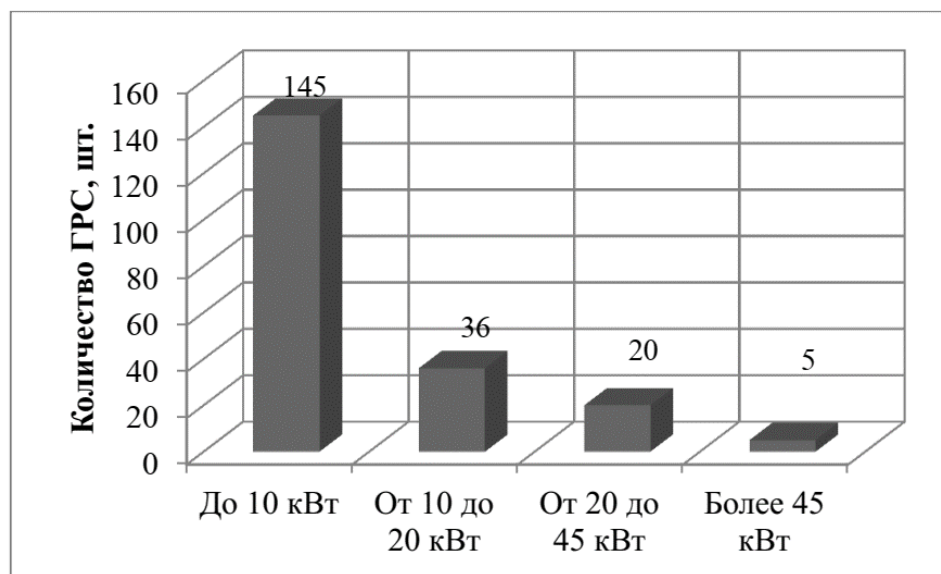


Рис. 1. Энергопотребности ГРС ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

Судя по гистограмме, наиболее востребованными для ГРС являются ДГА малой мощности до 100 кВт, что определяется из возможности постепенного выхода на полный потенциал вырабатываемой энергии установкой нескольких ДГА параллельно, ведь статистика показывает, что около 50% всех ГРС имеют потенциал выработки менее 500 кВт, к такой относится и ГРС «Никольское».

Так как на ГРС «Никольское» имеется 2 подогревателя, то есть возможность применить по одному подогревателю на каждый из турбодетандеров. Рассмотрим возможность наибольшего перепада давлений в турбодетандере.

Учитывая максимальную температуру подогрева, можно вычислить какой будет выходная температура в зависимости от числа p_2/p_0 . На рис. 2 изображена зависимость выходной температуры от отношения p_2/p_0 с учетом КПД турбины.

Из рис. 2 следует, что даже при максимально возможном подогреве (70 °С) невозможно добиться полного перепада давлений в одной установке. Благодаря графику, можно подобрать оптимальное число отношений p_2/p_0 для оптимального режима работы подогревателя. Примем за оптимальное отношение $p_2/p_0 = 0,5$ для обоих турбодетандеров, подключенных последовательно. Для первого перепад давлений составит от 5,4 МПа до 2,7 МПа, для второго от 2,7 МПа до 1,35 МПа. Тогда по формуле 1 и 2 найдем значение необходимой температуры подогрева при условии, что на выходе она должна составлять 5 °С и для $\eta=0,6$.

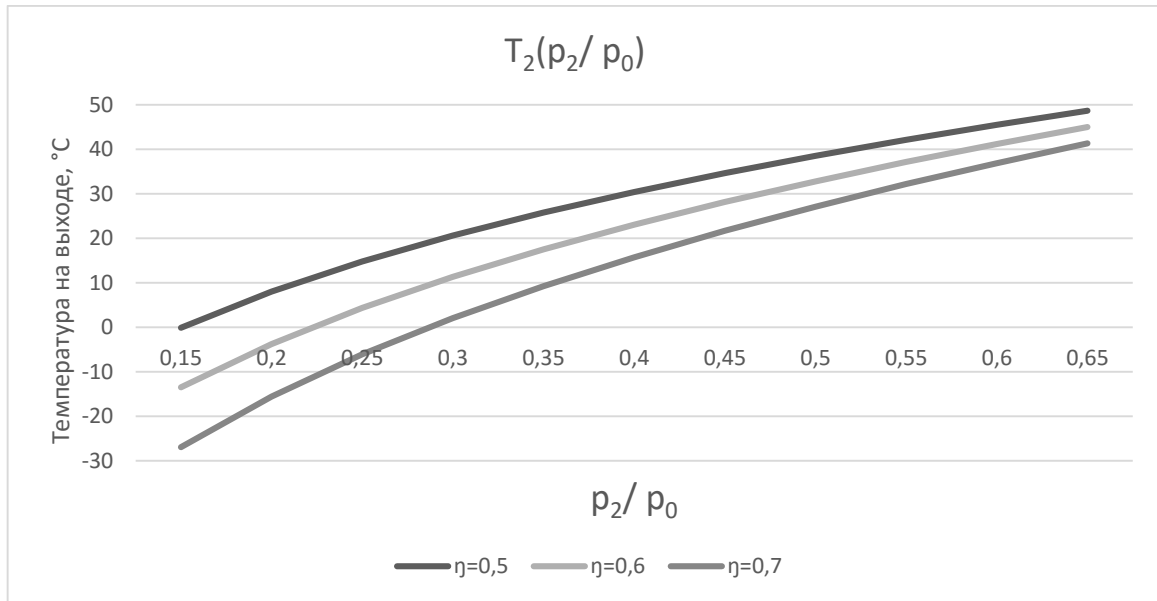


Рис. 2. График зависимости выходной температуры от числа p_2/p_0

Из графика следует, что необходимая температура подогрева на 23° .
 Произведем проверочный расчет для первого ДГА:

$$T_{2t} = (273 + 23) * (0,5)^{\frac{1,36-1}{1,36}} = 246 \text{ К}; \quad (1)$$

$$T_2 = 296 - 0,6 * (296 - 246) = 273 \text{ К}. \quad (2)$$

Найдем падение температуры при дросселировании после турбодетандера от 1,35 МПа до 0,6 МПа по формуле):

$$\Delta T_{ред} = (1,35 - 0,6) * 5,5 = 4,2 \text{ К}. \quad (3)$$

С учетом редуцирования после ДГА, температура подогрева составила $33,2^\circ$.
 Произведем проверочный расчет для второго ДГА:

$$T_{2t} = (273 + 33,2) * (0,5)^{\frac{1,34-1}{1,34}} = 254 \text{ К}; \quad (4)$$

$$T_2 = 306,2 - 0,6 * (306,2 - 254) = 278 \text{ К}. \quad (5)$$

Таким образом, учтены рекомендации производителя подогревателя природного газа, что разница подогрева вход-выход не должна превышать 45° . По программе «RefProp» необходимо найти перепад энтальпий. Примем для каждого из ДГА $H_{ад} = 46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Произведем расчет потенциала вырабатываемой энергии на ГРС для каждого из детандеров при условии перепада энтальпий $H_{ад} = 46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Потенциал выработки двух турбодетандеров с максимальным подогревом изображен на рис. 2. Как и в случае с одним детандером, каскад из двух установленны параллельно двум линиям редуцирования.

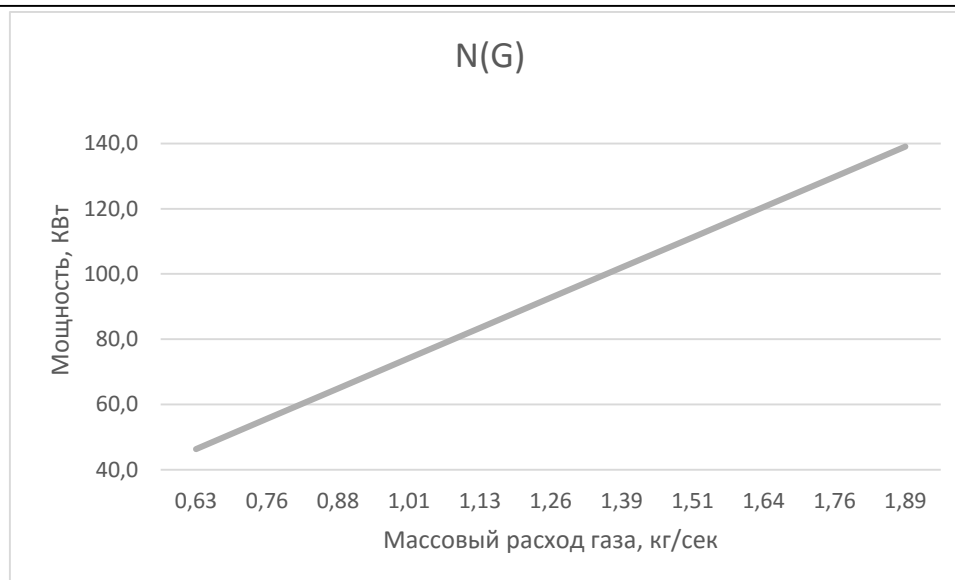


Рис. 3. График зависимости вырабатываемой мощности от массового расхода газа при $\eta=0,8$ для двух ДГА

Таким образом получилось снять нагрузку с подогревателей газа, уменьшив температуру подогрева с 45° до не более 33° , и увеличить перепад давлений с 3 МПа до более 4 МПа, тем самым увеличив вырабатываемую мощность.

Анализируя полученные результаты, можно судить о значительном преимуществе по вырабатываемой энергии схемы подогрева. Разница максимальной мощности между обычной схемой подключения турбодетандера и с последовательным подключением составила более 40 кВт, что ощутимо больше.

Однако у такой схемы есть ограничение по производительности. Для ГРС «Никольское» положена максимальная производительность 60 тыс. м³/час, на данный момент ее максимальная производительность составляет 30 тыс. м³/час, что допустимо, но с учетом перспективы расширения системы газоснабжения нерационально подключать турбодетандеры последовательно, хоть это и увеличивает все эксплуатационные показатели.

Библиографический список

1. BP Statistical Review of World Energy London: British Petroleum Co, 2019 // British Petroleum Company [Электронный ресурс] URL: www.bp.com (дата обращения: 06.04.2023).
2. «Газпром» увеличил экспорт в дальнее зарубежье в январе-июле на 23 % // ИА «Финмаркет» [Электронный ресурс] URL: <http://www.finmarket.ru/news/5521212> (дата обращения: 06.04.2023).
3. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 N 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [Электронный ресурс] / URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&rnd=oAWTzA&base=LAW&n=354840&dst=100012&field=134#4mV13bTOLO4OR0I5> (дата обращения: 04.04.2023).
4. **Епифанова, В. И.** Компрессорные и расширительные турбомашинны радиального типа / В. И. Епифанова. – М.: МВТУ им. Н. Баумана, 1998. – 376 с.
5. **Трухний, А.Д.** Термодинамические основы использования утилизационных турбодетандерных установок / А.Д. Трухний // Вестник МЭИ. – 1999. – №5. – С. 62-66.
6. **Твердохлебов, В. И.** Утилизационные турбоустановки для ГРС и КС / В. И. Твердохлебов, В.П. Мальханов // Газовая промышленность. – 1985. – № 7.– С. 57–66.

7. **Кубанов, А.Н.** Перспективы использования турбохолодильной техники на объектах добычи газа / А. Н. Кубанов, В. А. Хетагуров, Ф. М. Дедученко // Газовая промышленность. – 2004 – № 12. – С. 65–68.
8. **Гухман, Л.М.** Подготовка газа северных газовых месторождений к дальнему транспорту / Л.М. Гухман. – Л.: Недра, 1980. – 161 с.
9. **Гельман, М.** Электроэнергия из газовой трубы // Промышленные ведомости. – 2003. – № 6. – С. 13–18.
10. **Твердохлебов, В.И.** Утилизационные турбоустановки для ГРС и КС / В.И. Твердохлебов, В.П.Мальханов // Газовая промышленность. – 1985. – № 7.– С. 57–66.
11. **Мальханов, В.П.** Турбодетандерные агрегаты в системах подготовки и распределения природного газа / В.П. Мальханов. – М.: Нефть и газ (НГ), 2004. – 226 с.
12. **Цих, А. Д.** Термодинамический расчет турбодетандера / А. Д. Цих // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна . – 2013. – № 2 (19). – С. 95-106.
13. **Поляков, С.А.** Особенности проектирования энергетических установок, а также специальных систем и устройств военных ледоколов / С.А. Поляков, Б.Г. Иванов, А.А. Тельнов, Р.А. Поляков / Молодежь. Техника. Космос: Труды четырнадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции. в 4-х томах, Санкт-Петербург, 23–27 мая 2022 года. – СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2022. – С. 42-44.

K.I. Zolotuhin², V.S. Kotov¹, V.V. Barskov², I.A. Karpov¹

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A GAS DISTRIBUTION STATION ON THE EXAMPLE OF A GDS NIKOLSKOYE

Military Training and Research Center of the Navy of N.G. Kuznetsov¹
Higher School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic University²

Abstract. This article discusses the prospect of reducing energy losses during the transportation of natural gas through the use of various schemes of disposal expander-generator units, the statistics of world consumption of natural resources are indicated. The analysis of the fields of application of the expander-generator unit in the gas industry is carried out in detail. The advantages and disadvantages of this system are determined. Drawings of schemes for installing turbo expanders as part of gas distribution stations are given.

Keywords: main gas pipeline, natural gas, offshoot pipeline, gas distribution station (gds), pressure reduction unit, gas heating unit, expander-generator unit

References

- [1] BP Statistical Review of World Energy London: British Petroleum Co, 2019 // British Petroleum Company [Electronic source] URL: www.bp.com (date of reference: 06.04.2023).
- [2] Gazprom increased exports to non-CIS countries in January-July by 23% // IA Finmarket [Electronic source] URL: <http://www.finmarket.ru/news/5521212> (accessed: 06.04.2023).
- [3] Order of the Government of the Russian Federation dated 09.06.2020 N 1523-r "On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035" [Electronic source] / <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&rnd=oAW-TzA&base=LAW&n=354840&dst=100012&field=134#4mV13bTOLO4OR0I5> (date of reference: 04.04.2023).
- [4] Epifanova V. I. Compressor and expansion turbomachines of radial type / V. I. Epifanova. – M.: MVTU named after N. Bauman, 1998. – 376 p.
- [5] Trukhniy A.D. Thermodynamic bases of utilization of utilization turbo-expander installations / A.D. Trukhniy // Bulletin of the MEI. – 1999. - No. 5. – pp. 62-66.
- [6] Tverdokhlebov V. I. Utilization turbo installations for GRS and CS / V. I. Tverdokhlebov, V.P. Malkhanov // Gas industry. – 1985. – No. 7.– pp. 57-66.
- [7] Kubanov A.N. Prospects of using turbo-cooling equipment at gas production facilities / A. N. Kubanov, V. A. Khetagurov, F. M. Deduchenko // Gas industry. - 2004 – No. 12. – pp. 65-68.
- [8] Gukhman L.M. Preparation of gas from northern gas fields for long-distance transport / L.M. Gukhman. – L.: Nedra, 1980. - 161 p.
- [9] Gelman M. Electric power from a gas pipe / M. Gelman // Industrial Vedomosti. - 2003. – No. 6. – pp. 13-18.
- [10] Tverdokhlebov V.I. Utilization turbine installations for GRS and CS /V.I. Tverdokhlebov, V.P.Malkhanov // Gas industry. - 1985. – No. 7.– pp. 57-66.
- [11] Malkhanov, Viktor Paladievich. Turbodetander units in natural gas treatment and distribution systems / V.P. Malkhanov. - M.: Oil and Gas (NG), 2004 (Type. ed.). - 226 p .
- [12] Tsikh, A.D. Thermodynamic calculation of a turbodetander / A.D. Tsikh // . – 2013. – № 2(19). – Pp. 95-106.

- [13] Design features of power plants, as well as special systems and devices of military icebreakers / S. A. Polyakov, B. G. Ivanov, A. A. Telnov, R. A. Polyakov // Youth. Technic. Cosmos : Proceedings of the Fourteenth All-Russian Youth Scientific and Technical Conference. in 4 volumes, St. Petersburg, May 23-27, 2022. – St. Petersburg: Baltic State Technical University "Voenmeh", 2022. – pp. 42-44.

Э.Э. Ибатуллин, Е.И. Грачева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА ЗА ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

Казанский Государственный Энергетический Университет

Аннотация. В работе исследуются причины роста потерь электроэнергии холостого хода в трансформаторах в течение срока эксплуатации. Выведены формулы для расчета реальных потерь холостого хода трансформаторов. Проведено сравнение расчетных значений потерь холостого хода трансформаторов с паспортными и фактическими.

Ключевые слова: потери холостого хода трансформатора, силовой трансформатор, силовой трансформатор, условия эксплуатации, уравнения регрессии.

Актуальностью данного исследования обусловлена необходимостью совершенствования методов определения параметров роста потерь холостого хода силовых трансформаторов. [1]

В последние годы все больше исследователей обращают внимание на проблему увеличения потерь электроэнергии холостого хода (ХХ) в трансформаторах с течением времени, по сравнению с исходными паспортными данными. В то же время производители трансформаторов утверждают, что потери ХХ в исправных трансформаторах увеличиваются не более чем на 5% за весь срок их службы, который составляет 40 лет.

Однако проведенные испытания и анализ показали, что старение трансформаторов может приводить к значительному увеличению потерь ХХ, в зависимости от условий эксплуатации и качества обслуживания. Например, на примере ОАО "Тольяттинский трансформатор" были проанализированы данные измерений технических параметров трансформатора марки АОРЦТ, который проработал почти 20 лет на Волжской ГЭС. В результате анализа выяснилось, что потери ХХ в этом трансформаторе увеличились на 5,65-6,25% в процессе эксплуатации, и его пришлось отправить на ремонт.

Эти результаты свидетельствуют о необходимости уделять большее внимание старению трансформаторов и его влиянию на эффективность работы систем электроснабжения. Данное исследование подчеркивает важность регулярного обслуживания и контроля состояния трансформаторов, а также возможность потребности в ремонте или замене стареющих устройств для поддержания оптимальной производительности и снижения потерь энергии.

В ходе наблюдений за магнитной системой трансформаторов, которые не подвергались ремонту и оставались в исходном состоянии, было обнаружено увеличение потерь холостого хода (ХХ). Для выяснения причин этого роста потерь был проведен анализ возможных факторов и изменений в структуре трансформаторов.

Основными причинами увеличения потерь ХХ в силовых трансформаторах, связанными со сроком их службы, являются:

- старение стали, вызванное нагревом магнитопровода вследствие потерь при перемагничивании сердечников и выделения тепла намагничивающими обмотками;
- механические воздействия на магнитопроводы в различных режимах работы;
- износ материалов, включая нарушение межлистовой изоляции магнитопровода в результате старения;
- выгорание сердечника магнитопровода;
- повреждение изоляции шпилек;
- местное нарушение межлистовой изоляции;
- ослабление прессовки магнитопровода из-за усадки стали магнитопровода;
- ослабление прессовки стыков;
- разрушение изолирующих прокладок в стыках и другие факторы.

Приведем некоторые примеры влияния этих факторов на потери ХХ. Например, ослабление сжатия листов шихтованного сердечника трансформатора может вызвать распрессовку сердечника и увеличение тока ХХ на 10%, что приводит к потерям ХХ до 5%. Перегрев трансформатора в свою очередь может негативно сказываться на магнитных свойствах стали сердечника, увеличивая потери ХХ до 4%. Плохое состояние изоляции обмоток и выводов может также привести к потерям ХХ до 10%, а некачественная перешихтовка магнитопровода при ремонте трансформатора может привести к потерям до 20% [3].

Эти примеры подчеркивают важность регулярного контроля и обслуживания трансформаторов, чтобы предотвратить увеличение потерь холостого хода в трансформаторах. Регулярный мониторинг состояния магнитной системы, изоляции и других ключевых параметров поможет выявить возможные проблемы и предпринять необходимые меры по их устранению.

Кроме того, разработка и внедрение программ обслуживания, направленных на предотвращение старения материалов, поддержание надлежащего сжатия листов сердечника, обеспечение надежной изоляции и правильное выполнение ремонтных работ, также являются важными мерами для предотвращения увеличения потерь ХХ в трансформаторах.

Таким образом, осознание факторов, влияющих на потери холостого хода в трансформаторах, и применение соответствующих технических решений и процедур обслуживания помогут обеспечить более эффективное и долговечное функционирование электроэнергетических систем, а также предотвратить возможные проблемы и нежелательные последствия, связанные с ростом потерь ХХ.

В табл. 1 приведены значения показателей критерия Колмогорова $P(y_n)$. Определим вероятность согласия $P(y_n)$ теоретического и эмпирического распределений по табличным данным для y_n . По значениям случайной величины y_n определяется функция $P(y_n)$, используя линейную интерполяцию. Если $P(y_n) > 0,05$, то условие согласия является удовлетворительным.

Таблица 1

Линейные уравнения зависимости ΔP_{XX} от срока службы трансформаторов разных типов «старше» 20 лет

| Номинальная мощность, кВА/ номинальные высшее напряжение, кВ трансформаторов | Число трансформаторов в выборке | Вид линейного уравнения |
|--|---------------------------------|--|
| 100/6 | 367 | $\Delta P_{XX} = + 3 + 2,01(T_{сл} - 20)$ |
| 110/10 | 243 | $\Delta P_{XX} = - 0,18 + 1,8(T_{сл} - 20)$ |
| 160/6 | 37 | $\Delta P_{XX} = - 9,7 + 1,56(T_{сл} - 20)$ |
| 160/10 | 151 | $\Delta P_{XX} = - 7 + 1,71(T_{сл} - 20)$ |
| 250/10 | 162 | $\Delta P_{XX} = - 5,6 + 1,7(T_{сл} - 20)$ |
| 400/10 | 42 | $\Delta P_{XX} = - 1,53 + 1,76(T_{сл} - 20)$ |
| По трансформаторам всех типов | 1002 | $\Delta P_{XX} = - 1,73 + 1,75(T_{сл} - 20)$ |

Таблица 2

Результаты выборочных измерений потерь XX трансформаторов распределительных сетей 6-10 кВ и их сравнение с паспортными и расчетными значениями

| п/п | Тип трансформ. | из-го-тов. | Заводской номер трансформатора | Потери холостого хода ΔP_{XX} , Вт | | |
|----------------|----------------|------------|--------------------------------|--|------|---------|
| | | | | асп. | акт. | Расчет. |
| | 2 | | 4 | | | 7 |
| 1 участок сети | | | | | | |
| | ТМ-250 | 976 | 7913 | 90 | 200 | 970 |
| | ТМ-250 | 976 | 7132 | 85 | 370 | 964 |
| | ТМ-400 | 978 | 2379 | 280 | 260 | 1526 |
| | ТМ-400 | 978 | 2397 | 200 | 300 | 1431 |

Результаты измерений ΔP_{XX} реал и их сравнение с паспортными ΔP_{XX} пасп и расчетными значениями $\Sigma \Delta P_{XX}$ расч приведены в табл. 2.

Данные в табл. 2 свидетельствуют о том, что реальные значения потерь холостого хода трансформаторов могут отличаться от расчетных значений. Наблюдается небольшое различие между этими значениями, составляющее всего 0,32%, что указывает на их близость. Однако, необходимо отметить, что наличие даже небольшого расхождения между реальными и расчетными значениями потерь холостого хода может иметь значительное влияние на эффективность работы трансформаторов.

В статье подробно рассматриваются основные причины возникновения потерь холостого хода в трансформаторах, а также предлагаются методы и рекомендации по их снижению. Одним из предложенных подходов является замена недогруженных трансформаторов, что позволяет уменьшить потери энергии в системе. Кроме того, оптимальные перестановки трансформаторов могут быть применены для уменьшения нагрузочных потерь.

Однако следует отметить, что потери холостого хода в трансформаторах являются неизбежным явлением, связанным с физическими процессами и конструктивными особенностями трансформаторов. Поэтому для достижения снижения потерь холостого хода требуется комплексный подход, включающий рациональную эксплуатацию и техническое обслуживание трансформаторов, а также применение передовых технологий и методов оптимизации их работы.

Таким образом, рассмотрение причин возникновения потерь холостого хода в трансформаторах и предложение методов их снижения являются актуальными и важными задачами, способствующими повышению эффективности энергетических систем и снижению потерь электроэнергии.

Библиографический список

1. **Грачева, Е.И.** Оптимальный режим работы цеховых трансформаторов / Е.И. Грачева, С.Б. Игнатъева // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – С. 23-25.
2. **Грачева, Е.И.** Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях / Е.И. Грачева, О.В. Наумов, Р.Р. Садыков // Проблемы энергетики. – 2016. – С. 104-107.
3. **Ярымбаш, С.Т.** Моделирование режима холостого хода трансформатора с учетом эффекта гистерезиса и вихревых токов/ С.Т. Ярымбаш, Д.С. Ярымбаш // Проблемы региональной энергетики. – 2019. – №. 1 (39). – С.15-18.
4. **Петрова, Р.М.** Надежность и перегрузочная способность силовых трансформаторов / Р.М. Петрова, Е.И. Грачева // Федоровские чтения – 2022: ЛII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) (Москва, 15–18 ноября 2022 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. – М.: МЭИ, 2022. – С. 233-240.
5. **Петрова, Р.М.** Надежность эксплуатации силовых трансформаторов / Вестник ПИТГТУ имени академика М.С. Осими». [Электронное издание]. – № 3 (24), 2022. – С. 52-57.

E.E. Ibatullin, E.I. Gracheva

STUDY OF TRANSFORMER NO-LOAD LOSSES OVER THE PERIOD OF OPERATION

Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia

Abstract. The paper examines the reasons for the growth of no-load losses in transformers during their service life. Formulas for calculating real no-load losses of transformers are derived. The calculated values of no-load losses of transformers are compared with the rated and actual ones.

Key words: transformer no-load losses, power transformer, power transformer, operating conditions, regression equations.

References

- [1] Gracheva E.I., Ignatieva S.B. Optimal operation mode of shop transformers / E.I. Gracheva, S.B. Ignatieva // Reliability and Safety of Power Engineering. 2015.- С. 23-25.
- [2] Gracheva E.I. Accounting for no-load transformers during operation when calculating power losses in distribution networks / Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. // Problems of Energy. 2016.- С. 104-107.
- [3] Yarymbash S.T. Modeling of transformer no-load mode taking into account the effect of hysteresis and eddy currents / S.T. Yarymbash, D.S. Yarymbash // Electro. 2019.-С.15-18.
- [4] Petrova, R.M. Reliability and overload capacity of power transformers / R.M. Petrova, E.I. Gracheva // Fedorovsky readings - 2022: LII All-Russian scientific-practical conference with international participation (with elements of scientific school for young people) (Moscow, 15-18 November 2022) / ed. by Yu.V. Matyunina. - Moscow: MPEI Publishing House. 2022. - С. 233-240.
- [5] Petrova, R.M. Reliability of operation of power transformers / scientific and technical journal "The messenger of PITTU named after academician M.S. Osimi". [Electronic edition]. - № 3 (24), 2022. - С. 52-57.

И.П. Карпов

СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ МЕЖПОДСТАНЦИОННОЙ ЗОНЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ

Филиал ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению
Дорожная электротехническая лаборатория

Аннотация. В статье представлен стенд для определения токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Отличительной особенностью, которого является возможность узнать токи короткого замыкания при отсутствии полной схемы внешнего электроснабжения. Предлагаемый расчет токов КЗ является рабочим инструментом определения токов короткого замыкания в тяговой сети и расчета релейной защиты при проектировании, а также руководством к действию для эксплуатационного персонала при обслуживании систем электроснабжения железных дорог переменного тока.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, переменный ток, короткое замыкание, система внешнего электроснабжения.

Расчет токов короткого замыкания

Изобретение относится к системе электроснабжения тяговой сети, а именно к разработке стенда для определения токов короткого замыкания межподстанционного участка тяговой сети переменного тока с двухсторонним питанием по расчету сопротивления цепи короткого замыкания.

Расчеты токов КЗ в тяговой сети железных дорог ведутся по нормативным документам [1]. Однако в [2,3] было показано, что в ряде случаев возможна погрешность в расчетах тока КЗ при неполной схеме системы внешнего электроснабжения (СВЭ). Опасность большой погрешности расчета токов КЗ проявляется, прежде всего, последующим неправильным расчетом релейной защиты.

По существующим нормативным документам ОАО РЖД нет требований предоставлять полную схему СВЭ тяговых подстанций при проектировании, а энергосистема обязана предоставлять лишь токи КЗ (или сопротивление КЗ) на стороне 110(220) кВ проектируемых тяговых подстанций. И это понятно, так как в ряде случаев проектируемые ж.д. пролегают по участкам, где пока не достаточна мощность энергосистемы для обеспечения нужд железной дороги. Таким образом, часто при проектировании тягового электроснабжения нет данных по схеме СВЭ [4]. В этих условиях результаты расчетов в проекте в ряде случаев выдаются приближенными.

Однако перед первым включением тяговых подстанций после монтажа и наладки такая схема СВЭ (пусть даже временная) уже есть, но и в этом случае расчет по нормативному документу производится с погрешностью, так как в

схеме замещения не учитывается параллельная работа двух тяговых подстанций, и расчет практически выполняется, игнорируя вторую смежную подстанцию. Поэтому следует уточнить расчет токов КЗ при двухстороннем питании тяговой сети.

Попытки уточненных методов расчета предпринимались в [3] и [5]. Однако они были связаны с дополнительными условиями организации опытов КЗ [3] или с необходимостью дополнительных расчетов сопротивлений линий к тяговым подстанциям [5].

Принимаем [3] за прототип. В нем рассмотрен стенд для определения токов КЗ в тяговой сети, содержащий две тяговые подстанции А и В с сопротивлениями тяговых трансформаторов каждой подстанции напряжением 110 кВ / 27,5 кВ (220 кВ / 27,5 кВ) для двухстороннего питания тяговой сети, которая при коротком замыкании (КЗ) представляет трехлучевую звезду сопротивлений, два луча которой $Z_{тсА}$ и $Z_{тсВ}$ подключены к первым выводам сопротивлений трансформаторов, вторые выводы, которых подключены к первым выводам эквивалентных сопротивлений питающих линий 110(220) кВ тяговых подстанций, а третий луч трехлучевой звезды включает эквивалентное сопротивление $Z_{АВ}$ цепи короткого замыкания, и подключают его к первому выводу источника.

Недостатком определения токов КЗ по прототипу [3], является необходимость организации дополнительных опытов реальных КЗ на действующих тяговых подстанциях. Однако на момент включения тяговых подстанций в работу уже имеются данные по мощности КЗ (или по сопротивлению КЗ) на вводах тяговых подстанций от энергосистемы, но, как указано выше, существующие методы расчета выполняются с погрешностью.

При оформлении заявки на изобретения, в соответствии с прототипом [3] был выбран традиционный метод определения токов КЗ - на стенде. В дальнейшем была подана заявка на расширенную имитационную модель.

Раскрытие изобретения

Цель изобретения – повышение точности расчета токов КЗ в тяговой сети с использованием полученных данные от энергосистемы по мощности КЗ (или по сопротивлениям КЗ) смежных тяговых подстанций.

Для реализации цели изобретения в стенд введены три сопротивления системы внешнего электроснабжения Z_{01} , Z_{02} , Z_{12} , соединенные в «треугольник», и которые соединяют вводы подстанций А и В (Z_{01} и Z_{02}) со вторым выводом источника питания, а сопротивление Z_{12} соединяет вводы подстанций, при этом сопротивление Z_{12} рассчитывается по реальному сечению и длине линии.

Энергосистема выдает для тяговых подстанций мощности КЗ (S_{c1} , S_{c2} , МВА) или сопротивления КЗ (Z_{c1} , Z_{c2} , Ом) на вводах 110(220)кВ. Указанные сопротивления Z_{c1} и Z_{c2} определяются следующим образом:

$$Z_{C1} = \frac{Z_{01} \cdot (Z_{02} + Z_{12})}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}} \quad (1) \quad Z_{C2} = \frac{Z_{02} \cdot (Z_{01} + Z_{12})}{Z_{01} + Z_{02} + Z_{12}} \quad (2)$$

В этих уравнениях известные значения Z_{c1} и Z_{c2} , а неизвестные - Z_{01} и Z_{02} . Путем преобразования системы уравнений (1) и (2) получим квадратные уравнения с неизвестными Z_{01} и Z_{02} , которые определяются по выражениям:

$$Z_{01} = \frac{(Z_{12})^2 - 2Z_{c1}Z_{12}}{2(Z_{c1} - Z_{12} - Z_{c2})} - \frac{\sqrt{(Z_{12})^4 + 4Z_{c1}Z_{c2}(Z_{12})^2}}{2(Z_{c1} - Z_{12} - Z_{c2})}, \quad (3)$$

$$Z_{02} = \frac{(Z_{12})^2 - 2Z_{c2}Z_{12}}{2(Z_{c2} - Z_{12} - Z_{c1})} - \frac{\sqrt{(Z_{12})^4 + 4Z_{c1}Z_{c2}(Z_{12})^2}}{2(Z_{c2} - Z_{12} - Z_{c1})}, \quad (4)$$

-затем по рассчитанным сопротивлениям Z_{01} , Z_{02} , и Z_{12} в соответствующих контурах и по заданному напряжению источника питания определяются токи КЗ I_A и I_B .

Для пояснения предлагаемого способа определения токов короткого замыкания межподстанционной зоны рассмотрим структурную схему (рис.1), где введены следующие обозначения (все сопротивления регулируемые и приведены к напряжению 27,5 кВ):

- $Z_{тсА}$ и $Z_{тсВ}$ и – эквивалентные сопротивления тяговой сети на первом ($Z_{тсА}$) и втором ($Z_{тсВ}$) участках межподстанционной зоны, в точке соединения $Z_{тсА}$ и $Z_{тсВ}$ на схеме покажем точку КЗ;
- $X_{тА}$ и $X_{тВ}$ – сопротивления тяговых трансформаторов на подстанции А ($X_{тА}$) и подстанции В ($X_{тВ}$);
- $Z_{АВ}$ – сопротивление в месте КЗ ($Z_{АВ}$);
- U_0 – напряжение источника питания, приведенное к тяговой обмотке, принимается по соответствующим требованиям нормативных документов [1];
- V_A и V_B – вводы 110(220)кВ тяговых подстанций А и В соответственно, для которых энергосистема выдает сопротивления КЗ (Z_{c1} и Z_{c2});
- Z_{01} и Z_{02} – сопротивления от источника питания (РП) до шин 110(220)кВ тяговых подстанций А (Z_{01}) и В (Z_{02}) соответственно;
- Z_{12} – сопротивление линии ВЛ-110(220)кВ между подстанциями А и В;
- A_A и A_B – амперметры.

Предлагаемый стенд с рассматриваемыми параметрами сопротивлений по существу отличается от стенда по прототипу [3] введенными тремя регулируемыми сопротивлениями схемы внешнего электроснабжения по схеме «треугольник», позволяющими без дополнительных экспериментов, как это было в [3], по заданным мощностям КЗ энергосистемой рассчитывать токи КЗ в тяговой сети.

Определение токов короткого замыкания на стенде

Последовательность определения токов КЗ на стенде следующая: прежде всего устанавливаются параметры заданной системы тягового электроснабжения, далее по значениям Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{12} определяются сопротивления Z_{01} , Z_{02} по формулам (3), (4).

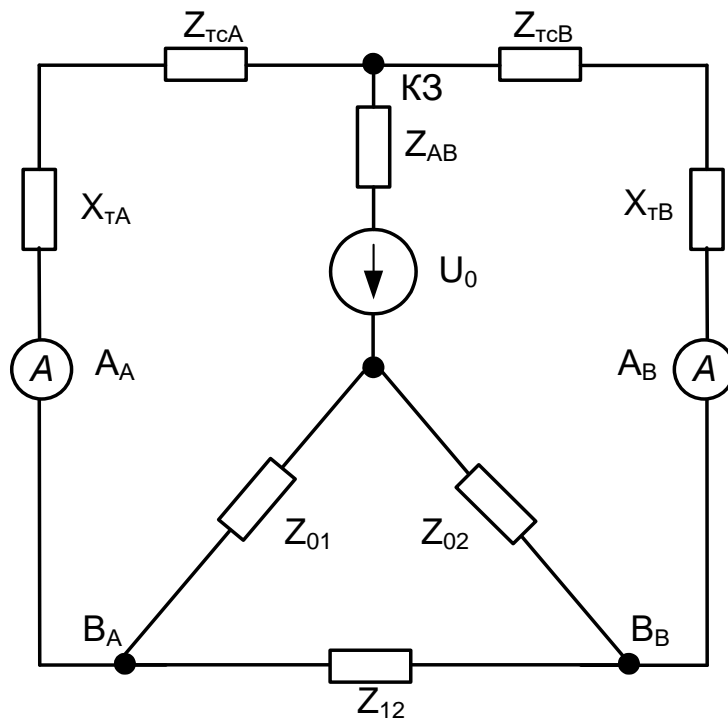


Рис. 1. Схема стенда определения токов короткого замыкания межподстанционной зоны тяговой сети переменного тока

В связи с тем, что при расчетах токов КЗ в тяговой сети следует вести расчет двухфазных КЗ системы внешнего электроснабжения и тяговых трансформаторов, то их фазные сопротивления умножают на коэффициент 2 и в стенде устанавливают соответствующие удвоенные сопротивления. По заданному напряжению источника питания U_0 и соответствующим сопротивлениям на стенде, по показаниям амперметров A_A и A_B определяются токи КЗ I_A и I_B в соответствующих контурах. Расчеты повторяются для всех точек КЗ, которые устанавливают путем изменения сопротивлений $Z_{тсА}$ и $Z_{тсВ}$ (рис. 1).

Технико-экономический эффект проявляется в том, что уточняются расчеты токов КЗ и соответственно уточняются расчеты релейной защиты. При этом упрощается процедура расчетов по сравнению с прототипом, так как нет необходимости выполнять дополнительные опыты КЗ [3]. На изобретение был получен патент [6].

Выводы

1. Для расчета токов короткого замыкания в тяговых сетях должно быть учтено сопротивление системы внешнего электроснабжения.
2. Разработан универсальный стенд замещения тяговой сети межподстанционной зоны переменного тока системы 25 кВ.
3. Представлена методика вычисления параметров элементов стенда.
4. Показан метод определения токов КЗ на межподстанционной зоне при отсутствии полной схемы внешнего электроснабжения.

Библиографический список

1. СТО 07.021.4-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока. ОАО РЖД.
2. **Герман, Л.А.**, Субханвердиев К.С. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 1. – С. 5-10.
3. **Герман, Л.А.**, Субханвердиев, К.С., Серебряков, А.С. Патент 2705517 от 26.12.2018. Стенд для расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Опубл. 07.11.2019. Бюлл. №31.
4. **Герман, Л.А.**, Субханвердиев, К.С., Герман, В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Учебное пособие. Часть 1. М: Учебно-методический центр по образованию на жд транспорте, 2021.
5. **Фигурнов, Е.П.**, Жарков, Ю.И., Попова, Н.А. Схемы замещения системы внешнего электроснабжения // Электричество. – 2020. – № 8. – С.30-35.
6. **Герман, Л.А.**, Субханвердиев, К.С., Карпов, И.П. Патент 2796196 от 17.05.2023. Стенд для определения токов короткого замыкания межподстанционной зоны тяговой сети. Опубл. 17.05.2023. Бюлл. № 14.

I.P. Karpov

STAND FOR DETERMINING SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN THE INTER-SUBSTATION ZONE OF THE TRACTION NETWORK

Branch of JSC Russian Railways Transenergo Gorky Directorate for Energy Supply Road Electrical Laboratory

Abstract. The article presents a stand for determining short-circuit currents in an AC traction network. A distinctive feature of which is the ability to find out short-circuit currents in the absence of a complete external power supply circuit. The proposed calculation of short-circuit currents is a working tool for determining short-circuit currents in the traction network and calculating relay protection during design, as well as a guide to action for operational personnel when servicing AC railway power supply systems.

Key words: traction power supply, alternating current, short circuit, external power supply system

References

1. STO 07.021.4-2015. Protection of railway power supply systems from short circuits and overloads. Part 4. Methodology for selecting protection settings in the AC traction power supply system. JSC Russian Railways.
2. German L.A., Subkhanverdiev K.S. Estimation of the error in calculating short-circuit currents in an AC traction network. Electronics and electrical equipment of transport, 2017, No. 1, pp. 5 -10.
3. Patent 2705517 dated December 26, 2018. Stand for calculating short circuit currents in an alternating current traction network (German L.A., Subkhanverdiev K.S., Serebryakov A.S.). Publ. 07.11.2019. Bulletin No. 31.
4. German L.A., Subkhanverdiev K.S., German V.L. Automation of power supply of AC traction network. Tutorial. Part 1. M: Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2021.
5. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Popova N.A. Equivalent circuits for external power supply systems. Electricity No. 8 2020 p. 30-35.
6. Patent 2796196 dated May 17, 2023. A stand for determining short circuit currents in the intersubstation zone of a traction network. (German L.A., Subkhanverdiev K.S., Karpov I.P.). Publ. 05/17/2023. Bulletin No. 14

В.С. Ливенцов

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ И ДЛИНЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ПОГРЕШНОСТЬ РАСЧЕТА СОВОКУПНЫХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Аннотация. Максимальная абсолютная погрешность расчета величины потерь при использовании способа расчета потерь отдельно по составляющим и по виду оборудования, в тех же диапазонах исследуемых величин, составляет 0,18 %, что в 2,5 раза больше предлагаемого способа. Доказано, что применение разработанного способа расчета потерь для исследуемой системы электроснабжения, рассматривающего в целом совокупность элементов системы электроснабжения и нагрузки, связанных общим режимом работы, позволяет уменьшить величину абсолютной погрешности расчета потерь в элементах системы электроснабжения, по сравнению с использованием расчета отдельно по составляющим технологических потерь и по виду оборудования.

Ключевые слова: потери активной мощности, абсолютная погрешность расчета потерь, питающее напряжение, длина линии электропередачи.

Возросшие требования к энергосбережению и, в частности к учету электроэнергии, способствуют повышению актуальности проблемы оценки реальных потерь электроэнергии, что особенно актуально для распределительных электрических сетей. Это связано с тем, на их долю приходится большая часть потерь электроэнергии, так как они имеют самую большую протяженность, мощность всех трансформаторов, установленных в распределительных электрических сетях, превышает генераторную мощность в 6–7 раз, и их эксплуатация связана со значительными материальными затратами. В дополнении к выше сказанному работа энергетического оборудования, эксплуатируемого в распределительных электрических сетях, происходит в условиях, непрерывно одновременно изменяющихся уровня напряжения, несимметрии и несинусоидальности токов, а также коэффициента мощности. В связи с этим не теряют свою актуальность исследования, направленные на разработку способов расчета потерь в системе электроснабжения, которые учитывают влияние параметров питающей линии, нагрузки и величины питающего напряжения сети на потери в силовых трансформаторах и совокупные потери в оборудовании системы электроснабжения, используемого для транспортировки электрической энергии конечному потребителю.

Суммарные потери активной мощности, в системе электроснабжения, при расчете отдельно нагрузочных потерь в линии электропередачи и условно-постоянных и нагрузочных потерь в силовом трансформаторе, в соответствии с приказом

Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям».

По разработанному способу расчета совокупных потерь в оборудовании системы электроснабжения, используемого для транспортировки электрической энергии. Его новизна заключается в том, что в отличие от описанного выше способа, в котором потери рассчитываются отдельно по составляющим и по виду оборудования, в предлагаемом способе рассматривается в целом совокупность элементов системы электроснабжения и нагрузки, связанных общим режимом работы, что позволяет учесть их взаимное влияние друг на друга. При этом в основу способа положена схема замещения системы электроснабжения, в которой для силового трехфазного двухобмоточного трансформатора использована приведенная симметричная Т-образная схема замещения одной фазы, и выражение для расчета совокупных потерь активной мощности в линии электропередачи и силовом двухобмоточном трансформаторе имеет вид:

$$\Delta P_{\text{ЛТ}} = \operatorname{Re} \left[\frac{\dot{U}_C^2}{|A|^2} \left(|B|^2 \cdot \underline{Z}_{\text{Л1}} + |C|^2 \cdot \underline{Z}_\mu + |D|^2 \cdot \underline{Z}'_2 \right) \right],$$

где $A = \underline{Z}_{\text{Л1}}(\underline{Z}_\mu + \underline{Z}'_{2\text{H}}) + \underline{Z}_\mu \underline{Z}'_{2\text{H}}$, $B = \underline{Z}_\mu + \underline{Z}'_{2\text{H}}$, $C = \underline{Z}'_{2\text{H}}$, $D = \underline{Z}_\mu$, \dot{U}_C – напряжение питающей сети в точке подключения линии электропередачи, обеспечивающей питание силового двухобмоточного трансформатора; $\underline{Z}_{\text{Л1}}$ – совокупное комплексное полное сопротивление линии электропередачи и рассеяния обмотки ВН силового двухобмоточного трансформатора; \underline{Z}_μ – комплексное полное сопротивление ветви намагничивания; \underline{Z}'_2 – приведенное комплексное полное сопротивление рассеяния обмотки НН; $\underline{Z}'_{2\text{H}}$ – совокупное приведенное комплексное полное сопротивление рассеяния обмотки НН силового двухобмоточного трансформатора и нагрузки.

В данной статье предлагается оценить влияние величины питающего напряжения и длины линии на величину абсолютной погрешности расчета потерь по предлагаемому способу и способу расчета потерь отдельно по составляющим и по виду оборудования, в сравнении с данными по величине потерь, полученными с помощью математической модели исследуемой системы электроснабжения.

Таким образом, по результатам выполненного анализа можно сделать вывод, что для исследуемых сетей с номинальным напряжением 6 кВ, в среднем для трех фаз медианное значение отклонения напряжения составляет 5,27 %, максимальные отрицательное отклонение – 3 % а положительное – 9,98 %, а для сетей с номинальным напряжением 10 кВ, в среднем для трех фаз медианное значение отклонения напряжения составляет 3,99 %, максимального отрицательного отклонения нет, а максимальное положительное – 7,56 %, что соответствует норме (не более 10 %) указанной в п. 4.2.2 ГОСТ 32144-2013.

Полученные в ходе проведенного исследования результаты согласуются с данными, приведенными в работах [2, 3 – 5], в которых также указано, что отклонение напряжения не превышает значения установленного в п. 4.2.2 ГОСТ 32144-2013.

Вторым фактором, влияние которого предлагается оценить, обозначенным в постановочной части статьи, является длина линии электропередачи, питающей трансформаторную подстанцию. В соответствии с п. А 2.3.2.1 СТО 34.01-21.1-001-2017 длину отходящих линий электропередачи с номинальным напряжением 6 (10) кВ от центра питания рекомендуется определять с учетом технико-экономического обоснования и, исходя из условий соблюдения показателей качества электрической энергии для наиболее удаленных потребителей, и, как правило, она не должна превышать (без учета ответвлений): для воздушных линий электропередачи 15 ÷ 20 км; для кабельных линий электропередачи 10 км. Поэтому, в рамках исследования влияния величины протяженности линии электропередачи, обоснованным будет принять диапазон изменения длины линии электропередачи от 1 до 20 км.

С целью определения величины абсолютной погрешности расчета совокупных потерь, в оборудовании рассматриваемой системы электроснабжения, используемого для транспортировки электрической энергии, по предлагаемому способу, в программном комплексе *Multisim*, являющемся редактором схем и приложением для их симуляции, была разработана соответствующая математическая модель. В основу разработанной математической модели была положена схема замещения одной фазы, рассматриваемой системы электроснабжения.

Массивы значений величины потерь активной мощности, в рассматриваемой системе электроснабжения, полученные в результате работы математической модели и проведенных расчетов, позволили выполнить построение графических зависимостей, отражающих влияние величины питающего напряжения и длины линии электропередачи на величину абсолютной погрешности расчета потерь по разработанному способу ($\Delta_{лт}$) и способу расчета потерь отдельно по составляющим и по виду оборудования (Δ_{Σ}), в сравнении с данными по величине потерь, полученными в результате работы математической модели системы электроснабжения. Указанные графические зависимости представлены на рис. 1.

Статистический анализ протяженности линий электропередачи, эксплуатируемых в настоящее время, выполнен на основе данных о городских электрических сетях г. Новочеркасска. Объем исследуемой совокупности количества линий электропередачи составил порядка 120 шт. Среднее арифметическое значение для исследуемой совокупности составило 2,17 км, а значение медианы – 1,94 км. Величина среднего отклонения наблюдения от среднего значения признака (стандартное отклонение) составила 1,2 км. Минимальное и максимальное значения исследуемой совокупности длин линий электропередачи составили соответственно 0,25 км и 5,95 км.

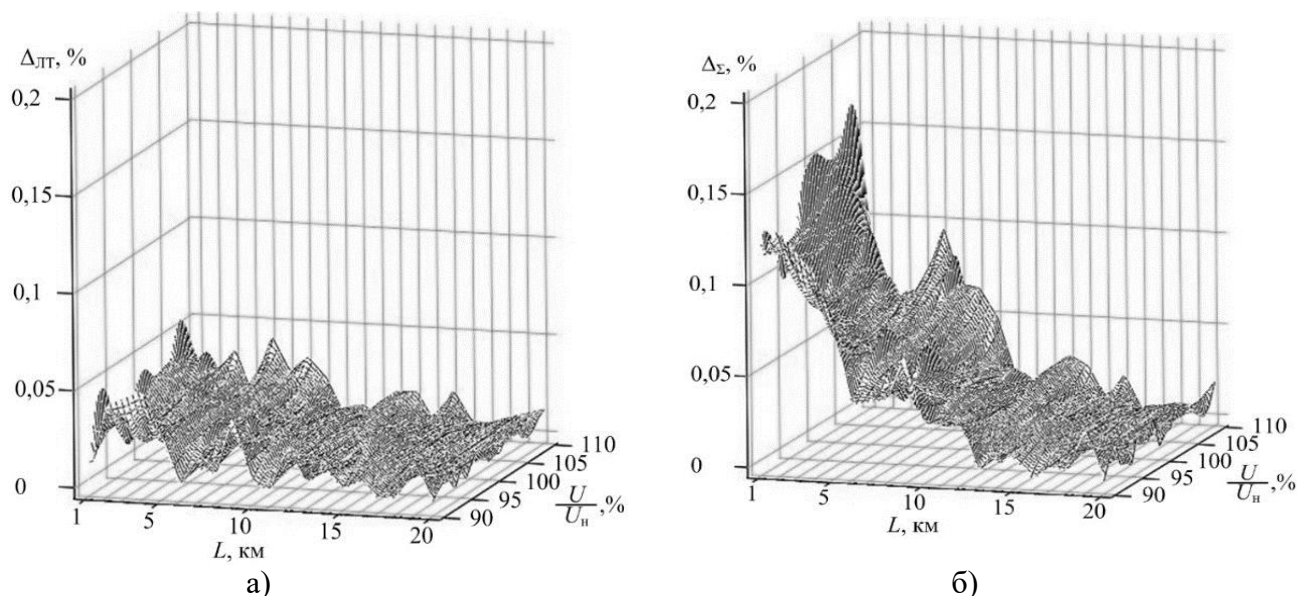


Рис. 1. Влияние величины питающего напряжения, представленной в виде значений отклонения напряжения от его номинального значения, и длины линии электропередачи на величины абсолютной погрешности расчета потерь активной мощности, полученные в результате работы математической модели системы электроснабжения и расчета потерь
 а) по предлагаемому способу;
 б) по способу расчета потерь отдельно по составляющим и по виду оборудования

Выводы

Применение разработанного способа расчета потерь в системе электроснабжения, подробно описанному в работе [1] и рассматривающего в целом совокупность элементов системы электроснабжения и нагрузки, связанных общим режимом работы, позволяет уменьшить величину абсолютной погрешности расчета потерь в элементах системы электроснабжения, по сравнению с использованием расчета отдельно по составляющим технологических потерь и по виду оборудования, при длине линий электропередачи в диапазоне от 1 до 10 км.

Библиографический список

1. **Ливенцов, В.С.** Способ определения комплексного значения совокупных потерь полной мощности в системе электроснабжения / В.С. Ливенцов, С.С. Костинский, А.И. Троицкий, Н.С. Савелов // Известие высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – № 4 (65). – С. 97-107.
2. **Караев, А.У.** Исследование потери и отклонения напряжения при нагревании проводов электрических током // Известие Омского технологического университета. – 2019. – № 1. – С. 120-123.
3. **Дед, А.В.,** Ткаченко В.А. Решение задачи определения оптимального положения устройства ПБВ Трансформатора для выполнения требований ГОСТ 32144-2013 // Ученые Омска – Региону. Материалы V Региональной научно-технической конференции, Омск, 13-14 октября 2020 года. – Омск: ОГТУ, 2020. С. 42-47.
4. **Антонов, А.И.,** Денчик Ю.М., Зубанов Д.А., Рупель А.А. Порядок обработки результатов экспериментальных исследований на соответствие отклонения напряжения требованиям ГОСТ 32144-2013 // Омский научный вестник. – 2015. – № 2 (140). – С. 163-166.

5. **Васильева, К.В.** Автоматизированная система диагностики технического состояния магнитной системы сухих трехфазных силовых трансформаторов распределительных электрических сетей / Авт. дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Новочеркасск, 2022. – 24 с.

V.S. Liventsov

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE VALUE OF THE SUPPLY VOLTAGE AND THE LENGTH OF THE ELECTRIC TRANSMISSION LINE ON THE ERROR OF CALCULATION OF THE TOTAL LOSSES OF ACTIVE POWER IN DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova,
Novocherkassk, Russia

Abstract. Maximum absolute error in calculating the amount of losses when using the method of calculating losses separately by components and by type of equipment, in the same ranges of the studied values, is 0,18 %, which is 2,5 times more than the proposed method. It is proved that the application of the developed method of calculating losses for the studied power supply system, considering as a whole the totality of the elements of the power supply system and the load associated with the general mode of operation, reduces the magnitude of the absolute error in calculating losses in the elements of the power supply system, compared with the use of calculation separately by components of technological losses and by type of equipment.

Key words: total power losses, absolute error in calculating the losses, supply voltage, length of the power line.

References

- [1] Liventsov V.S., Kostinsky S.S., Troitsky A.I., Savelov N.S. A method for determining the complex value of total power losses in the power supply system // News of higher educational institutions. Electromechanics. 2022. No. 4 (65). pp. 97 – 107.
- [2] Karaev A.U. Investigation of voltage loss and deviation when electric wires are heated // Izvestiya Omsk Technological University. 2019. No. 1. pp. 120 – 123.
- [3] Ded A.V., Tkachenko V.A. Solving the problem of determining the optimal position of the PBV Transformer device to meet the requirements of GOST 32144-2013 // In the collection: Scientists of Omsk – Region. Materials of the V Regional Scientific and Technical Conference, Omsk, October 13-14, 2020. Omsk: Omsk State Technical University, 2020. pp. 42-47.
- [4] Antonov A.I., Denchik Yu.M., Zubanov D.A., Rupel A.A. The procedure for processing the results of experimental studies on the compliance of voltage deviation with the requirements of GOST 32144-2013 // Omsk Scientific Bulletin. 2015. № 2 (140). С. 163 – 166.
- [5] Vasilyeva K.V. Automated system of diagnostics of the technical condition of the magnetic system of dry three-phase power transformers of distribution electrical networks / Auth. diss. ... Candidate of Technical Sciences: 05.14.02. Novocherkassk, 2022. 24 p.

УДК 621.3

DOI: 10.46960/apeen_2023_223

А.А. Лоскутов, А.Л. Куликов, И.А. Петров, В.А. Кошелев,
А.Р. Жафьяров, Р.И. Илларионов

РАЗРАБОТКА КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ОБМЕНОМ ДАННЫХ ПО МЭК 61850 ДЛЯ ПРОВЕРКИ ФУНКЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛЭП

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анотация. Рассматриваются вопросы соответствия вновь создаваемых микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики 110-220 кВ единым требованиям и нормам, представленным в СТО 56947007-29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА». При этом рассматриваются методики и программы проведения функциональных испытаний терминала дифференциальной защиты линии ТОР 300 ДЗЛ 52Х с применением программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor*. Разработана киберфизическая модель, позволяющая производить тестирование устройства дифференциальной защиты линии электропередачи с обменом данными по МЭК 61850 (SV-поток, GOOSE-сообщения).

Ключевые слова: микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), испытания, технические требования, программно-аппаратный комплекс *RTDS NovaCor*.

В последнее время наблюдается увеличение числа вновь строящихся и реконструируемых электрических подстанций с применением технологии «цифровая подстанция» (ЦПС), которая предусматривает обмен данными по стандарту МЭК 61850. Применение ЦПС и технологических шин имеет такие преимущества, как сокращение количества медных кабелей, снижение затрат на строительство, сокращение времени ввода в эксплуатацию, удобство обслуживания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) или интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), а также с повышением гибкости для расширения подстанции [1]. Кроме того, функциональная совместимость является ключевым фактором для принятия стандартов. Достижение полной функциональной совместимости в системах РЗА подстанций различных поставщиков позволит отраслевым предприятиям уверенно внедрять новые технологии и эффективно управлять операциями по обслуживанию, модернизации и замене оборудования.

Оборудование и системы способны обмениваться данными, командами и измеряемыми значениями с использованием набора стандартизированных протоколов. Стандарт МЭК 61850 формирует основу для коммуникаций на электрических подстанциях, а также поддерживает дальнейшее развитие существующих концепций защиты и управления технологическими процессами. Обмен данными по МЭК 61850 также допускает новые подходы в алгоритмах работы ИЭУ, которые используются в качестве средств защиты, автоматизации и управления в среде МЭК 61850 [2]. ИЭУ разных производителей взаимодействуют друг с другом и получают доступ к моделям данных с помощью стандартизированных элементов.

Общение происходит с использованием различных сервисов и сетей. Сеть станций используется, например, для сообщений и команд (например, *GOOSE* и *MMS*), в то время как отдельная сеть (в основном называемая технологической шиной) может использоваться для передачи данных в реальном времени, таких как события защиты и измеренные значения (*GOOSE* – сообщения и *SV* – потоки) [3].

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка аппаратно-программной, испытательной базы для устройств релейной защиты и автоматики сетей 110-220 кВ. В качестве примера испытываемого оборудования выбран терминал РЗА ТОР 300 ДЗЛ 52Х производства ООО «Релематика».

Задачами исследования являются разработка базовой имитационной модели в *RSCAD*, сборка и конфигурирование киберфизического стенда, создание программно-методической испытательной базы для программно-аппаратного комплекса (ПАК) *RTDS* [4-7], частичная автоматизация процесса испытаний с применением файлов-сценария, функционирующих на языке «Си», наработка компетенций по параметрированию ИЭУ в соответствии с МЭК 61850.

Структура испытательной установки

Конфигурация испытательной установки включает в себя ЭВМ с программным обеспечением *RSCAD FX*, вычислительный модуль *RTDS NovaCor*, *Cisco SG112-24*, модуль *GTNETx2*, модуль *GT FPGA*, микропроцессорный терминал релейной защиты (рис. 1).

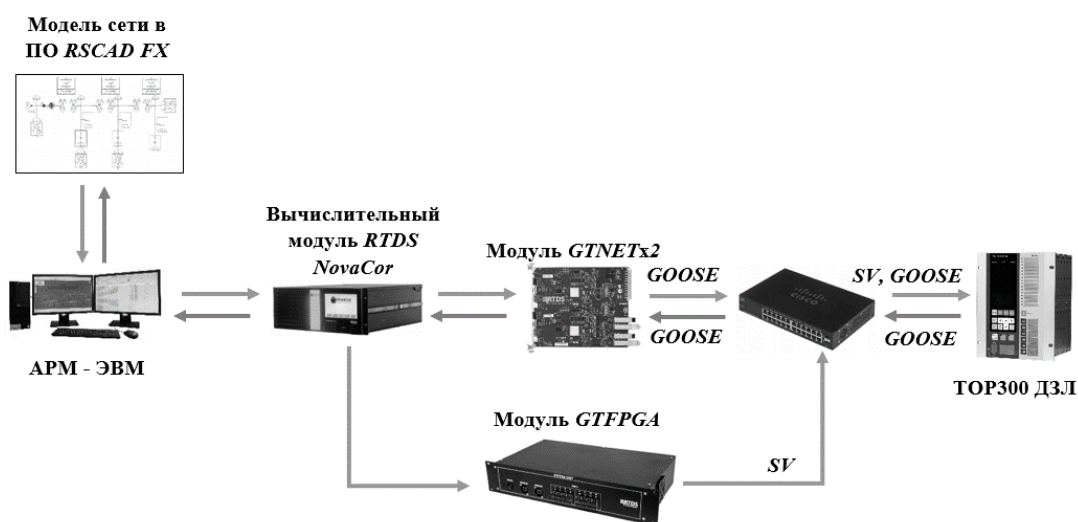


Рис. 1. Структура испытательной установки

Кратко рассмотрим принцип ее работы. ЭВМ с программным обеспечением *RSCAD FX* передает параметры моделируемой сети в вычислительный модуль *RTDS*. Он в свою очередь осуществляет нужные вычисления и выдает необходимые выходные сигналы на модули *GTNETx2* и *GT FPGA*. Далее сигналы в цифровом

виде (*GOOSE, SV*) подаются на *Ethernet*-порты микропроцессорного терминала РЗА.

Микропроцессорное устройство РЗА реагирует на внешнее воздействие и выдает соответствующие выходные сигналы. Посредством модуля *GTNETx2* сигналы передаются в вычислительный модуль *RTDS*, где происходит их обработка и дальнейшая передача на ЭВМ. Таким образом осуществляется постоянная обратная связь между устройством РЗА и имитационной моделью, что позволяет наблюдать полную картину взаимодействий релейной защиты с электроэнергетической сетью.

Создание имитационной модели

Создание имитационной модели осуществлялось с помощью новейшего программного обеспечения *RSCAD FX*, позволяющего реализовать самые передовые и эффективные методы проверки устройств РЗА [8-10].

Исходные данные к исследуемой системе электроснабжения были использованы из [11].

Разработанная имитационная модель двухцепной ЛЭП 220 кВ с двухсторонним питанием представлена на рис. 3.

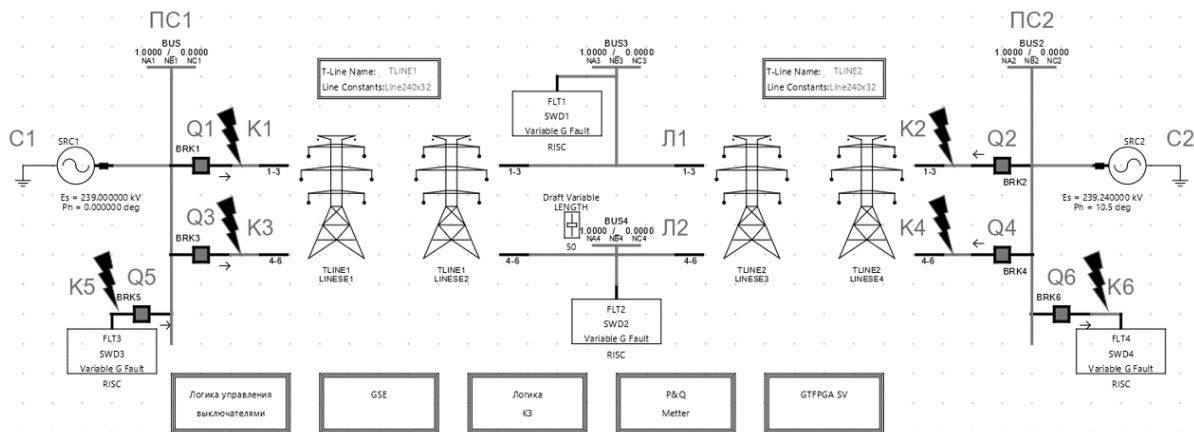


Рис. 2. Имитационная модель сети 220 кВ

Основными элементами имитационной модели (рис. 2) являются трехфазный источник напряжения (*3P Voltage Source*), шины (*Bus*), выключатель (*3P Breaker*), воздушные ЛЭП (*Transmission Line*), короткозамкатели (*3P Fault*).

Под имитационной моделью располагаются так называемые «боксы», в которых находятся элементы логического управления моделью (включение - отключение выключателей, логика управления КЗ, прием *GOOSE* – сообщений и выдача *SV* - потоков).

Схема для управления местом и типом повреждения представлена на рис. 2.

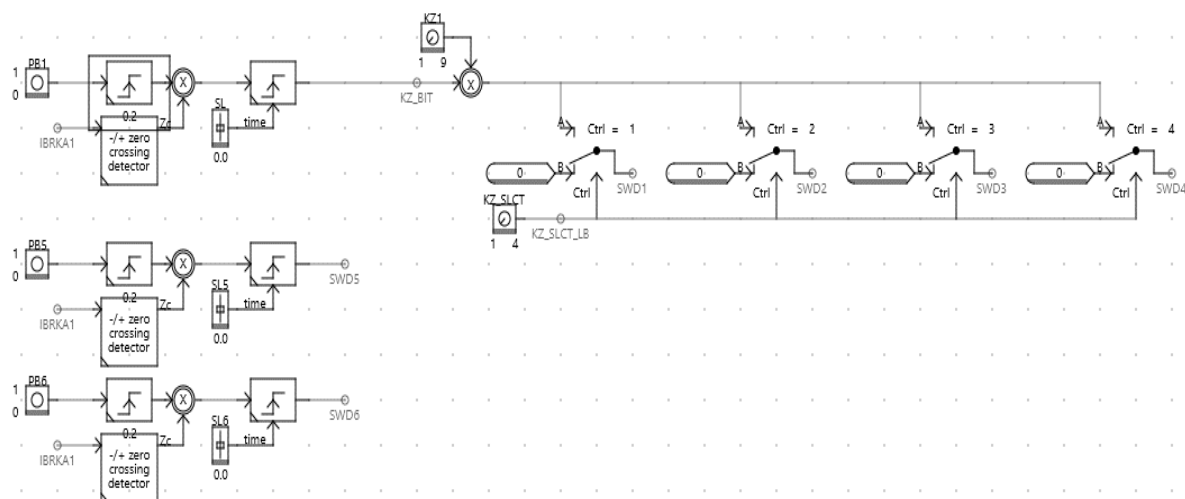


Рис. 3. Схема для управления местом и типом повреждения

Рассмотрим принцип работы схемы на примере однофазного КЗ фазы А на землю в точке К1. При нажатии на *Push Button* на *Pulse Generator* поступает сигнал «1». Длительность сигнала определяется значением, указанным в элементе *Slider* (например, 1 с). Далее сигнал поступает на *Multiplication Block*. Одновременно с этим, в момент, когда ток фазы А пересекает значение в 0° , на *Multiplication Block* поступает сигнал от *Zero-Crossing Detector*. Тогда на выходе *Multiplication Block* возникнет логическая «1» в момент прохождения тока фазы А через 0° . Таким образом добиваемся фазы включения на КЗ равной 0° . От элемента *Dial* поступает целочисленное значение «1», что соответствует однофазному замыканию фазы А на землю. Сигналы, поступившие в *Multiplication Block*, перемножаются. Полученный сигнал – «1» длительностью 1 с. Выбор места повреждения происходит по следующему принципу. При положении *Dial* №1 на входы *Ctrl* всех *Signal Switch* приходит сигнал «1». Положение с *B* на *A* меняет только первый *Signal Switch*. Сигнал от *Summation Block* поступает на вход А и далее подается на *Wire Label*. Итоговый сигнал, подаваемый в блок *3P Fault*, равен «1» и имеет продолжительность 1 с.

Для возможности моделирования перехода внешнего КЗ во внутреннее с сохранением предыдущего схема была дополнена (рис. 4). Кнопки PB5 и PB6 необходимы для формирования управляющего сигнала непосредственно на блок короткозамыкателя. Выбирая необходимый вид КЗ и задавая большую длительность КЗ, добиваемся одновременного протекания КЗ в двух точках.

Терминал TOP 300 ДЗЛ выполняет только функции защит. Функции автоматики управления выключателем (АУВ) в нем не реализованы, поэтому для управления силовыми выключателями необходимо создание схемы управления. Внешний вид данной схемы представлен на рис. 5.

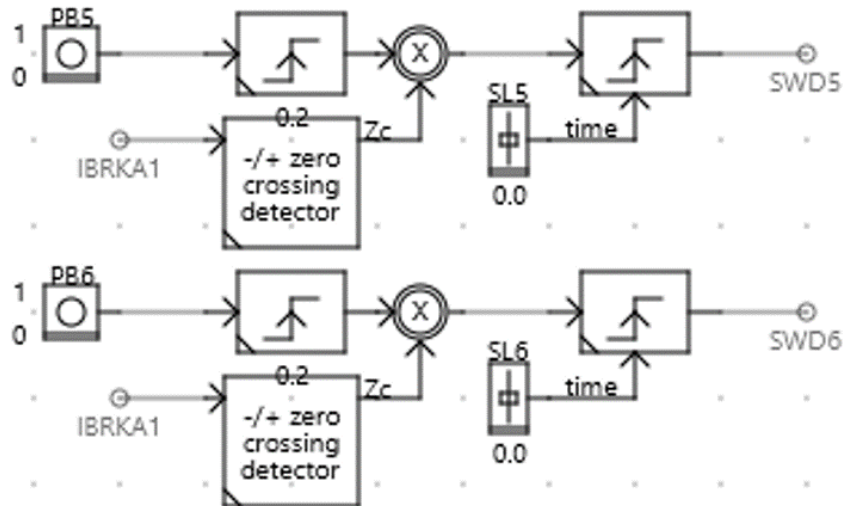


Рис. 4. Фрагмент логики КЗ

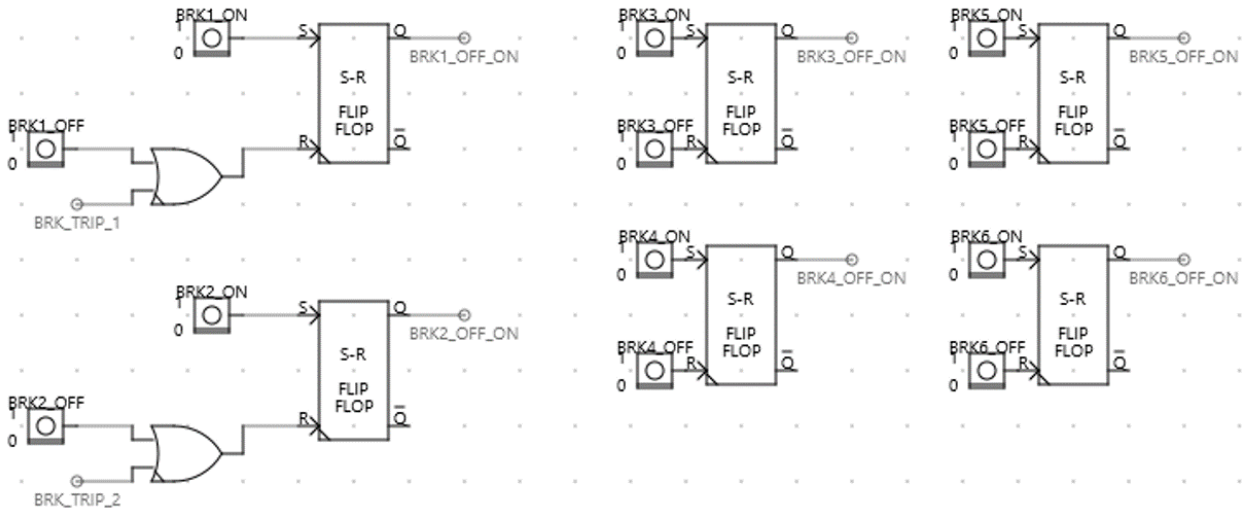


Рис. 5. Логика управления выключателями

Рассмотрим работу схемы для одного из выключателей, отключаемых терминалом (рис. 6).

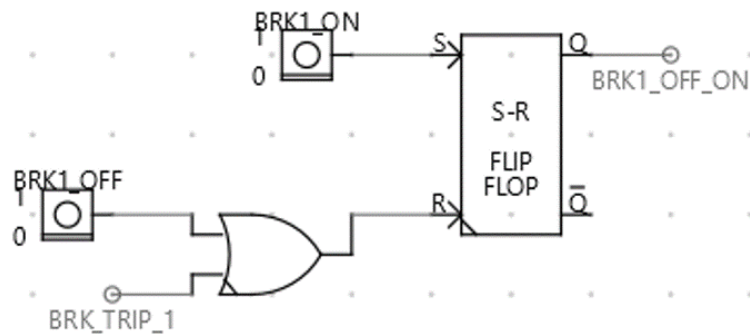


Рис. 6. Схема управления выключателем

Управление происходит следующим образом. Допустим изначально выключатель включен. Тогда, если происходит КЗ внутри защищаемой зоны, терминал посылает GOOSE-сообщение на отключение выключателя и дискретный сигнал *BRK_TRIP_1* принимает значение логической «1». Далее она поступает в логическое ИЛИ и проходит дальше на вход *R (reset) RS* – триггера. Соответственно триггер сбрасывается, выдавая на выходе *Q* логический «0», который привязан к сигналу управления выключателем *BRK1_OFF_ON*. Такой же исход будет, если нажать на кнопку *BRK1_OFF*.

Для последующего включения выключателя необходимо подать «1» в качестве сигнала управления выключателем. Для этого достаточно нажать кнопку *BRK1_ON*. В таком случае «1» поступает на вход *S (set)* триггера, на выходе *Q* также устанавливается «1». Соответственно на выключатель поступает управляющий сигнал *BRK1_OFF_ON*, имеющий значение «1», и выключатель переходит во включенное состояние.

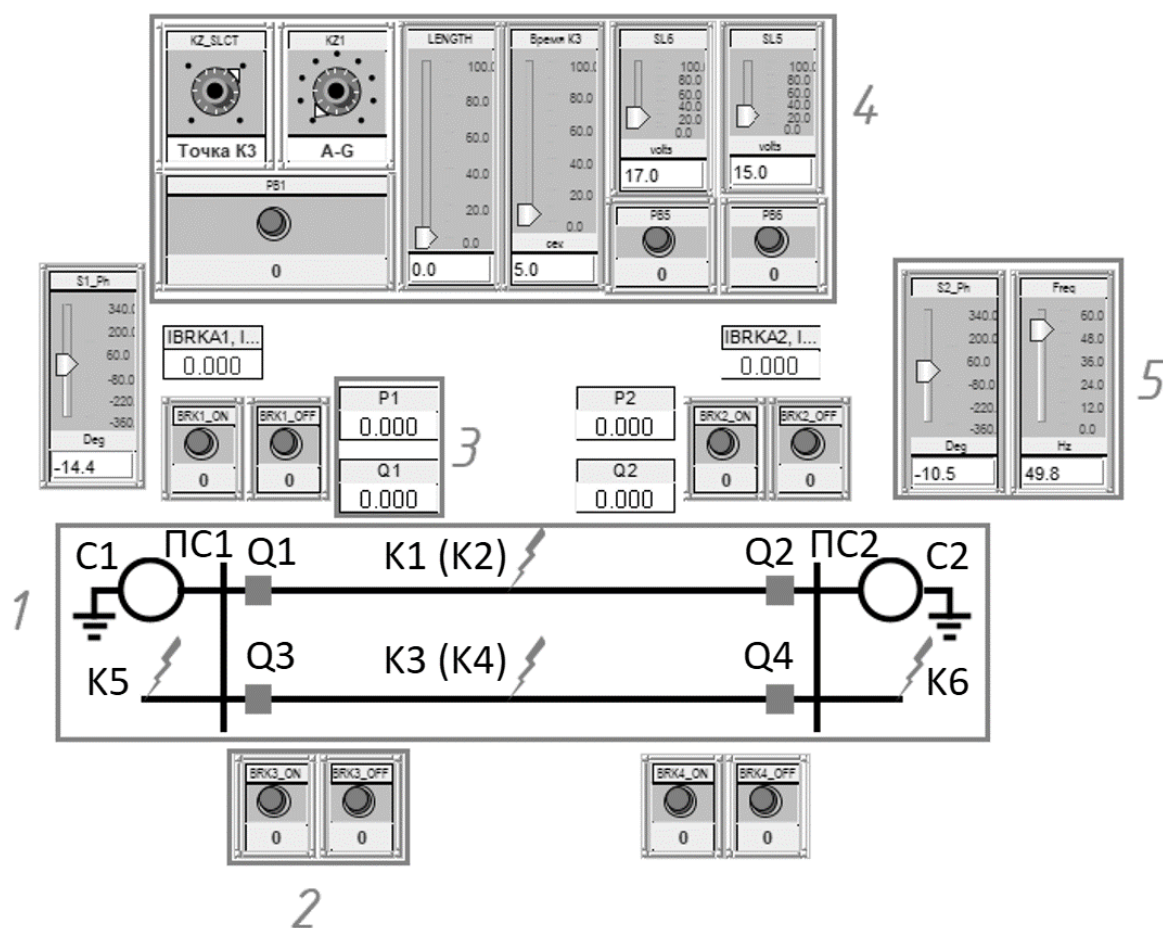


Рис. 7. Виртуальный стенд *RunTime*:

- 1 – мнемосхема электрической сети; 2 – кнопки отключения и включения соответствующих коммутационных аппаратов; 3 – измерители активной и реактивной мощности; 4 – панель управления вида, места и времени КЗ; 5 – панель изменения фазового угла передачи и частоты.

Выключатели, не имеющие связи с терминалом, обладают более простой схемой управления, которая не содержит логический элемент ИЛИ, так как никакого сигнала с терминала не поступает и положение выключателя задается с кнопки.

Для управления элементами имитационной модели в реальном времени создан виртуальный стенд *RunTime* (рис. 7). Схемы управления местом и типом КЗ сформированы тремя типами элементов: *Slider*, *Button* и *Dial*. Ранее эти элементы были созданы в *Draft* для схемы управления местом и типом КЗ.

Для визуализации аварийных событий создан блок осциллограмм токов и напряжения в месте установки защиты, их первичные и вторичные значения.

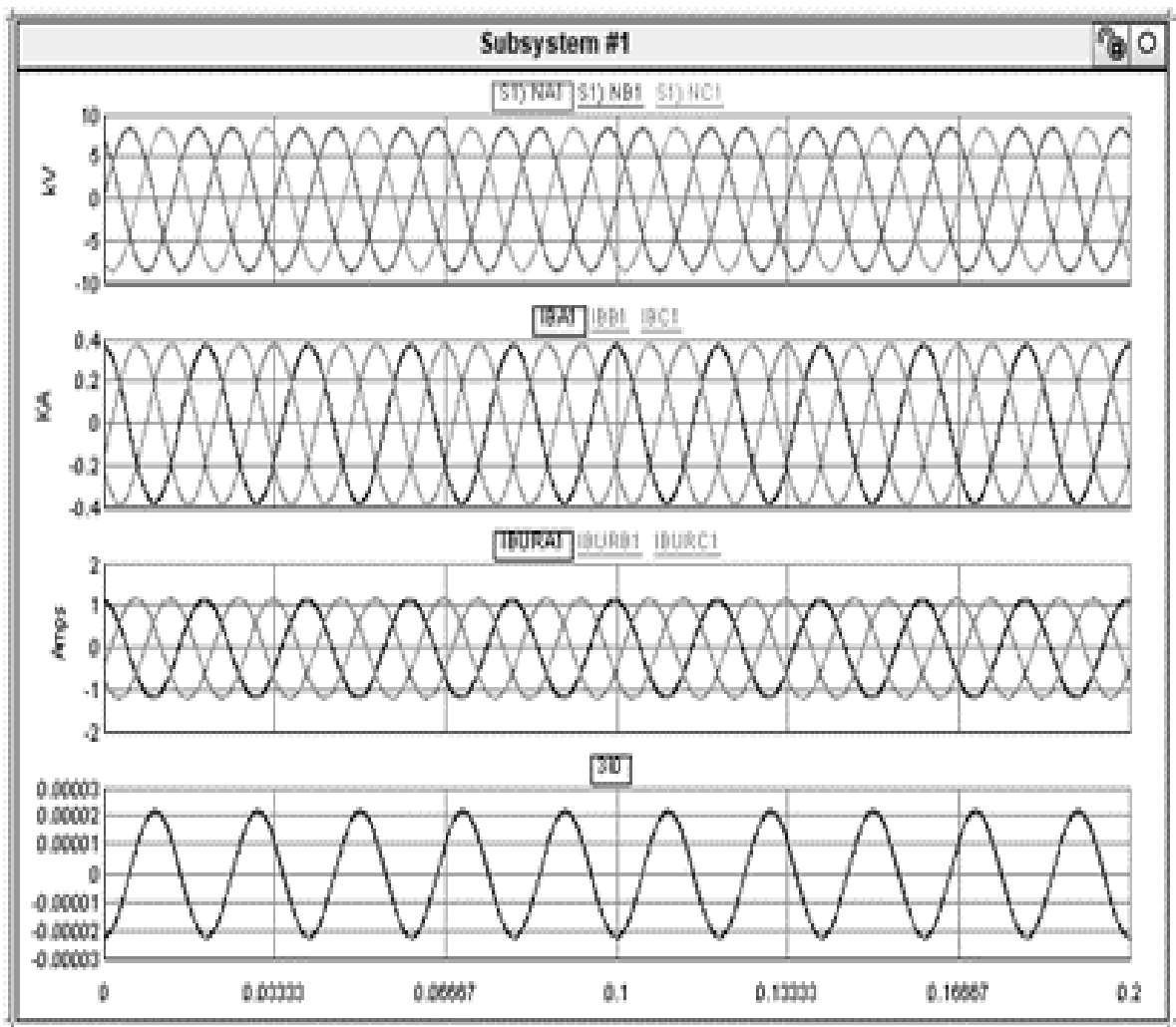


Рис. 8. Внешний вид блока осциллограмм

Параметрирование киберфизического стенда по стандарту МЭК 61850 в ПО МиКРА и RSCAD FX

Устройства релейной защиты, контроллеры ячейки, управляющие устройства и т.д. известны как ИЭУ в среде МЭК 61850. Они получают команды и отправляют данные и измеренные значения по сети.

Стандартом МЭК 61850 предлагается использование трех протоколов передачи данных:

- *MMS (Manufacturing Message Specification* – стандарт *ISO/IEC 9506*) – протокол передачи данных реального времени и команд диспетчерского управления между сетевыми устройствами и/или программными приложениями;

- *GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event* – общее объектно-ориентированное событие на подстанции, описывается *IEC 61850-8-1*) – протокол передачи данных о событиях на подстанции;

- *SV (Sampled Values* – мгновенные значения стандарт *IEC 61850-9-2* и *IEC 61850-9-2LE*) – протокол передачи оцифрованных мгновенных значений от измерительных трансформаторов тока и напряжения.

В ходе проделанной исследовательской работы использовались только два протокола передачи данных: *GOOSE* – сообщения и *SV* – потоки.

В ходе настройки и параметрирования коммуникационного обмена данными между ИЭУ по протоколам *GOOSE* и *SV* создавались и загружались в устройства *CID* – файлы.

***CID (Configured IED Description)* файл описания конфигурации устройства.**

Файл конфигурации, передаваемый из ПО для конфигурирования устройств, непосредственно в само устройство (в данном случае, в ходе компиляции модели в ПО *RSCAD FX* создаются ***CID* – файлы, которые далее будут загружены в терминалы с помощью ПО для конфигурирования терминалов «МиКРА»**). Этот файл полностью описывает конфигурацию данного устройства в части коммуникаций.

Также следует упомянуть, что на традиционных подстанциях аналоговые величины токов и напряжений с соответствующих измерительных трансформаторов передаются непосредственно на электромеханические устройства релейной защиты. Но в подстанциях нового поколения измерительные трансформаторы подключаются к автономным сопрягающим устройствам с функцией аналогово-цифрового преобразователя, соединяя таким образом аналоговые измерительные сигналы с технологической шиной. Мгновенные значения токов и напряжений подаются на микропроцессорные устройства релейной защиты в виде выборок мгновенных значений по протоколу *SV*.

Команды на отключение выключателей от терминалов РЗА поступают в виде *GOOSE* – сообщений.

Конфигурирование SV-потоков

Для передачи мгновенных значений токов и напряжений стандарт МЭК 61850 предполагает использование протокола SV (*Sample Values*). ПАК RTDS способен обеспечить выдачу SV-потоков через плату GTFPGA. Для этого необходимо сконфигурировать блок выдачи потоков SV в имитационной модели. Блок для настройки приема и выдачи SV – потоков GTFPGA SV V3 представлен на рис. 9.

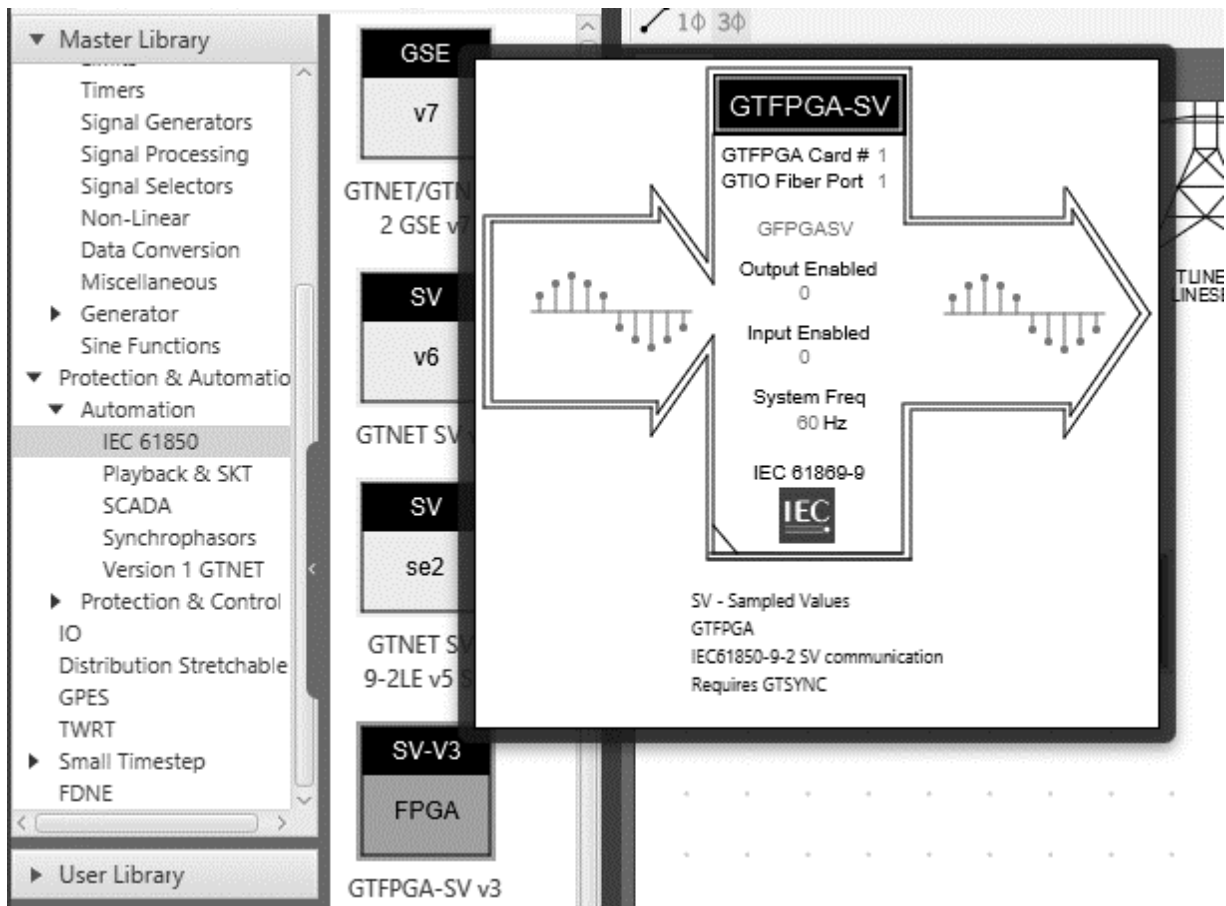


Рис. 9. Блок GTFPGA SV V3

Для данного блока задаются название компонента, количество выходных SV-потоков, частота системы, номер порта, к которому подключается устройство релейной защиты (рис. 10).

Для каждого из каналов выходных SV-потоков задаются MAC-адрес, количество каналов токов и напряжений, уровень напряжения сети и т.д. Параметры блока SV V3 приведены на рис. 10 – 12.

| _rtds_ctl_GTFPGA_SV_V3.def | | | | | | |
|----------------------------|----------|---|-----------|------|-----|-----|
| CONFIGURATION | Name | Description | Value | Unit | Min | Max |
| | Name | GTFPGA Component Name | GTFPGASV1 | | | |
| OUTPUT CONFIGURATION | prc12 | If BRIDGE uses 2 proc, place on #: | 1 | | 1 | 2 |
| OUTPUT MANIPULATION | nSV | Number of output SVs (Maximum 2 for 96kHz and 1 for 250kHz) | 2 | | 0 | 16 |
| SV-1 OUT | nSV_in | Number of input SVs (Max 1 for PB5) | 0 | | 0 | 16 |
| SV-2 OUT | SYSFREQ | Nominal system frequency (Hz) | 50 | | | |
| | Port | GTIO Fiber Port Number | 17 | | 1 | 24 |
| AUTO-NAMING SETTINGS | Card | GTFPGA Card Number | 1 | | 1 | 8 |
| | ctrlGrp | Assigned Control Group | 1 | | 1 | 54 |
| | Pri | Priority Level | 2 | | 1 | |
| | SIM_MODE | Select Main or Sub-step | MAIN | | | |

Рис. 10. Настройки вкладки *Configuration* блока *SV V3*

| CONFIGURATION | Name | Description | Value | Unit | Min | Max |
|----------------------|-----------|--|----------------|------|------|-----------|
| | SMPRT1 | Sample rate (samples/cycle or Hz) | 80 s/c, 1 ASDU | | | |
| OUTPUT CONFIGURATION | ENQ1 | Enable quality bit override | FALSE | | | |
| OUTPUT MANIPULATION | ledName | IED Name | GTFPGASV1 | | | |
| SV-1 OUT | APPID | APPID (hex) 0x4000...0x7FFF | 4000 | | 4000 | 7FFF |
| SV-2 OUT | VLANPRI | VLAN priority | 0 | | 0 | 7 |
| | VLANID | VLAN ID (hex) 0x000...0xFFF | 000 | | 000 | FFF |
| AUTO-NAMING SETTINGS | smvIDtype | Use 9.2LE convention for the smvID or use only LDPre | Yes | | | |
| | LDpre | LDName prefix (min 4 characters) | 0000 | | | |
| | LDsuf | LDName suffix (eg. 1) | 1 | | 1 | 99 |
| | MACH | Multicast address (eg. 01:0C:CD) | 01:0C:CD | | | |
| | MACL | Multicast address (eg. 04:00:00) | 04:00:01 | | | |
| | INCRT | Include refresh time field in message | FALSE | | | |
| | INCSF | Include sample sync field in message | TRUE | | | |
| | nINCSF | Sample Sync input | SSYNC1IN1 | | | |
| | INCSIMF | Modify Simulation Flag in message | FALSE | | | |
| | nINCSIMF | Simulation Flag input | SIM1IN1 | | | |
| | INCSR | Include sample rate field in message | FALSE | | | |
| | CONFREV | ConfRev (hex) 0x00000001...0xFFFFFFFF | 1 | | 1 | FFFFFFFF |
| | sName | Substation Name | RTDS | | | |
| | sLevel | Voltage Level | 220kV | | | |
| | sBay | Bay | 5L1 | | | |
| | VDLY1 | Delay voltage inputs by 1 timestep | YES | | | |
| | Naa1 | Note: If Channel 1 is for time delay set to INT | 0 | | 0.0 | 1000000.0 |

| | | | | | |
|------------|-------------------------------|-------|--|--------|-------|
| CH4OFFSET1 | sVC.offset for channel 4 | 0.0 | | -1.0e9 | 1.0e9 |
| CH4SCALE1 | sVC.scaleFactor for channel 4 | 0.01 | | 1.0e-9 | 1.0e9 |
| CH5TYPE1 | Channel 5 Data input format | FLOAT | | | |
| CH5V1 | Channel 5 Data type | VB | | | |
| nCH5D1 | Channel 5 Data Signal Name | NB1 | | | |
| CH5OFFSET1 | sVC.offset for channel 5 | 0.0 | | -1.0e9 | 1.0e9 |
| CH5SCALE1 | sVC.scaleFactor for channel 5 | 0.01 | | 1.0e-9 | 1.0e9 |
| CH6TYPE1 | Channel 6 Data input format | FLOAT | | | |
| CH6V1 | Channel 6 Data type | VC | | | |
| nCH6D1 | Channel 6 Data Signal Name | NC1 | | | |
| CH6OFFSET1 | sVC.offset for channel 6 | 0.0 | | -1.0e9 | 1.0e9 |
| CH6SCALE1 | sVC.scaleFactor for channel 6 | 0.01 | | 1.0e-9 | 1.0e9 |

Рис. 11. Настройки вкладки *SV-1 OUT* блока *SV V3*

При успешной компиляции проекта *RSCAD FX* в корневой папке автоматически создаются файлы формата *.cid* (рис. 12). Далее данные файлы будут использованы для создания «Устройств *SV*» в проекте ПО МиКРА.

| | | | |
|-------------------|------------------|------------|-------|
| DZL_test 1.02.rst | 17.04.2023 12:09 | Файл "RST" | 1 КБ |
| GTFPGASV1.cid | 11.05.2023 13:53 | Файл "CID" | 11 КБ |
| GTFPGASV2.cid | 11.05.2023 13:53 | Файл "CID" | 11 КБ |
| GINE11.cid | 27.04.2023 12:20 | Файл "CID" | 36 КБ |

Рис. 12. *cid*-файлы устройств *SV*

Для удобства параметрирования полуккомплектов ДЗЛ компанией ООО «Релематика» предусмотрено специализированное ПО МиКРА [12], при помощи которого в терминал загружается конфигурационный *CID*-файл и затем производится подписка терминала на прием *SV* – потоков от *RTDS*.

Конфигурирование *GOOSE* – сообщений

Организация обмена *GOOSE*-сообщениями производится в несколько этапов. Сначала осуществляется настройка *GOOSE*-сообщения в испытуемом терминале РЗА в ПО МиКРА: добавляется новый набор данных и выбираются нужные сигналы, создается исходящее *GOOSE*-сообщение, производится выбор необходимого набора данных и настраивается *MAC*-адрес. Затем производится настройка ПАК *RTDS* для приема представленных ранее *GOOSE*-сообщений. Для этого используется встроенный инструмент *IED Configuration Tool (ICT)*, в котором создаем новый проект (рис. 13). Далее необходимо загрузить *CID*-файлы выгруженные из микропроцессорных терминалов РЗА. После этого добавляются виртуальные интеллектуальные устройства и присваиваются им имена (рис. 14).

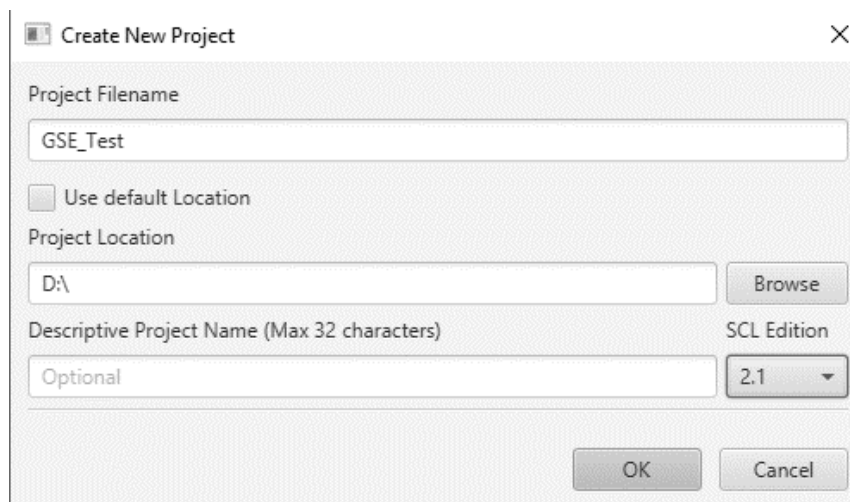


Рис. 13. Создание нового проекта в *ICT*

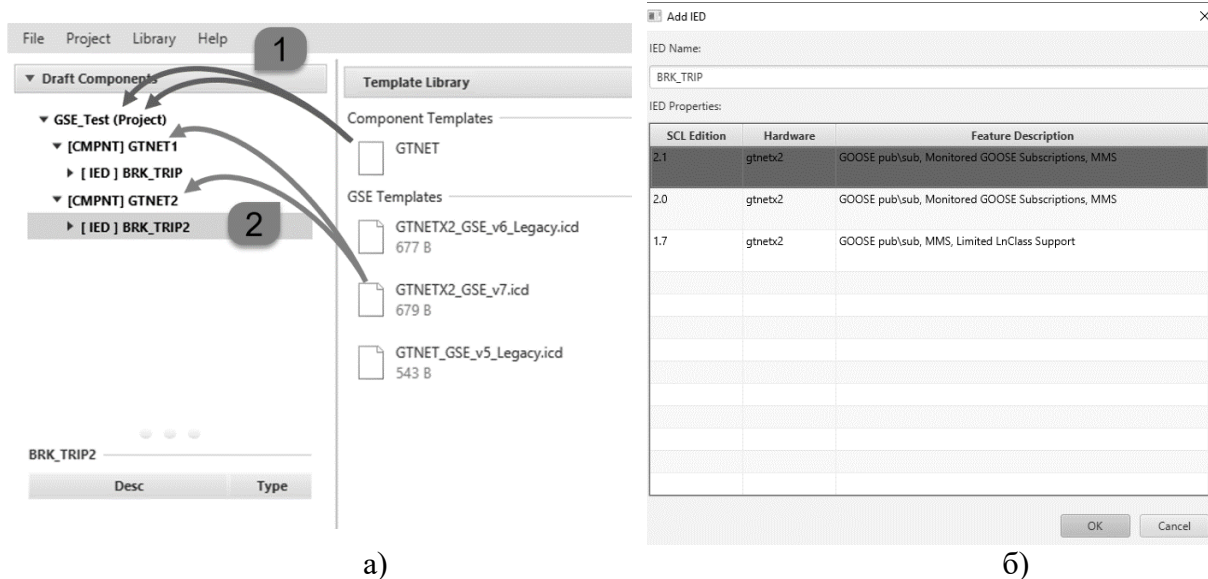


Рис. 14. Добавление *GTNET* компонентов и интеллектуальных устройств

Далее формируется подписка *RTDS* на *GOOSE*-сообщение микропроцессорного терминала.

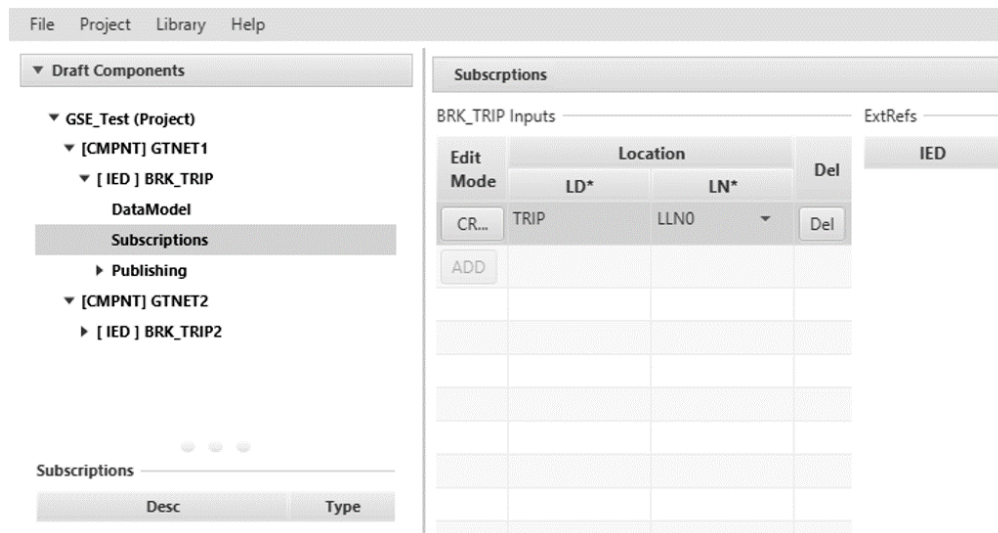


Рис. 15. Настройка вкладки *Subscriptions*

Следующим шагом является задание наименований сигналов, которые в дальнейшем будут использованы во время симуляции. Аналогично подписываются *GTNETx2* на сигналы со второго полуккомплекта ДЗЛ.

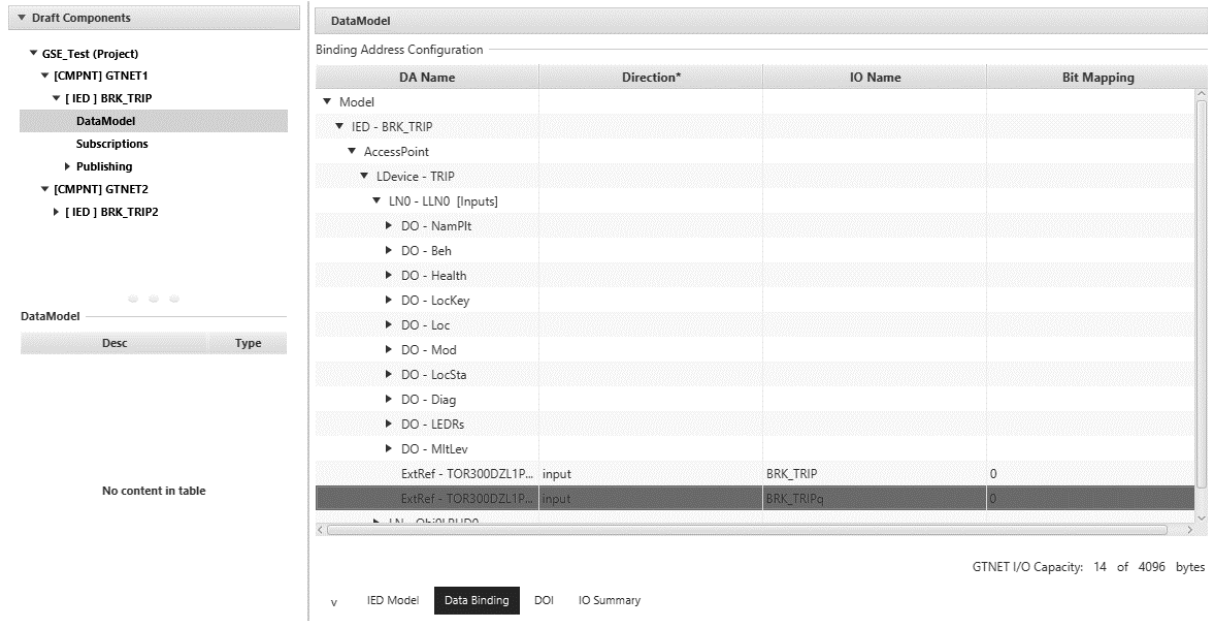


Рис. 16. Настройка сигналов от внешнего GOOSE-сообщения

Далее заполняются IP – адреса модулей платы *GTNETx2*, которые будут принимать *GOOSE*-сообщения от терминала.

Важно отметить, что после компиляции появляются дополнительные файлы формата *.cid* и *.idf*, которые должны находится строго в основной папке проекта.

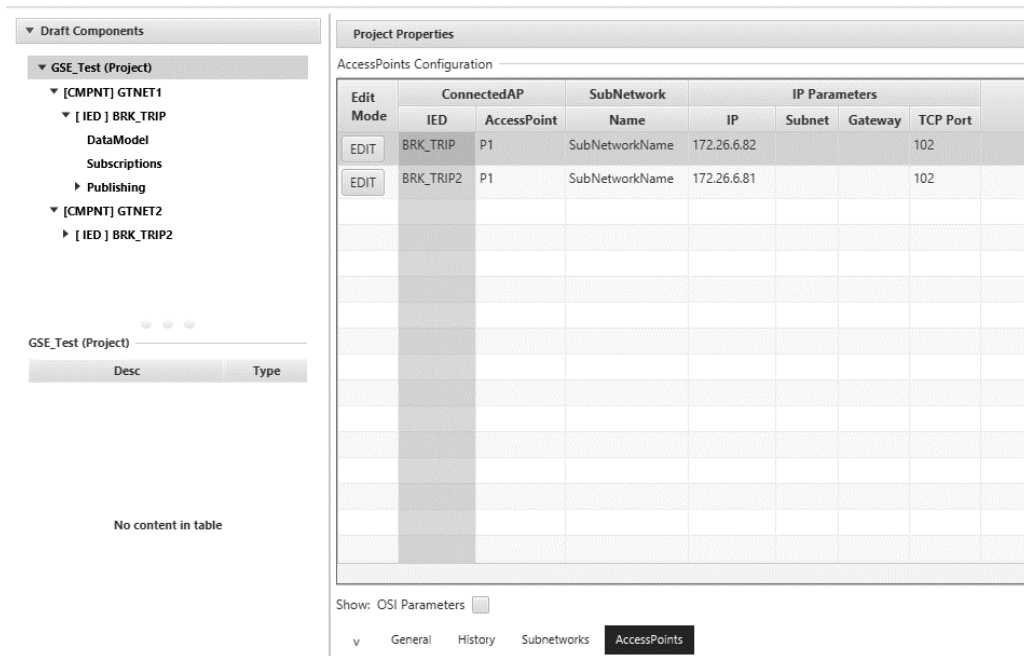


Рис. 17. Настройка точки доступа

Результаты функциональных испытаний

Проведение функциональных испытаний микропроцессорных устройств ТОР300 ДЗЛ осуществляется в соответствии с программой и методикой испыта-

ний, представленных в СТО 56947007-29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА» [11], с модификациями и дополнениями авторов статьи. Для терминалов ТОР300 ДЗЛ производятся испытания только основной функции – дифференциальной защиты линии (ДЗЛ).

Проверка работы ДЗЛ при внутреннем неустойчивом КЗ на ВЛ

Цель проверки: проверка корректной работы функции ДЗЛ при возникновении внутреннего неустойчивого КЗ.

В данном опыте моделируется внутренне неустойчивое трехфазное КЗ $K^{(3)}_{ABC}$, двухфазное КЗ $K^{(2)}_{BC}$ и двухфазное КЗ $K^{(1,1)}_{BCD}$ на землю в точке К1. Условия проведения испытаний, а также ожидаемый результат представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры повреждений и ожидаемый результат

| | |
|-------------------------------|---|
| Место КЗ | К1 |
| Фазовый угол возникновения КЗ | 0° |
| Виды КЗ | $K^{(3)}_{ABC}$ |
| | $K^{(2)}_{BC}$ |
| | $K^{(1,1)}_{BCD}$ |
| Последовательность режимов | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Возникновение внутреннего неустойчивого КЗ |
| | 3. Трехфазное отключение линии с двух сторон |
| Ожидаемый результат | Срабатывание ДЗЛ при возникновении внутреннего КЗ |

Осциллограммы, записанные полукомплектами, представлены на рис. 18-23 соответственно.

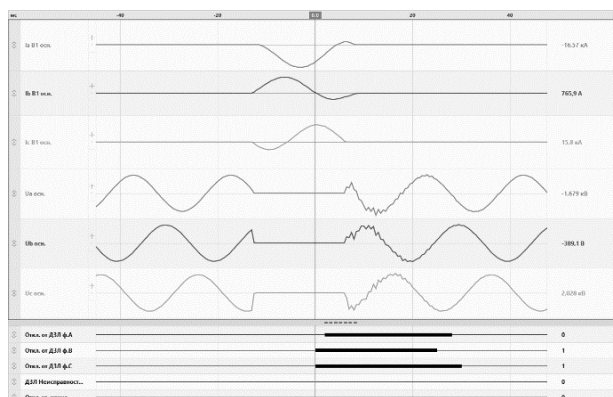


Рис. 18. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с первого полукомплекта ДЗЛ при КЗ неустойчивом $K^{(3)}_{ABC}$

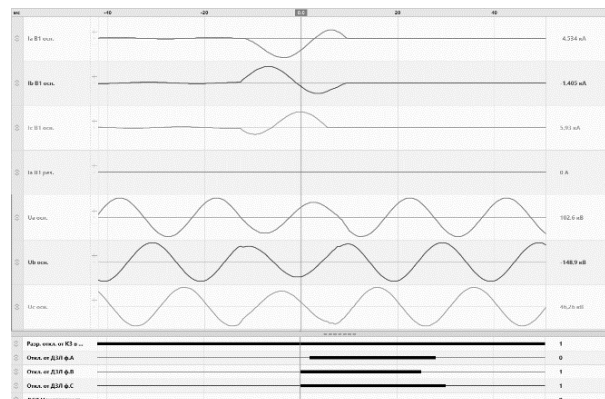


Рис. 19. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с второго полукомплекта ДЗЛ при КЗ неустойчивом $K^{(3)}_{ABC}$

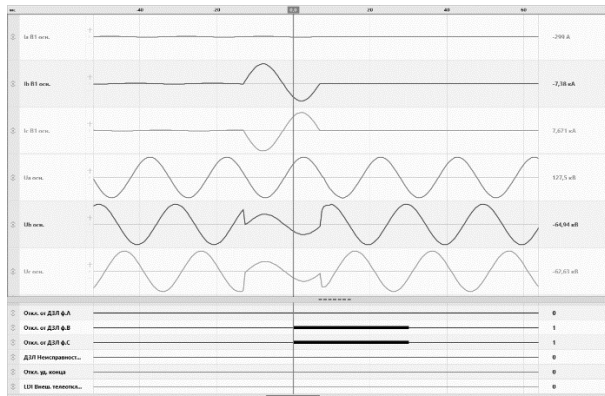


Рис. 20. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с первого полупериода ДЗЛ при КЗ неустойчивом $K^{(2)}_{BC}$

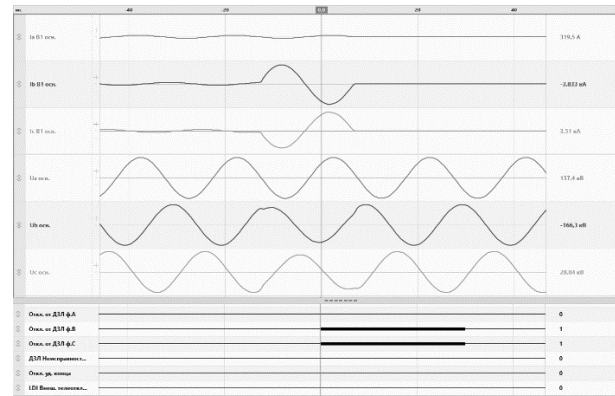


Рис. 21. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с второго полупериода ДЗЛ при КЗ неустойчивом $K^{(2)}_{BC}$

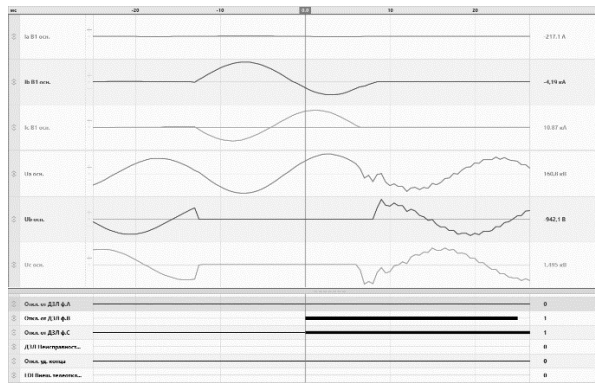


Рис. 22. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с первого полупериода ДЗЛ при КЗ неустойчивом $K^{(1,1)}_{BC0}$

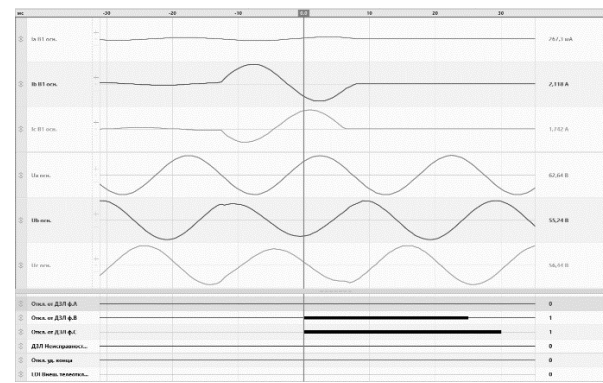


Рис. 23. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с второго полупериода ДЗЛ при КЗ неустойчивом $K^{(1,1)}_{BC0}$

Проверка работы ДЗЛ при внутреннем устойчивом КЗ на ВЛ

Цель проверки: проверка корректной работы функции ДЗЛ при возникновении внутреннего устойчивого КЗ.

В данном опыте моделируется внутренне устойчивое трехфазное КЗ $K^{(3)}_{ABC}$, двухфазное КЗ $K^{(2)}_{BC}$ и двухфазное КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$ на землю в точке К1. Условия проведения испытаний, а также ожидаемый результат представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры повреждений и ожидаемый результат

| | |
|-------------------------------|---|
| Место КЗ | К1 |
| Фазовый угол возникновения КЗ | 90° |
| Виды КЗ | $K^{(3)}_{ABC}$ |
| | $K^{(2)}_{BC}$ |
| | $K^{(1,1)}_{BC0}$ |
| Последовательность режимов | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Возникновение внутреннего устойчивого КЗ |
| | 3. Трехфазное отключение линии с двух сторон |
| Ожидаемый результат | Срабатывание ДЗЛ при возникновении внутреннего КЗ |

Осциллограммы, записанные полукомплектами, представлены на рис. 24 – 29 соответственно.

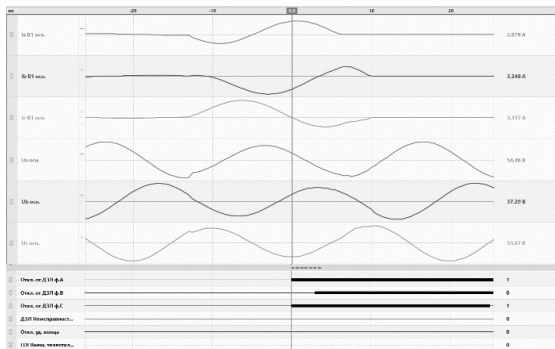


Рис. 24. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с первого полукомплекта ДЗЛ при устойчивом КЗ $K^{(3)}_{ABC}$

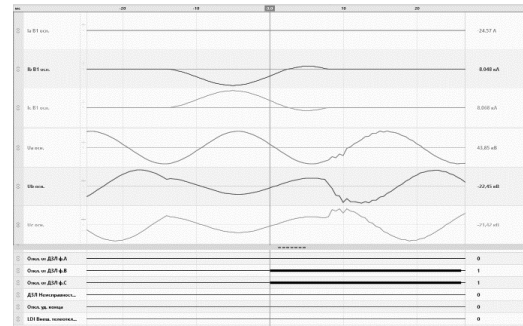


Рис. 25. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с второго полукомплекта ДЗЛ при устойчивом КЗ $K^{(3)}_{ABC}$

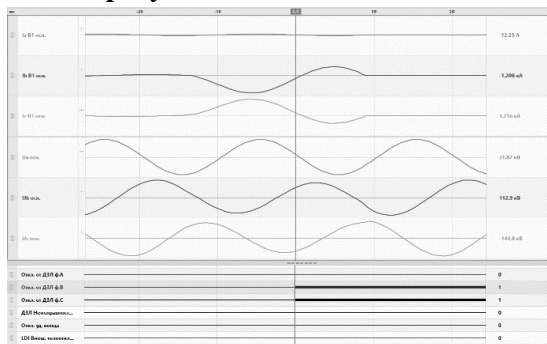


Рис. 26. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с первого полукомплекта ДЗЛ при устойчивом КЗ $K^{(2)}_{BC}$

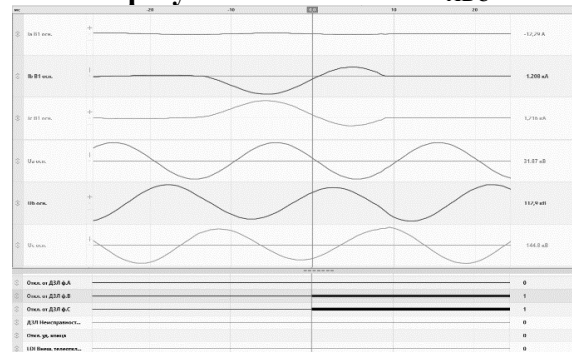


Рис. 27. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с второго полукомплекта ДЗЛ при устойчивом КЗ $K^{(2)}_{BC}$

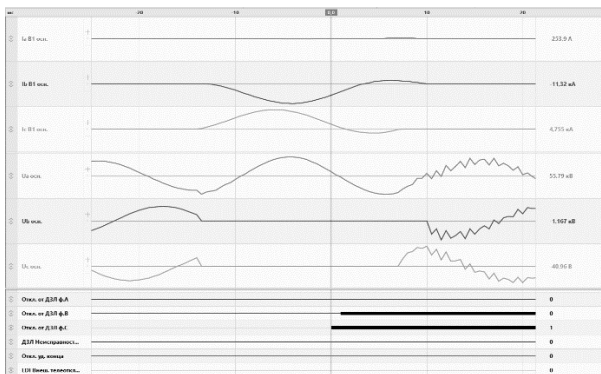


Рис. 28. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с первого полукомплекта ДЗЛ при устойчивом КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$

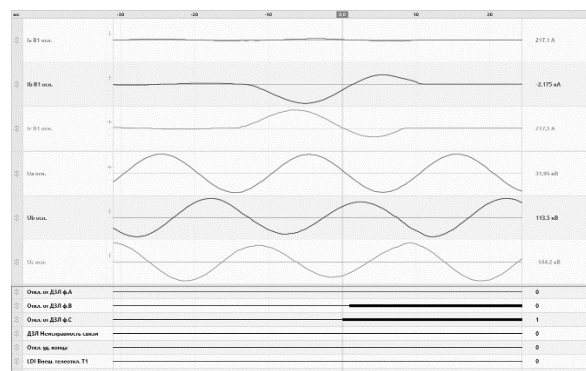


Рис. 29. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с второго полукомплекта ДЗЛ при устойчивом КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$

Проверка работы ДЗЛ при внешних КЗ

Цель проверки: проверка корректной работы функции ДЗЛ при возникновении внешних КЗ.

В данном опыте моделируется внешнее однофазное КЗ $K^{(1)}_{A0}$ на землю, трехфазное КЗ $K^{(3)}_{ABC}$ и двухфазное КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$ на землю в точке К4. $K^{(1,1)}_{BC0}$ переходит

во внутренне трехфазное КЗ $K^{(3)}_{ABC}$ в точке К2. Условия проведения испытаний, а также ожидаемый результат представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры повреждений и ожидаемый результат

| | |
|--|--|
| Место КЗ | К1 |
| Виды КЗ | $K^{(1)}_{A0}$ |
| | $K^{(3)}_{ABC}$ |
| | $K^{(1,1)}_{BC0}, K^{(3)}_{ABC}$ |
| Последовательность режимов при выполнении $K^{(1)}_{A0}, K^{(3)}_{ABC}$ | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Возникновение внутреннего КЗ |
| Последовательность режимов при выполнении $K^{(1,1)}_{BC0}$ переходящего во внутреннее $K^{(3)}_{ABC}$ | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Возникновение внутреннего КЗ |
| | 3. Переход во внутреннее КЗ в точке К2 через 30 мс |
| | 4. 3-фазн. откл. ЛЭП с двух сторон при переходе во внутр. КЗ |
| Ожидаемый результат | Срабатывание ДЗЛ при переходе КЗ во внутреннее |

Осциллограммы, записанные полукомплектами, представлены на рис. 30 – 31 соответственно.

Проверка работы ДЗЛ при внешнем несимметричном КЗ с реверсом мощности на параллельной цепи при одновременном отключении выключателей

Цель проверки: проверка корректной работы ДЗЛ в условиях реверса мощности, вызванного одновременным отключением выключателей при КЗ на параллельной линии.

В данном опыте моделируется двухфазное КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$ на землю, переходящее в трехфазное $K^{(3)}_{ABC}$, а также одновременное отключение выключателей параллельной линии, что приводит к возникновению реверса мощности. Условия проведения испытаний, а также ожидаемый результат представлены в табл. 4.

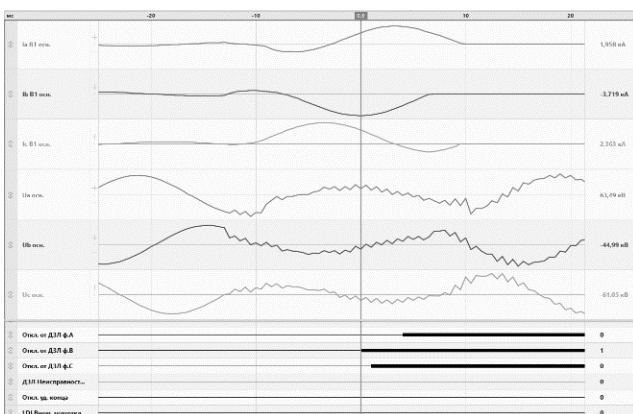


Рис. 30. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с первого полукомплекта ДЗЛ при КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$ переходящего во внутреннее $K^{(3)}_{ABC}$

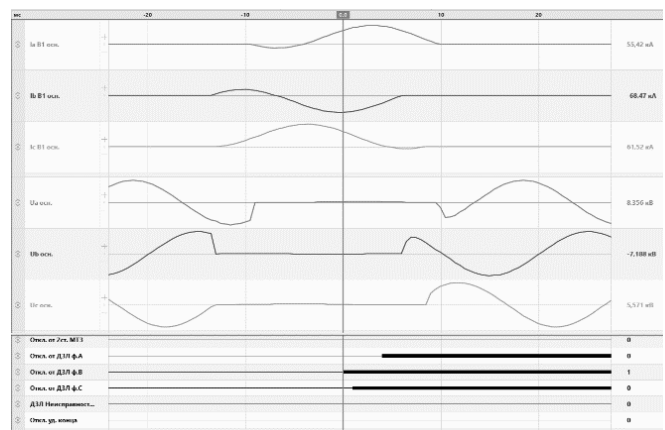


Рис. 31. Осциллограммы токов, напряжений и дискретных сигналов с второго полукомплекта ДЗЛ при КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$ переходящего во внутреннее $K^{(3)}_{ABC}$

Параметры повреждений и ожидаемый результат

| | |
|--|---|
| Место КЗ | К5, К6 (опыт №11) |
| Вид КЗ | $K^{(1,1)}_{BC0}$, $K^{(3)}_{ABC}$ |
| Нагрузка линии | Нормальный нагрузочный режим |
| Последовательность режимов при начальном КЗ в точке К5 | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Несимметричное $K^{(1,1)}_{BC0}$ на параллельной цепи 2 в точке К5, мощность по неповрежденной цепи 1 направлена от ПС Б к ПС А. |
| | 3. Через 40 мс отключение выключателя Q3 с возникновением реверса мощности по неповрежденной цепи 1 от ПС А к ПС Б. |
| | 4. Через 10 мс после отключения выключателя Q3, КЗ переходит в симметричное трехфазное. |
| | 5. Через 60 мс после возникновения КЗ отключается выключатель Q4 со стороны ПС Б. |
| Последовательность режимов начальном КЗ в точке К6 | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Несимметричное $K^{(1,1)}_{BC0}$ на параллельной цепи 2 в точке К6, мощность на неповрежденной цепи 1 направлена от ПС А к ПС Б. |
| | 3. Через 40 мс отключение выключателя Q4 с возникновением реверса мощности по неповрежденной цепи 1 от ПС Б к ПС А. |
| | 4. Через 10 мс после отключения выключателя Q4, КЗ переходит в симметричное трехфазное. |
| | 5. Через 60 мс после возникновения КЗ отключается выключатель Q3 со стороны ПС А. |

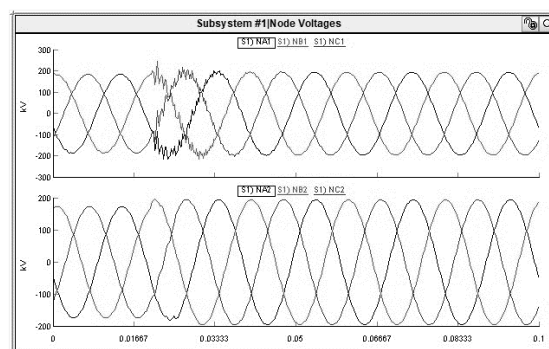
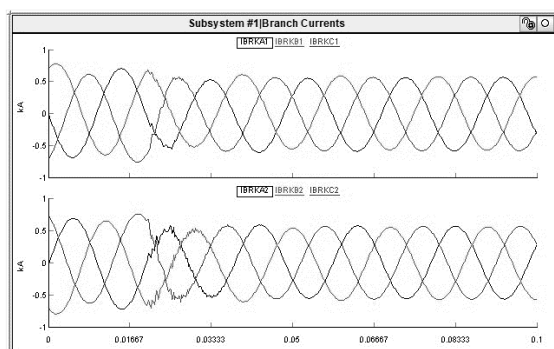


Рис. 32. Осциллограммы токов и напряжений со стороны ПС А и ПС Б при начальном КЗ в точке К5

Осциллограммы, записанные на виртуальном стенде, представлены на рис. 32 – 33 соответственно.

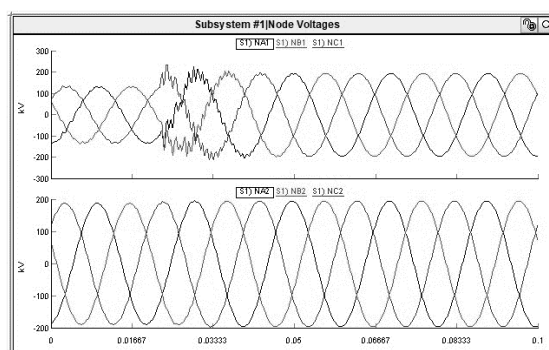
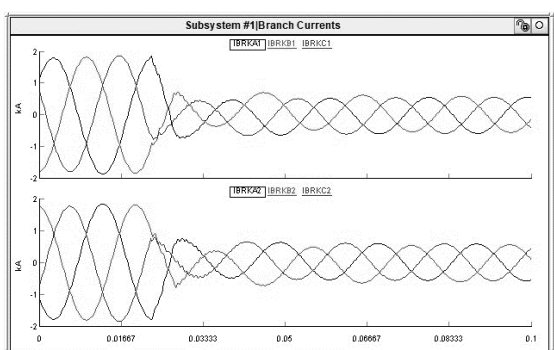


Рис. 33. Осциллограммы токов и напряжений со стороны ПС А и ПС Б при начальном КЗ в точке К6

Проверка работы ДЗЛ при внешнем несимметричном КЗ с реверсом мощности на параллельной цепи, переходящее в симметричное внутреннее

Цель проверки: проверка корректной работы ДЗЛ в условиях реверса мощности, вызванного неодновременным отключением выключателей при КЗ на параллельной линии, а также переходе КЗ из внешнего во внутреннее.

В данном опыте моделируется двухфазное КЗ $K^{(1,1)}_{BC0}$ на землю, переходящее в трехфазное $K^{(3)}_{ABC}$ на защищаемой линии, а также неодновременное отключение выключателей параллельной линии, что приводит к возникновению реверса мощности. Условия проведения испытаний, а также ожидаемый результат представлены в табл. 5.

Цель проверки: проверка корректной работы ДЗЛ в условия асинхронного режима работы ВЛ.

В данном опыте моделируется асинхронный режим ВЛ путем изменения частоты энергосистемы Б. Условия проведения испытаний, а также ожидаемый результат представлены в табл. 6.

Таблица 5

Параметры повреждений и ожидаемый результат

| | |
|----------------------------|---|
| Место КЗ | К5, К6 |
| Вид КЗ | $K^{(1,1)}_{BC0}$, $K^{(3)}_{ABC}$ |
| Последовательность режимов | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Несимметричное $K^{(1,1)}_{BC0}$ в точке К5, мощность на неповрежденной цепи 1 направлена от ПС Б к ПС А. |
| | 3. Через 40 мс отключение выключателя Q3 с возникновением реверса мощности по неповрежденной цепи 1 от ПС А к ПС Б. |
| | 4. Через 10 мс после отключения выключателя Q3 возникает трехфазное КЗ в точке К1 с сохранением $K^{(1,1)}_{BC0}$ в точке К5. |
| | 5. Через 60 мс после возникновения $K^{(1,1)}_{BC0}$ в точке К5 отключается выключатель Q4 со стороны ПС Б |
| | Трехфазное КЗ в точке К1 ликвидируется действием испытуемой защиты. |

Проверка работы ДЗЛ при асинхронном режиме ВЛ

Таблица 6

Параметры повреждений и ожидаемый результат

| | |
|----------------------------|--|
| Последовательность режимов | 1. Нормальный нагрузочный режим |
| | 2. Вследствие нарушения статической устойчивости возникает асинхронный ход между ПС А и ПС Б. Разность частот энергосистем 1,5 Гц. |

Осциллограммы, записанные на виртуальном стенде, представлены на рис. 34.

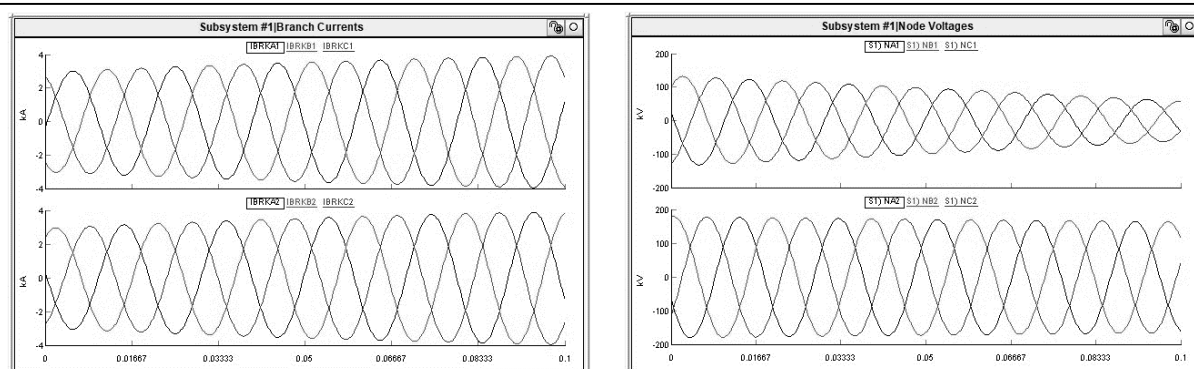


Рис. 34. Осциллограммы токов и напряжений со стороны ПС А и ПС Б

Автоматизация процесса испытаний с применением файлов-сценария

Данная функция позволяет значительно упростить процесс проведения функциональных испытаний при наличии сложных и трудно выполнимых «вручную» условий испытаний.

Использование файлов-сценариев предполагает запись действий оператора с последующей возможностью редактирования, содержащего последовательность действий кода.

Необходимость файлов-сценария обусловлена сложностью воспроизведения некоторых режимов (возникновение внешнего КЗ с переходом на внутреннее с сохранением фазы в той же точке и др.). Позволяет свести процесс испытаний к запуску определенных файлов-сценария (скриптов) и сохранения всей цепочки результатов (осциллограмм аналоговых и дискретных сигналов) в нужном каталоге.

Следует отметить, что запись последовательности действий оператора по управлению виртуальным стендом происходит в виде текстового файла. Например, если во время записи файла-сценария был произведен запуск симуляции, то команда *Start* запишется в выходной файл.

Приведем пример файла, используемого в ходе испытания. Данный сценарий реализует переход внешнего несимметричного КЗ в симметричное внутреннее КЗ, при этом данный переход происходит через 30 мс после возникновения внешнего КЗ. Такие действия физически невозможно осуществить оператору в реальном времени. Запуск скрипта воссоздает условия работы сети, приближенные к реальным. Для этого сначала включается запись, выполняется вся последовательность действий при переходе внешнего КЗ во внутреннее, а далее, при необходимости редактируется полученный файл-сценарий, задавая необходимые для проведения опыта выдержки времени (рис. 35).

| | |
|---|---|
| SUSPEND 1; PushButton "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : PB1"; SUSPEND 0.001; ReleaseButton "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : PB1"; SUSPEND 0.030; | Подача сигнала в логике КЗ для двухфазного КЗ фаз В и С на землю в точке К4 Ожидание 30 мс |
| SetDial "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : KZ_SLCT" = 1; SetDial "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : KZ1" = 8; | Установка переключателей в логике КЗ на новый вид замыкания в другой точке |
| PushButton "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : PB1"; SUSPEND 0.001; ReleaseButton "Subsystem #1 : CTLs : Inputs : PB1"; | Подача сигнала в логике КЗ для трехфазного КЗ в точке К2 |

Рис. 35. Пример файла – сценария

Команда *SUSPEND* означает приостановку на указанное в параметре время (в секундах) и соответствует времени, требуемому пользователю для выполнения

следующего действия. Значение параметра будет различным для каждой новой записи сценария. Для увеличения скорости выполнения сценария можно вручную редактировать или удалять значения параметра *SUSPEND*.

Далее по скрипту моделируется внешнее КЗ, нажимая кнопку на панели управления логикой КЗ. Команды *PushButton* и *ReleaseButton* записываются при нажатии и отпуске кнопки управления логикой КЗ соответственно. В качестве аргумента команды указывается имя кнопки. Затем, спустя 30 мс, в логике управления КЗ изменяется вид и точка КЗ. Команда *SetDial* записывается при действиях с переключателями места и типа повреждения. В качестве аргумента команды указывается имя и положение переключателя. Далее моделируется уже другой тип повреждения в новой точке нажатием кнопки в панели управления логикой КЗ.

Выводы

В рамках исследования, были проведены функциональные испытания микропроцессорных устройств релейной защиты ТОР 300 ДЗЛ 52Х производства ООО «Релематика». Для этого была создана имитационная модель линии с двусторонним питанием, приведено ее краткое описание, собран исследовательский стенд, спараметрированы необходимые конфигурационные файлы для обмена данными по МЭК 61850.

Анализ полученных результатов функциональных испытаний показывает, что:

- в случае внутреннего неустойчивого КЗ, наблюдается мгновенное срабатывание ДЗЛ и последующее отключение линии;
- при внутреннем устойчивом КЗ происходит незамедлительное срабатывание защиты;
- наблюдается отсутствие срабатывания при внешних КЗ и мгновенное срабатывание ДЗЛ терминалов РЗА в случае перехода внешнего КЗ во внутреннее;
- при возникновении внешнего несимметричного КЗ с реверсом мощности на параллельной цепи при одновременном отключении выключателей наблюдается несрабатывание ДЗЛ;
- в случае внешнего несимметричного КЗ с реверсом мощности на параллельной цепи, переходящее в симметричное внутреннее видно несрабатывание ДЗЛ при внешних КЗ и реверсе мощности, вызванном одновременным отключением выключателей, а также срабатывание при переходе внешнего КЗ во внутреннее;
- асинхронный ход, вызванный нарушением статической устойчивости также, не вызывает ложного срабатывания релейной защиты.

Поэтому можно сделать вывод о корректности работы терминала РЗА в части функции дифференциальной защиты линии и правильности проведенных конфигурационных действий исследователей.

Разработанная киберфизическая модель на примере простой электрической сети, позволяет производить испытания существующих и разрабатываемых вновь микропроцессорных устройств РЗА на качественно новом уровне в полунатурных условиях и с обратной связью.

Автоматизация испытательного процесса с использованием файлов-сценария позволяет исследователю быстро производить типовое тестирование функций устройства РЗА, воспроизводить сложные режимы, переходящие из одно в другой в определенные моменты времени, что позволяет добиться условий проведения эксперимента максимально приближенных к реальным, а также автоматически сохранять результаты в виде осциллограмм.

Универсальность имеющейся аппаратной базы, имитационной модели и созданного виртуального стенда *RunTime* позволяет производить отладку обмена данными по МЭК 61850 (*SV, GOOSE, MMS*) и выявление ошибок и уязвимостей в программном обеспечении.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Библиографический список

1. **Yadav, G., Liao, Y., Burfield, A.D.** Hardware-in-the-Loop Testing for Protective Relays Using Real Time Digital Simulator (RTDS). *Energies* 2023, 16, 1039. <https://doi.org/10.3390/en16031039>
2. **Gurusinghe, D. R., Kariyawasam, S., Ouellette, D. S.** Testing of IEC 61850 sampled values based digital substation automation systems. *The Journal of Engineering*. 2018, Vol. 2018 Iss. 15, pp. 807-811. doi: 10.1049/joe.2018.0165
3. **Wang G. N., Pan, B.R., Gui, X.Z., Xie, G.Q., Zhou, S.H., Zheng ,X.** Study on the Adjustment of the Network Interface for the Station Domain Protection Device Based on RTDS. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 354 (2019) 012113. doi:10.1088/1755-1315/354/1/012113.
4. **Шамис, М.А.** Novacor – новая аппаратная платформа симуляторов RTDS / М.А. Шамис, Ф.А. Иванов // *Энергоэксперт*. – 2017. – № 4. – С. 16-17.
5. **Шамис М.А.** Использование современных симуляторов энергосистем для изучения электротехники и энергетики // *ЭнергоStyle*. – 2017. – № 3 (39). – С. 34-35.
6. Программно-аппаратный комплекс симулятор RTDS на платформе NovaCor. Техническое описание / EnLAB. 2017. – С. 3-13.
7. RSCAD FX. Инструкция по началу работы / EnLAB. 2021. – 33 с.
8. **Лоскутов, А. А.** Проведение функциональных испытаний терминала токовой защиты SPAC 801 с применением программно-аппаратного комплекса RTDS Novacor / А.А. Лоскутов, И.А. Петров // *Будущее технической науки. Сборник материалов XXI Всероссийской молодежной научно-технической конференции*. – Н.Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2022. – С. 100-101.
9. **Куликов, А.Л.** Моделирование электроэнергетических систем и алгоритмов РЗ и А в программном комплексе PSCAD / А.А. Лоскутов, А.Л. Куликов. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. – 479 с.
10. **Куликов, А.Л.** Проведение функциональных испытаний устройств защиты и автоматики присоединений 6-35 кВ с применением программно-аппаратного комплекса RTDS NOVACOR. Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» / А.Л. Куликов, А. А.Лоскутов, И.А. Петров. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2023. – 139 с.
11. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. – Введ. 28.02.2017. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. – 223 с.
12. Программа параметризации и мониторинга терминалов РЗА «МикроА». Руководство оператора АИПБ.05.15.015 34-3.1 [Электронный ресурс] – URL: <https://relematika.ru/products/servisnoe-po/mikra-parametrizatsiya-i-monitoring-ustroystv-rza-omp-ras-btss-tm-i-ee/>

**A.A. Loskutov, A.L. Kulikov, I.A. Petrov, V.A. Koshelev, A.R. Zhafyarov,
R.I. Illarionov**

**CYBERPHYSICAL MODEL WITH IEC 61850 DATA EXCHANGE
DEVELOPMENT FOR TESTING THE DIFFERENTIAL PROTECTION
FUNCTION OF POWER LINES**

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The issues of compliance of newly created microprocessor devices of relay protection and automation of 110-220 kV with the uniform requirements and norms presented in STO 56947007-29.120.70.241-2017 "Technical requirements for microprocessor devices of Relay Protection and Automation" are considered. At the same time, methods and programs for conducting functional tests of the differential protection terminal of the TOR 300 DZL 52X using the RTDS NovaCor hardware and software complex are considered. A cybernetic model has been developed that allows testing a differential protection device for a power transmission line with data exchange according to IEC 61850 (SV streams, GOOSE messages).

Keywords: microprocessor relay protection and automation devices (RPA), tests, technical requirements, RTDS NovaCor hardware and software complex.

References

- [1] Yadav, G.; Liao, Y.; Burfield, A.D. Hardware-in-the-Loop Testing for Protective Relays Using Real Time Digital Simulator (RTDS). *Energies* 2023, 16, 1039. <https://doi.org/10.3390/en16031039>
- [2] Gurusinghe D. R., Kariyawasam S., Ouellette D. S. Testing of IEC 61850 sampled values based digital substation automation systems. *The Journal of Engineering*. 2018, Vol. 2018 Iss. 15, pp. 807-811. doi: 10.1049/joe.2018.0165
- [3] Wang G. N., Pan B. R., Gui X. Z., Xie G. Q., Zhou S. H., Zheng X. Study on the Adjustment of the Network Interface for the Station Domain Protection Device Based on RTDS. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 354 (2019) 012113. doi:10.1088/1755-1315/354/1/012113.
- [4] M.A Shamis. F.A. Ivanov "Novacor – novaya apparatnaya platforma simulyatorov RTDS [Novacor - new hardware platform for RTDS simulators]", *Energoekspert*, pp. 16-17, 2017 (in Russia)
- [5] M.A Shamis "Ispolzovanie sovremennyh simulyatorov energosistem dlya izucheniya elektrotehniki i energetiki [Using modern power system simulators to study electrical engineering and energy]", *EnergoStyle*, pp. 34-35, 2017 (in Russia)
- [6] "Programmno-apparatny kompleks simulyator RTDS na platforme NovaCor [Hardware-software complex RTDS simulator on the NovaCor platform]". *EnLAB*, pp. 3- 13, 2017 (in Russia)
- [7] "RSCAD FX. Instrukciya po nachalu raboty [RSCAD FX. Getting Started Guide]". *EnLAB*, pp. 33, 2017 (in Russia)
- [8] A.A.Loskutov, I.A. Petrov, "Provedenie funktsionalnyh ispytani terminala tokovoj zashchity SPAC 801 s primeneniem programmno-apparatnogo kompleksa RTDS Novacor [Conducting functional tests of the SPAC 801 current protection terminal using the RTDS Novacor software and hardware complex]", *Materials "Budushchee tekhnicheskoy nauki. sbornik materialov XXI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [The future of technical science. collection of materials of the XXI All-Russian Youth Scientific and Technical Conference]*". 2022 (in Russia)
- [9] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov "Modelirovanie elektroenergeticheskikh sistem i algoritmov RZ i A v programmnom komplekse PSCAD [Modeling of electric power systems and algorithms of RP and A in the PSCAD software package]". 2021 (in Russia)

-
- [10] Kulikov A.L., Provedenie funkcionalnysh ispitany ustroystv zashity I avtomatiki prisoedineni 6-35 kV s primeneniem programno-apparatnogo complexa RTDS-NOVACOR / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, I.A. Petrov // Uchebnoe posobie dlya studentov, obuchaushihsy po napravleniu podgotovki 13.04.02 “electroenergetika I electrotechnika” / Nizhniy Novgorod, 2023.
- [12] Programma parametrizatsii I monitooringa terminalov RZA “MiKRA”. Rukovodstvo operatora AIPB.05.15.015 34-3.1 [Elektronny resurs] – URL: <https://relematika.ru/products/servisnoe-po/mikra-parametrizatsiya-i-monitoring-ustroystv-rza-omp-ras-btss-tm-i-ee/>

А.А. Лоскутов, А.Л. Куликов, И.А. Петров, Н.М. Шмелева,
А.А. Кринкин

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТОР 200 В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ОБЪЕКТОМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы проверки качества функционирования новых микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики в сетях 6-35 кВ с объектом распределенной генерации в соответствии с требованиями и нормами, представленным в СТО 56947007-29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА». Проводится проверка терминала релейной защиты ТОР 200 с применением программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor*. Разработана программа проведения функциональных испытаний терминалов РЗА с функцией направленной токовой защиты.

Ключевые слова: микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), испытания, технические требования, программно-аппаратный комплекс *RTDS NovaCor*, максимальная токовая направленная защита, распределенная малая генерация.

Введение

Развитие распределенной генерации предоставляет ряд преимуществ для потребителей электроэнергии такие как: повышение качества и эффективности использования электроэнергии, снижение потерь мощности, снижение экономических затрат на электроэнергию. В то же время подключение дополнительного источника питания в сеть приводит к двустороннему потоку энергии и, вследствие, невозможности использования обычной ненаправленной МТЗ для защиты присоединений 6-10 кВ [1,2]. Кроме того, в городских распределительных сетях 6-10 кВ распространены схемы с параллельной работой нескольких линий и кольцевые схемы электроснабжения, которые также требуют установки направленной токовой защиты.

Для обеспечения надежности вышеупомянутых сетей необходимо тщательно проверять устанавливаемые терминалы РЗА на соответствие единым нормам и требованиям, предъявляемым в СТО 56947007-29.120.70.241-2017 [3]. В данном стандарте установлены технические требования к устройствам релейной защиты электрических сетей классов напряжения 6 – 750 кВ и к связанным с ними на уровне управляющих сигналов (или встроенных функций) устройствам автоматики, а также приведены методики проведения испытаний и определены критерии качества функционирования поверяемого оборудования. В том числе стандарт предлагает подробные указания к порядку проведения испытаний функций защит в сетях

110 кВ и выше. Однако отсутствуют четко определенные методики проверки устройств РЗА 6-35 кВ, а также не упомянут порядок проведения испытания функции максимальной токовой направленной защиты.

При проверке качества вновь создаваемых устройств РЗА наиболее современным решением является использование симулятора *RTDS* [4-7]. Он позволяет производить испытания оборудования с помощью имитационного моделирования в реальном времени электрических, электромагнитных и электромеханических процессов в созданной заранее виртуальной модели и обеспечивает непрерывное взаимодействие этой модели с проверяемым оборудованием.

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в разработке программы испытаний устройств РЗА сетей 6-35 кВ с установками распределенной генерации на соответствие техническим требованиям СТО 56947007-29.120.70.241-2017 [3] с учетом особенностей проверки функций направленной токовой защиты.

В задачи исследования входит:

1. Создание имитационной модели сети с объектом распределенной генерации и задание ее параметров;
2. Формирование методики проверки направленной токовой защиты и других базовых функций микропроцессорных устройств РЗА сетей 6-35 кВ с применением программно-аппаратного комплекса (ПАК) *RTDS NovaCor*;
3. Тестирование разработанной методики и программы проведения функциональных испытаний на примере микропроцессорного терминала TOP 200 (ООО «Релематика»).

Методика проведения испытаний терминалов РЗА с помощью системы моделирования реального времени

Основные положения методики проведения испытаний с применением ПАК *RTDS NovaCor* при взаимодействии с терминалом РЗА посредством подачи аналоговых и дискретных сигналов заключаются в следующем.

— Предварительно, создать и отладить имитационную модель электрической сети в соответствии испытываемыми функциями терминала.

— Произвести настройку и параметрирование испытываемого терминала согласно разработанной предприятием изготовителем методике выбора параметров срабатывания.

— Подключить аналоговые входы токов и напряжений устройства к усилителям, а также подключить необходимые дискретные входы и выходы устройства к соответствующим модулям *RTDS*.

— Подать с усилителей аналоговые сигналы тока и напряжения. Проконтролировать соответствие подаваемых значений и токов и напряжений на устройстве РЗА, проверить допустимость выдаваемых значений модулем вывода аналоговых сигналов *GTAO*.

- Проверить дискретный выход отключения устройства РЗА путем подачи токов или напряжений, превышающих параметр срабатывания терминала.
- Выполнить программу испытаний.
- Работа испытуемого устройства контролируется по контактам его выходных реле, а также промежуточных сигналов органов защиты, регистрируемых осциллографом терминала или другим осциллографом, позволяющим обеспечить необходимую точность регистрации сигналов.

Создание имитационной модели участка электрической сети

Создание имитационной модели осуществлялось с помощью ПАК *RTDS*, предназначенного для имитации в реальном времени электрических, электромагнитных и электромеханических процессов в заданной виртуальной модели энергосистемы [8-12].

Для проведения проверки микропроцессорного терминала РЗА создана имитационная модель системы электроснабжения с источником малой генерации (рис. 1). Параметры исследуемой системы электроснабжения заданы в (табл. 1-4).

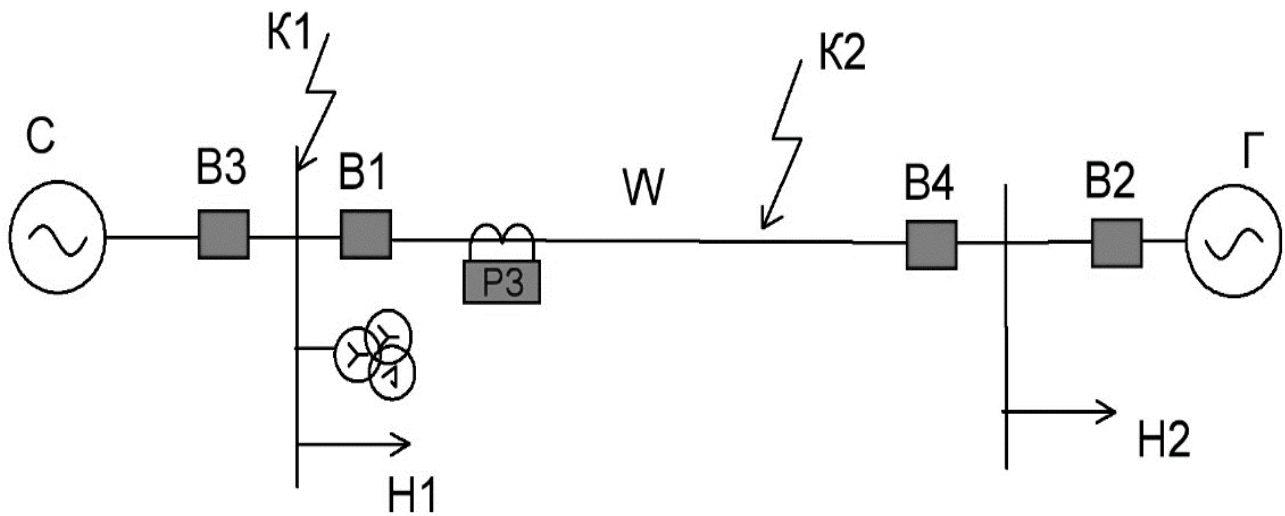


Рис. 1. Исследуемая система электроснабжения

Таблица 1

Параметры энергосистемы источника

| Параметр | Обозначение, ед. изм. | Значение параметра |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Номинальное напряжение | $U_{ном.}$, кВ | 10,5 |
| Импеданс | Z_C , Ом | $0,4 \angle 86^\circ$ |

Таблица 2

Параметры генератора

| Параметр | Обозначение, ед. изм. | Значение параметра |
|------------------------|-----------------------|--------------------|
| Номинальное напряжение | $U_{Г}$, кВ | 10 |
| Номинальная мощность | $S_{ном}$, МВА | 2,84 |

Таблица 3

Параметры воздушной ЛЭП

| Параметр | Обозначение, ед. изм. | Значение параметра |
|--|-----------------------|---------------------|
| Длина линии | L , км | 10 |
| Марка, сечение | - | АС-120/19 |
| Расположение проводов, расстояние между фазами | ф-ф, мм | горизонтальное, 500 |
| Активное сопротивление постоянному току | r_0 , Ом/км | 0,244 |
| Длительно допустимый ток | $I_{до}$, А | 390 |

Таблица 4

Электрическая нагрузка

| Параметр | Обозначение, ед. изм. | Значение параметра | |
|-------------------------|-----------------------|--------------------|------|
| | | H1 | H2 |
| Мощность нагрузки | МВА | 10 | 3,98 |
| cosφ | - | 0,87 | 0,88 |
| Коэффициент самозапуска | $k_{с.зап.}(H)$ | 1,2 | 1,2 |

Разработанная имитационная модель представлена на рис. 2.

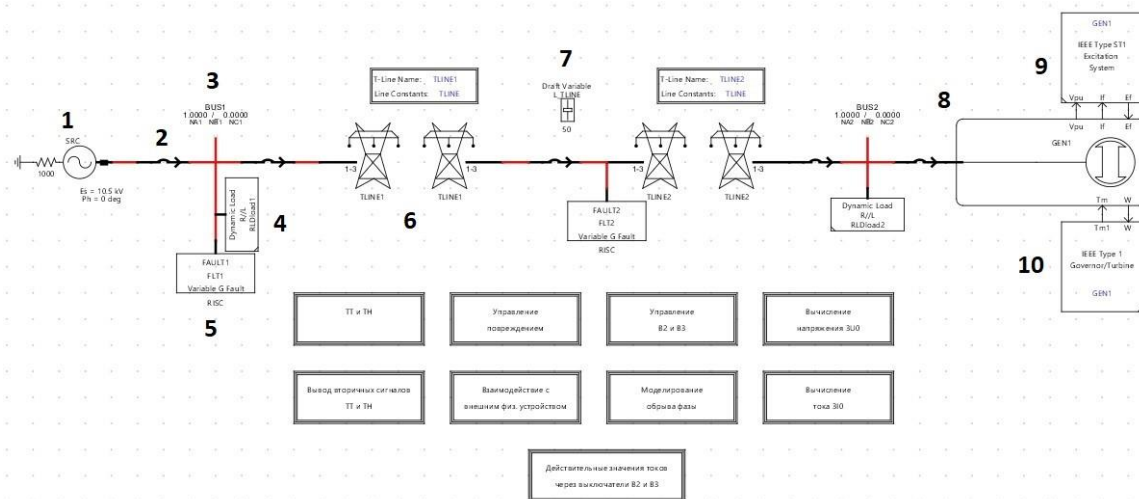
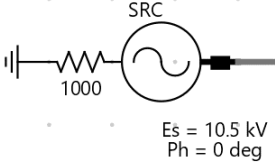
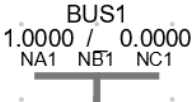

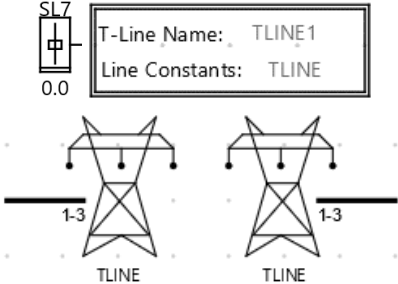
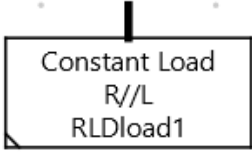
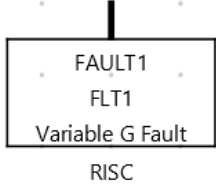
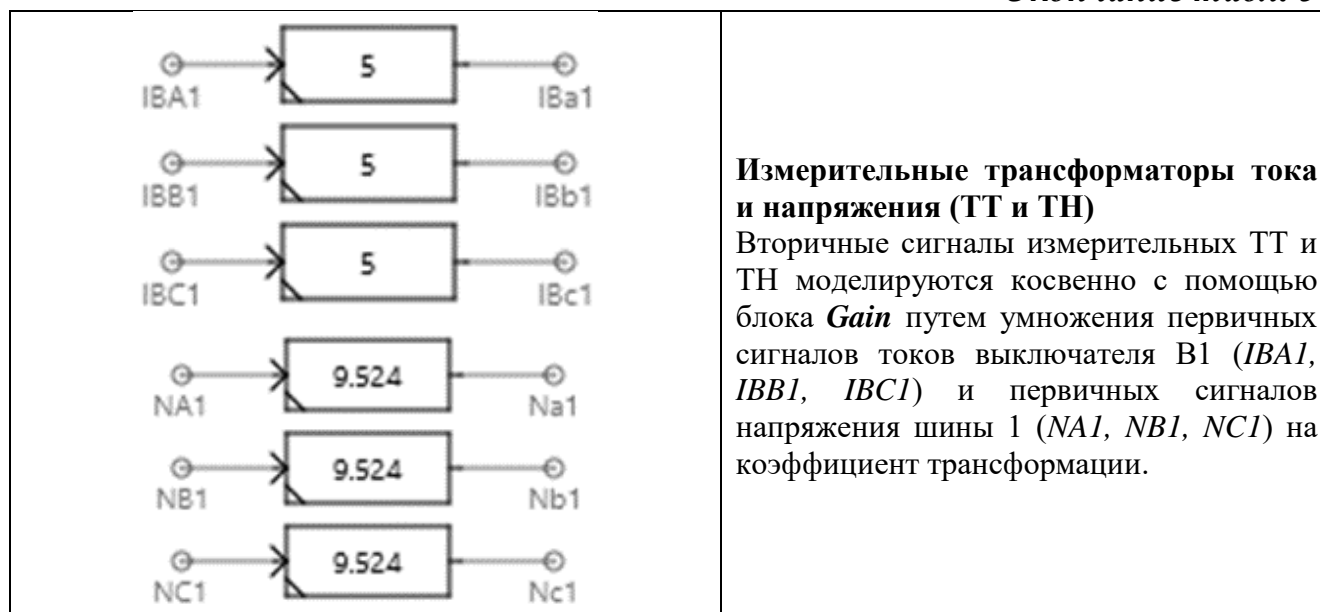


Рис. 2. Имитационная модель сети 10 кВ

Таблица 5

Основные элементы имитационной модели

| Пиктограмма элемента | Назначение и особенности элемента |
|---|--|
|  | <p>Трехфазный источник напряжения (3P Voltage Source - 1) Моделирует питающую энергосистему. Сеть с изолированной нейтралью, характерной для напряжения 10 кВ, моделируется через большое сопротивление источника к земле.</p> |
|  | <p>Шины (Bus - 3) Моделирует шины системы электроснабжения для подключения источника и нагрузки.</p> |
|  | <p>Выключатель (3P Breaker - 2) Моделирует выключатели В1 и В4, отключение которых происходит за счет управляющих сигналов от испытываемого терминала, и выключатели В2, В3 и В5, управление которыми осуществляется с помощью управляющих кнопок, созданных внутри модели. Выключатель В5 с возможностью пофазного отключения, расположенный в середине линии, используется для имитации обрыва фазы.</p> |
|  | <p>Воздушная ЛЭП (Transmission Line - 6) Защищаемая линия состоит из 2 составляющих для моделирования коротких замыканий (КЗ) на различных расстояниях от начала линии. Изменения расстояния места КЗ осуществляется в <i>RunTime</i> с помощью элемента <i>Draft Variable -7</i>.</p> |
|  | <p>Нагрузка (3P Dynamic Load - 4) Моделирует нагрузку с возможностью изменения параметров во время моделирования, что удобно во время отладки модели.</p> |
|  | <p>Короткозамыкатель (Variable rate or time fault removal - 5) Моделирует все возможные виды коротких замыканий с помощью управляющих сигналов от схемы управления местом и типом повреждения.</p> |



Для моделирования источника малой генерации был выбран генератор *FRAME HV 804 T (Stamford)*. Модель генератора (рис. 3) состоит из трех элементов: непосредственно синхронной машины (*Synchronous machine*), системы возбуждения генератора (*ST1 Exciter IEEE 1981*) и регулятора скорости вращения турбины генератора (*IEEE Type-1 Governor*).

Такие параметры генератора как номинальная мощность и напряжение, сопротивление и постоянные времени продольной и поперечной оси задаются в соответствии с техническим паспортом производителя [13]. Кроме того, чтобы создать наиболее приближенные к реальным значениям токи подпитки точки КЗ от генератора, необходимо также правильно настроить параметры его системы возбуждения.

Так как зачастую данные параметры отсутствуют, при задаче параметров элемента системы возбуждения следует опираться на кривую уменьшения трехфазного короткого замыкания, обычно приведенную в техническом паспорте.

Для выбора места и типа короткого замыкания используется схема управления, представленная на рис. 4

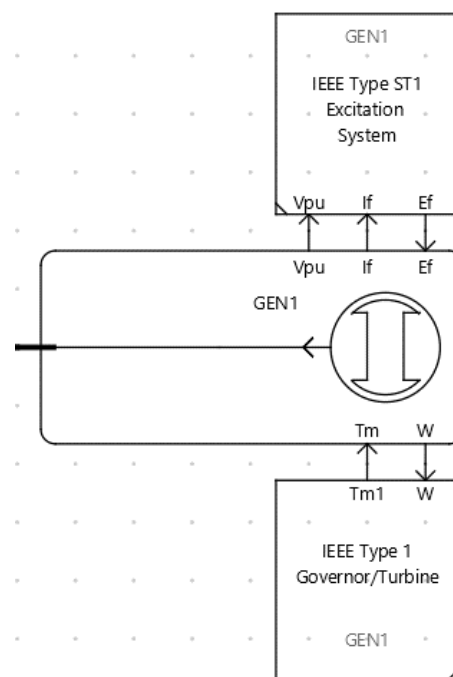


Рис. 3. Модель генератора с АРВ

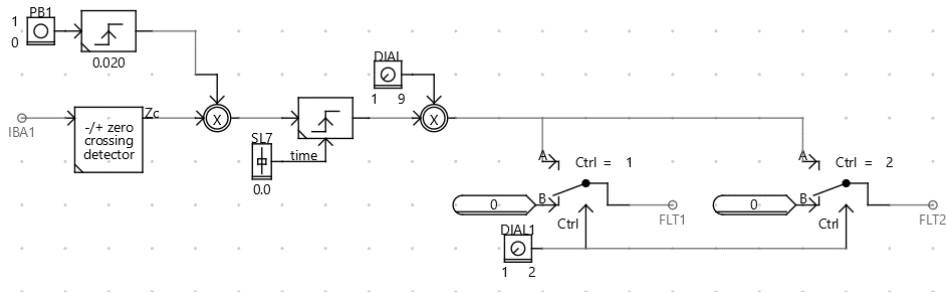


Рис. 4. Схема управления местом и типом повреждения

Рассмотрим принцип работы схемы на примере однофазного КЗ фазы *A* на землю в точке *K1*. При нажатии на *Push Button* на *Pulse Generator* поступает сигнал «1». Далее сигнал длительностью 0,02 с поступает на *Multiplication Block*. Также на данный элемент поступает сигнал об обнаружении перехода через ноль. При моделировании в *RunTime*, если первичный ток *IBA1* переходит через ноль, а кнопка *PB1* окажется нажатой, то сигнал на выходе элемента *Multiplication Block* примет логическую «1». Далее сигнал поступает на другой *Pulse Generator*, длительность сигнала которого регулируется с помощью элемента *Slider* (моделирует длительность КЗ). Выбор типа КЗ осуществляется с помощью *Dial*. Для моделирования однофазного КЗ фазы *A* переключатель устанавливается в положение № 1. На второй *Multiplication Block* подается сигнал «1». Сигналы, поступившие в *Multiplication Block*, перемножаются. Выбор места повреждения происходит по следующему принципу. При положении *Dial* №1 на входы *Ctrl* всех *Signal Switch* приходит сигнал «1». Положение с *B* на *A* меняет только первый *Signal Switch*. Сигнал от *Multiplication Block* поступает на вход *A* и далее подается на *Wire Label*. Итоговый сигнал, подаваемый в блок *Variable rate or time fault removal*, равен «1» и имеет продолжительность, установленную в элементе *Slider*.

Немаловажными являются элемент *GTAO* (рис. 5). Элемент *GTAO* предназначен для записи входных сигналов в плату аналогового выхода высокой точности *GTAO*. Данная плата необходима для передачи вторичных токов и напряжений, полученных с помощью измерительных ТТ и ТН, на токовые входы и входы напряжения микропроцессорного терминал РЗА.

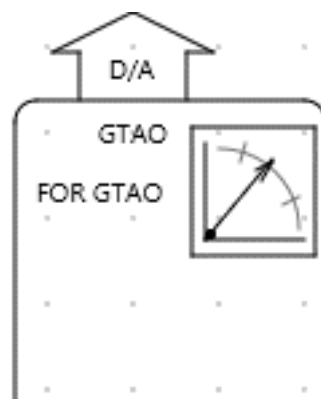


Рис. 5. Пиктограмма элементов *GTAO*

Логика управления выключателем предназначена для управления физическим устройством – микропроцессорным терминалом релейной защиты. За счет платы *GTFPI* осуществляется постоянная обратная связь между *RTDS* и устройством РЗА. Общий вид схемы логики управления представлен на рис. 6.

Кратко рассмотрим принцип работы схемы. В начале от *Wire Label* «*RPV_RPO*» поступает сигнал равный «0», что соответствует положению выключателя «отключен».

При включении выключателя В1 с помощью управляющей кнопки на терминале релейной защиты от первого входа на *Word-to-Bit Converter* поступает «1». *Word-to-Bit Converter* преобразует полученный сигнал в несколько логических сигналов. Преобразование происходит следующим образом (табл. 6):

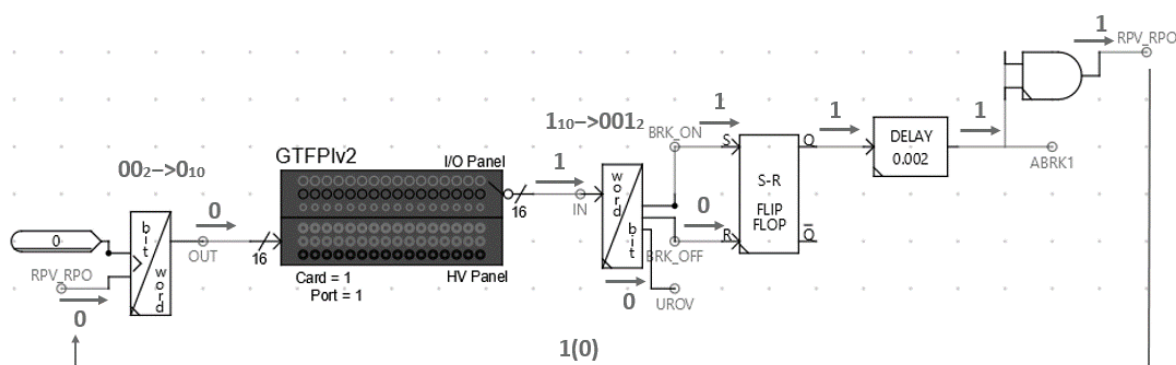


Рис. 6. Логика управления выключателем

Таблица 6

Преобразование логических сигналов в целочисленное слово элементом *Word-to-Bit Converter*

| Номер входа элемента <i>Word-to-Bit Converter</i> | ес | | Положение | | Величина |
|---|----|--|-----------|--|----------|
| 1 | | | 1 | | 1 |
| 2 | | | 0 | | 0 |
| 3 | | | 0 | | 0 |
| Контрольная сумма | | | | | 1 |

Далее полученные в результате преобразования сигналы поступают на RS триггер. При подаче «1» на вход S и «0» на вход R, выходной сигнал на выходе RS триггера Q «1». Данный сигнал задерживается с помощью элемента *Delay* на время большее шага расчета, чтобы состояние дискретного входа не вернулось в исходное состояние в промежутке между процедурами обработки сигнала компонентом *GTFPI* и модель смогла учесть этот импульс. Сигнал «1» поступает на *Wire Label* «*ABRK1*» в блок *3P Breaker*, что соответствует включению выключателя. Кроме того, сигнал «1» через логический элемент «И» поступает на *Wire Label* «*RPV_RPO*», и далее отправляется в начало схемы на *Bit-to-Word Converter*. Далее элемент *Bit-to-Word Converter* преобразует полученные логические сигналы от *Wire Label* «*RPV_RPO*» и от *Integer Constant* равный «0» в целочисленное слово. Преобразование происходит следующим образом (табл. 7).

Таблица 7

Преобразование логических сигналов в целочисленное слово элементом *Bit-to-Word Converter*

| Вес | | Положение | | Величина | Номер входа элемента <i>Bit-to-Word Converter</i> |
|-------------------|---|-----------|---|----------|---|
| 1 | × | 0 | = | 0 | 1 |
| 2 | × | 1 | = | 2 | 2 |
| Контрольная сумма | | | | 2 | |

Далее полученный в результате преобразования сигнал поступает в элемент *GTFPI*. Так как полученное элементом *GTFPI* целочисленное значение равно 2, то на плате *GTFPI* становится активным второй дискретный выход. С второго дискретного выхода сигнал поступает на входы микропроцессорного терминала РЗА «РПВ/РПО». Так как высоковольтная панель платы *GTFPI* имеет на одном выходе как нормально разомкнутый контакт, так и нормально замкнутый, то сигналы РПО и РПВ объединены.

Таким образом, осуществляется постоянная обратная связь между терминалом микропроцессорной релейной защиты и симулятором *RTDS NovaCor*.

Выбор параметров срабатывания защит

С помощью разработанной системы электроснабжения возможно проведение испытания следующих функций микропроцессорного устройства релейной защиты и автоматики:

- максимальная токовая направленная защита (МТЗН);
- защита от обрыва токоведущего проводника (ЗОП);
- двухступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП);
- функция резервирования отказа выключателя (УРОВ);
- автоматическое повторное включение (АПВ).

Расчет параметров срабатывания выбранных защит велся согласно разработанным компанией ООО «Релематика» рекомендациям [14].

По причине наличия в разработанной схеме дополнительного источника питания в виде источника распределенной генерации в системе осуществляется двусторонний поток энергии. Вследствие чего, направление протекаемого тока через измерительный ТТ зависит от места повреждения [1].

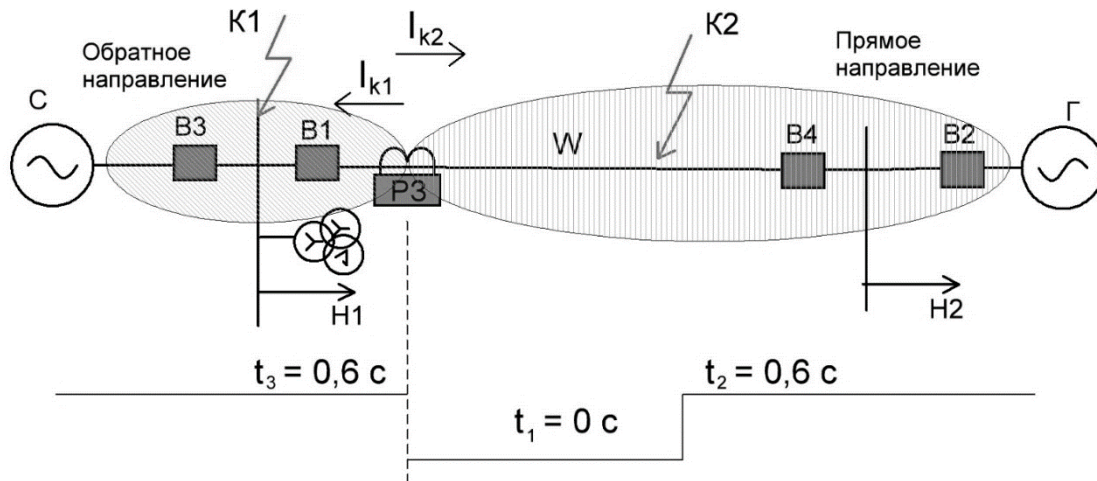


Рис. 7. Зона действия рассчитанной МТЗ

С учетом данных особенностей при настройке МТЗ выбраны 3 ступени защиты:

1. Первая ступень защиты – токовая отсечка мгновенного действия, срабатывающая при прямом направлении мощности КЗ;
2. Вторая ступень защиты – максимальная токовая защита, срабатывающая при прямом направлении мощности КЗ;
3. Третья ступень защиты – максимальная токовая защита, срабатывающая при обратном направлении мощности КЗ.

Защитные зоны выбранных ступеней МТЗ изображены на рис.7.

Структура испытательной установки

Конфигурация испытательной установки включает в себя ЭВМ с программным обеспечением *RSCAD FX*, модуль вывода аналоговых сигналов *GTAO*, усилитель мощности электрических сигналов *PA460Bi*, вычислительный модуль *RTDS NovaCor*, модуль интерфейса панелей ввода/вывода *GTFPI*, модуль вывода дискретных сигналов, микропроцессорный терминал релейной защиты, источник постоянного тока (рис. 8) [15].



Рис. 8. Структура испытательной установки

Кратко рассмотрим принцип ее работы. ЭВМ с программным обеспечением *RSCAD FX* передает параметры моделируемой сети в вычислительный модуль *RTDS*. Он в свою очередь осуществляет нужные вычисления и выдает необходимые выходные сигналы на модуль *GTAO* и модуль вывода дискретных сигналов. Далее аналоговые сигналы подаются на усилитель и далее на токовые входы и входы напряжения терминала, дискретные сигналы РПО (реле положения «отключено»), РПВ (реле положения «включено») на дискретные входы терминала.

Питание терминала осуществляется от источника постоянного тока (Источник 1 в РЕТОМ-21). Терминал выдает необходимые для обеспечения выбранных защит выходные сигналы. Посредством модуля *GTFPI* и панели ввода сигналы передаются в вычислительный модуль *RTDS*, где происходит их обработка и дальнейшая передача на ЭВМ. Таким образом осуществляется постоянная обратная связь между устройством РЗА и имитационной моделью, что позволяет наблюдать полную картину взаимодействий системы и релейной защиты и электроэнергетической сетью.

Программа проведения испытаний

В соответствии с выбранными функциями микропроцессорного терминала РЗА составляется программа проведения испытаний (табл.6). Выполнение функциональных испытаний осуществляется, следуя методике и программе проведения испытаний, производятся необходимые повреждения в заданных точках.

Таблица 6

Пример программы проведения испытаний

| Проверяемая функция | Условия проверки | Ожидаемый результат |
|---------------------|--|---|
| 1-я ступень МТЗ | Внутреннее КЗ <i>ABC</i> и <i>AB</i> (точка <i>K2</i>) на расстоянии, равном 70%. Замыкание отключается выключателями <i>B1</i> и <i>B4</i> . | Срабатывание 1-й прямо направленной ступени МТЗ через 0,1 с. после начала КЗ |
| 2-я ступень МТЗ | Внутреннее КЗ <i>ABC</i> и <i>AB</i> (точка <i>K2</i>) на расстоянии, равном 100%. Замыкание отключается выключателями <i>B1</i> и <i>B4</i> . | Срабатывание 1-й прямо направленной ступени МТЗ через 0,1 с. после начала КЗ |
| 3-я ступень МТЗ | Внешнее КЗ <i>ABC</i> и <i>AB</i> (точка <i>K1</i>). Замыкание отключается выключателем <i>B1</i> . | Срабатывание 3-й обратно направленной ступени МТЗ (КЗ за «спиной») через 0,6 с. |
| ЗОП | Обрыв проводника моделируется отключающим сигналом фазы выключателя с пофазным управлением <i>B5</i> . Повреждение отключается выключателями <i>B1</i> и <i>B4</i> . | Срабатывание ЗОП через 1,2 с. |

Окончание табл. 6

| | | |
|-------------------|--|--|
| 1-я ступень ТНЗНП | Внутреннее ОЗЗ АВ (точка К2). Замыкание отключается выключателями В1 и В4. | Срабатывание 1-й прямой ступени ТНЗНП через 0,1 с. после начала КЗ. |
| УРОВ | Внутреннее КЗ (точка К2). Замыкание должно отключаться выключателями В1 и В4. Из-за нарушения цепей управления выключателем В1, произвести отключение данным выключателем не представляется возможным. | УРОВ на себя через 0,1 с. УРОВ на смежный выключатель через 0,3 с. |
| 1-й цикл АПВ | Внутреннее неустойчивое (1-4 с) КЗ (точка К2). Замыкание отключается выключателями В1 и В4. | Отключение выключателя от защит. Срабатывание 1-го цикла АПВ через 5с. |
| 2-й цикл АПВ | Внутренне устойчивое (более 5 с, но менее 20 с) КЗ (точка К2). Замыкание отключается выключателями В1 и В4. | Отключение выключателя от защит. Неуспешное срабатывание 1-го цикла АПВ, срабатывание 2-го цикла АПВ через 15 с. |

Результаты испытаний фиксируются осциллографом терминала, для просмотра записанных осциллограмм используется программа *Waves*, разработанная компанией ООО НПП «Экра». Записанные осциллограммы после проверки функций МТЗ с помощью двухфазного КЗ АВ представлены на рис. 9-11.

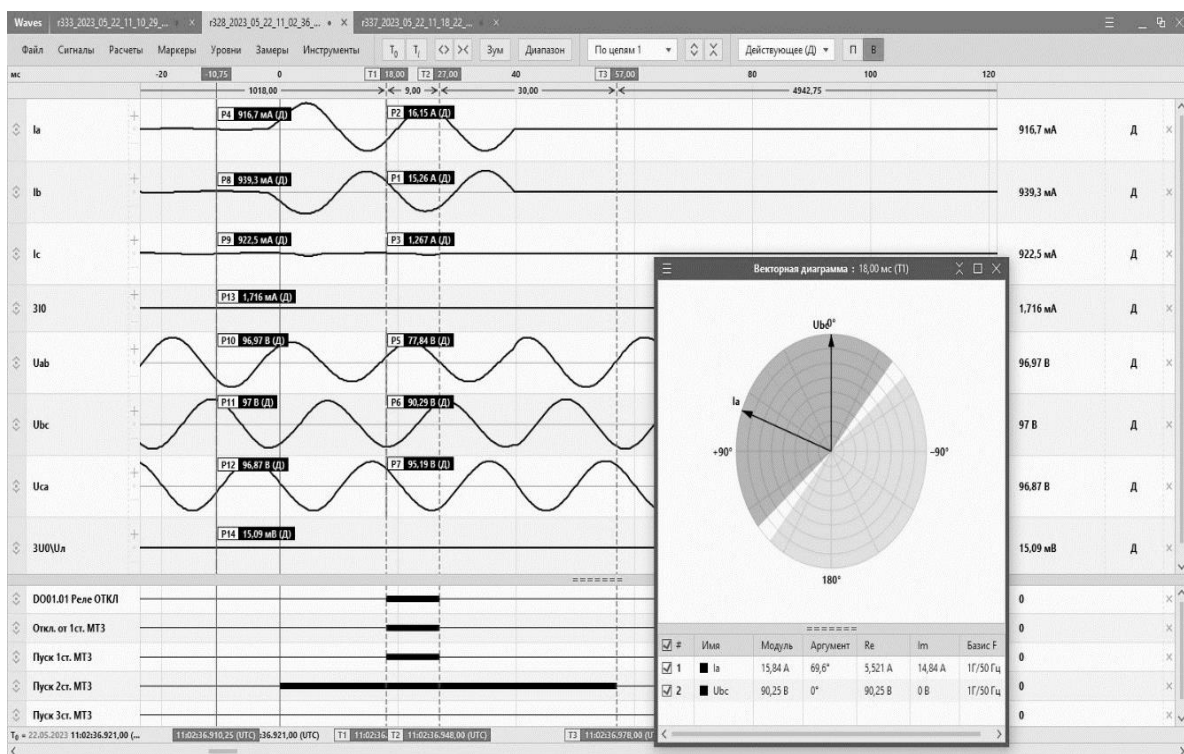


Рис. 9. Результаты проверки функции 1-ой ступени МТЗ с КЗ АВ

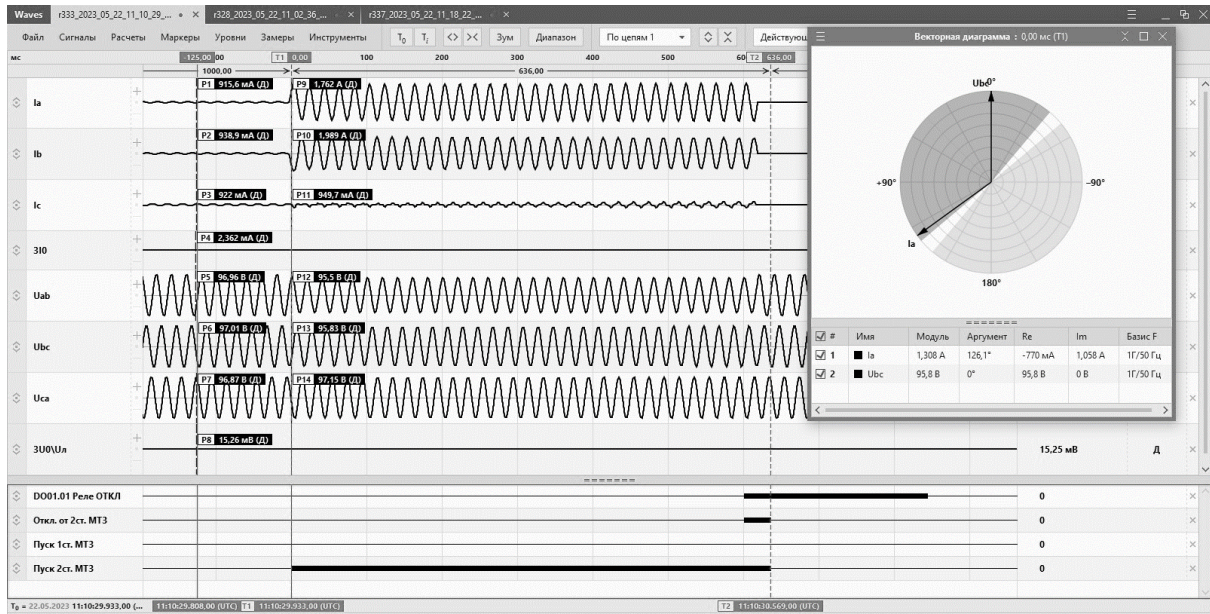


Рис. 10. Результаты проверки функции 2-ой ступени МТЗ с КЗ АВ

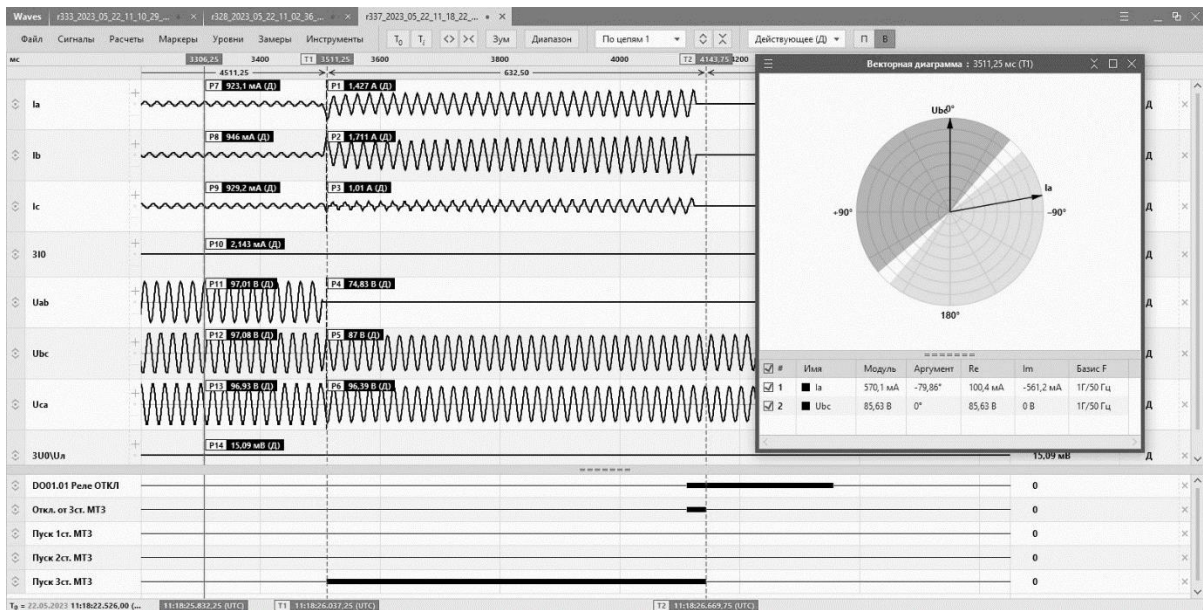


Рис. 11. Результаты проверки функции 3-ей ступени МТЗ с КЗ АВ

Анализ осциллограмм на рис. 9 – 11 показывает, что токи КЗ протекающие через место установки терминала РЗА имеют разное направление при КЗ в точках К1 и К2. Об этом свидетельствует изменение вектора тока на круговых диаграммах. Настройка параметров срабатывания в виде угла чувствительности $\Phi_{мч} = 45^\circ$ реле направления мощности (РНМ) для разных ступеней МТЗ, позволяет отключать аварийные ситуации, как при КЗ в прямом направлении, так и КЗ «за спиной», при подпитке точки К1 от синхронного генератора.

Выводы

1. Рассмотрены особенности настройки релейной защиты в сети 6-35 кВ при наличии объекта распределенной генерации, представлены методика и программа проведения функциональных испытаний, устанавливаемых в данных сетях микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики; произведено описание созданной для проверки терминалов имитационной модели.

2. Проведено апробирование описанной методики и программы проведения функциональных испытаний на примере терминала релейной защиты TOP 200. Созданная имитационная модель позволяет произвести проверку большинства основных функций релейной защиты и автоматики, необходимых в сетях 6-10 кВ и, в случае необходимости, может быть дополнена для проведения проверки других функций (добавление модели двигателя для проверки функции защиты минимального напряжения и т.п.).

3. Применение программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor* позволяет произвести проверку терминала РЗА с учетом особенностей защищаемой сети. Симулятор создает условия, наиболее приближенные к реальным условиям функционирования терминала, тем самым повышая эффективность проверки за счет наглядности протекаемых в сети процессов.

4. Развитие электрической сети 6-35 кВ с интеграцией в нее новых активных элементов (источников распределенной генерации, регуляторов напряжения и потоков мощности) требует динамического моделирования всевозможных электрофизических процессов и тестирования устройств РЗА в замкнутом цикле (*closed-loop test*) для качественной оценки их корректности работы.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Библиографический список

1. **Илюшин, П.В.** Обзор методов решения проблемных вопросов функционирования устройств защиты в microgrid напряжением до 1 кВ с распределенными источниками энергии / П.В. Илюшин, В.С. Вольный // Релейная защита и автоматизация. – 2022. – № 4 (49). – С. 6-21.
2. **Илюшин, П.В.,** Куликов, А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография. – Н.Новгород, РАНХиГС. 2019. – 364 с.
3. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. – Введ. 28.02.2017. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. – 223 с.
4. **Шамис, М.А.** Novacor – новая аппаратная платформа симуляторов RTDS / М.А. Шамис, Ф. А. Иванов // Энергоэксперт. – 2017. – № 4. – С. 16-17.
5. **Шамис, М.А.** Использование современных симуляторов энергосистем для изучения электротехники и энергетики // ЭнергоStyle. – 2017. – № 3 (39) – С. 34-35.
6. Программно-аппаратный комплекс симулятор RTDS на платформе NovaCor. Техническое описание / EnLAB. 2017. – С. 3-13.
7. RSCAD FX. Инструкция по началу работы / EnLAB. 2021. – 33 с.
8. **Thomas, M.,** Prakash A. Modeling and Testing of Protection Relay IED / Conference: Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on. DOI: 10.1109/ICPST.2008.4745389

9. **Yi, Mi.** Closed-loop Testing of Distance Relay Based on IEC 61850 and RTDS / Mastes thesis. Electrical Engineering at the Delft University of Technology, to be defended publicly on December 16, 2021
10. **Yang, Z.**, Wang Y., Xing L., Yin B, Tao J. Relay Protection Simulation and Testing of Online Setting Value Modification Based on RTDS / IEEE Access. Vol. 8, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963228
11. **Rodriguez D.**, P´erez Osorio J.D., Ramos G. Virtual Relay Design for Feeder Protection Testing With Online Simulation / IEEE Transactions on industry applications, Vol. 54, 1. DOI: 10.1109/TIA.2017.2741918
12. **Vandiver, B. III.** Why Testing Digital Relays Are Becoming So Difficult! Part 3 Advanced Feeder Protection / 2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). DOI: 10.1109/CPRE.2016.7914926
13. Stamford-AvK HV 804 T WDG 61 - Technical Data Sheet
14. Устройство защиты и автоматики линии 6-35 кВ «ТОР 200 Л ХХ». Рекомендации по расчету уставок АИПБ.656122.025-007 РРУ v21.1
15. **Куликов, А.Л.** Проведение функциональных испытаний устройств защиты и автоматики присоединений 6-35 кВ с применением программно-аппаратного комплекса RTDS NOVACOR. Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» / А.Л. Куликов, А. А.Лоскутов, И.А. Петров. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2023. – 139 с.

A.A. Loskutov, A.L. Kulikov, I.A. Petrov, N.M. Shmeleva, A.A. Krinkin

FUNCTIONAL TESTS OF THE MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION TERMINAL TOR 200 IN THE POWER SUPPLY SYSTEM WITH A DISTRIBUTED GENERATION FACILITY

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the issues of quality control of new microprocessor relay protection and automation devices in 6-35 kV networks with a distributed generation facility in accordance with the requirements and norms presented in SRT 56947007-29.120.70.241-2017 "Technical requirements for microprocessor devices RZA". The TOR 200 relay protection terminal is being tested using the RTDS NovaCor hardware and software complex. A program for carrying out functional tests of RZA terminals with the function of directional current protection has been developed.

Key words: microprocessor relay protection and automation devices (RPA), tests, technical requirements, hardware and software complex RTDS NovaCor, maximum current directional protection, distributed small generation.

References

- [1] P.V. Ilyushin, V.S. Volny "Obzor metodov resheniya problemnykh voprosov funktsionirovaniya ustroystv zashity v microgrid napryazheniyem do 1 kV s raspredelennymi istochnikami energii [Review of methods for solving problematic issues of the functioning of protection devices in microgrid with voltage up to 1 kV with distributed energy sources]", "Releynaya zashita i avtomotizatsiya [Relay protection and automation]", no. 4 (49), pp. 6-21, 2022 (in Russian)
- [2] P.V. Ilyushin, A.L. Kulikov "Avtomatika upravleniya normalnymi i avariynymi ryezhimami energorayonov s raspredelennoy generatsiyey: monografiya [Automation of control of normal and emergency modes of power districts with distributed generation: monograph]"—Nizhny Novgorod: RANEPА Research Institute, pp. 364, 2019 (in Russian)
- [3] Technical requirements for microprocessor relay protection devices. Introduced Feb 28, 2017. Moscow: PAO «FSK EES» STO 56947007-29.120.70.241-2017., pp. 223, 2017 (in Russian)
- [4] M.A. Shamis, F.A. Ivanov "Novacor – novaya apparatnaya platforma simulyatorov RTDS [Novacor - new hardware platform for RTDS simulators]", *Energoekspert*, pp. 16-17, 2017 (in Russian)
- [5] M.A. Shamis "Ispolzovanie sovremennykh simulyatorov energosistem dlya izucheniya elektrotekhniki i energetiki [Using modern power system simulators to study electrical engineering and energy]", *EnergoStyle*, pp. 34-35, 2017 (in Russian)
- [6] "Programmno-apparatny kompleks simulyator RTDS na platforme NovaCor [Hardware-software complex RTDS simulator on the NovaCor platform]". EnLAB, pp. 3- 13, 2017 (in Russian)
- [7] "RSCAD FX. Instrukciya po nachalu raboty [RSCAD FX. Getting Started Guide]". EnLAB, pp. 33, 2017 (in Russian)
- [8] M. Thomas, A. Prakash Modeling and Testing of Protection Relay IED / Conference: Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on. DOI: 10.1109/ICPST.2008.4745389
- [9] Yi Mi Closed-loop Testing of Distance Relay Based on IEC 61850 and RTDS / Mastes thesis. Electrical Engineering at the Delft University of Technology, to be defended publicly on December 16, 2021

- [10] Z. Yang, Y. Wang, L. Xing, B. Yin, J. Tao Relay Protection Simulation and Testing of Online Setting Value Modification Based on RTDS / IEEE Access. Vol. 8, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963228
- [11] D. Rodriguez, J.D. P'erez Osorio, G. Ramos Virtual Relay Design for Feeder Protection Testing With Online Simulation / IEEE Transactions on industry applications, Vol. 54, 1. DOI: 10.1109/TIA.2017.2741918
- [12] B. Vandiver III Why Testing Digital Relays Are Becoming So Difficult! Part 3 Advanced Feeder Protection / 2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). DOI: 10.1109/CPRE.2016.7914926
- [13] Stamford-AvK HV 804 T WDG 61 - Technical Data Sheet
- [14] “Ustroystvo zashity i avtomatiki linii 6-35 kV « TOR 200 L XX ». Rekomendatsii po raschyotu ustavok [The device of protection and automation of the 6-35 kV line «TOR 200 L XX». Recommendations for the calculation of setpoints]” AIPB.656122.025-007 RU v21.1
- [15] Kulikov A.L., Provedenie funkcionalnysh ispitany ustroystv zashity I avtomatiki prisoedineni 6-35 kV s primeneniem programno-apparatnogo complexa RTDS-NOVACOR / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, I.A. Petrov // Uchebnoe posobie dlya studentov, obuchaushihsy po napravleniu podgotovki 13.04.02 “electroenergetika I electrotehnika” / Nizhniy Novgorod, 2023.

Б.В. Папков, М.С. Симачкова, М.А. Стрелкова

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Аннотация. В современных электроэнергетических системах (ЭЭС) и системах электроснабжения (СЭС) усложняется структура, увеличиваются скорости протекания переходных процессов, внедряются цифровая релейная защита и противоаварийная автоматика, возрастают нагрузки на оперативный персонал. Оценка надежности ЭЭС (СЭС) становится неполной без оценки надежности оперативного персонала. В работе представлены результаты анализа типов и вероятностей ряда ошибок и поведения оператора в нормальных и экстремальных условиях, что позволяет снизить вероятность ошибочных решений.

Ключевые слова: надежность, оперативный персонал, управление, электроэнергетические системы, человек-оператор, эффективность.

Введение. Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) и систем электроснабжения (СЭС) – сложные структуры, включающие распределенную генерацию, возобновляемые источники энергии, системы накопления электроэнергии. При увеличении скорости протекания нормальных и аварийных переходных процессов, внедрении цифровой релейной защиты и автоматики возрастают нагрузки на системы оперативного управления ЭЭС(СЭС) и оперативный персонал, который должен учитывать все недостатки и ненадежность оборудования с целью обеспечения его работоспособности [1]. Оперативное управление – функция оперативного персонала, цель которой – анализ и максимальное устранение возможных ошибок.

Особенности оперативного управления. Оперативное управление обеспечивает функциональную и технологическую устойчивость ЭЭС (СЭС) в условиях внутренних и внешних возмущений, оптимизацию режимов с нормируемой (необходимой) реакцией на возмущение. В современных ЭЭС (СЭС) вопросы оперативного управления в целях оптимизации режимов и обеспечения всех видов устойчивости приобретают особую актуальность [2]. Оперативность здесь – свойство системы управления способствовать завершению цикла управления в требуемые сроки. В зависимости от характера целей и задач тип управления, осуществляемый оперативным персоналом, определяется как управление ситуационное (конкретные цели и задачи, критерии, показатели); программное; адаптивное. Подготовка и принятие управленческих решений происходит в соответствии со следующей последовательностью [3]: фиксация проблемы по признакам; сбор и обработка информации, выявление причин и следствий; анализ ситуации; преобразование проблемы в задачу; выработка вариантов решения с оценкой критериев эффективности; принятие решения при возможном дефиците времени, информации, ресурсов; организация совместной деятельности

операторов с разным профилем работы и уровнем подготовки; оформление документации; контроль исполнения.

Задачи и функции. Оперативное управление направлено на достижение цели управления при соответствующем контроле и основано на процессах реализации функций управления, характеризующихся рядом особенностей [3]: предназначено и ориентировано как на тактические, так и на стратегические цели; осуществляется непрерывно во времени и необходимом пространстве; имеет место в момент акта управления и в последующем времени. Важность оперативного управления проявляется в условиях стратегических неожиданностей (проблема возникает внезапно) [4]; появляются задачи, не соответствующие прошлому опыту; недостаточна квалификация и опыт субъекта управления; принятие срочных контрмер по устранению критических ситуаций затруднено (невозможно) из-за недостатка (отсутствия) оперативных резервов.

Оперативно-технологическое управление обеспечивается: должностными инструкциями; требованиями, регламентами, правилами ведения работ; объемом знаний специалиста для конкретной должности. Оно связано с экономикой и бизнес-процессами планирования, учета, контроля.

Анализ ошибочных действий оператора. «Надежный» оператор – оператор, пунктуально исполняющий предписанный алгоритм деятельности, но и он не застрахован от совершения двух типов ошибок [5]. 1) случайной «механической» ошибки при единичном непреднамеренном воздействии на управляющие органы, заключающемся в единичном пропуске правильного действия или единичном непреднамеренном неправильном действии; 2) логической ошибки – неправильного непреднамеренного выполнения (невыполнения) ряда последовательных действий из-за неверной оценки состояния (режима) ЭЭС (СЭС), влекущей последовательность дальнейших неправильных действий. По данным [6] ошибки оперативного персонала на энергообъектах в среднем распределяются в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

| Ошибочные действия оперативного персонала на энергообъектах | |
|--|-----|
| Ситуация | % |
| Периодические проверки и профилактическое обслуживание | 36% |
| Нормальные режимы функционирования | 32% |
| Пуск и останов | 19% |
| Поиск и устранение неисправностей | 6% |
| Быстрое реагирование на уже возникший инцидент | 3% |
| Другое | 4% |

Эти ошибки делятся на четыре категории [7]: нечаянные, при исполнении правильного намерения; ошибки привычки (намерение было сделать именно это действие, но не для этой цели); ошибки неправильного понимания; ошибки сознательного нарушения (оператор, не обращая внимания на инструкцию, считает, что есть лучший путь достижения результата).

Однако при подготовке и принятии оператором решений существует по крайней мере четыре источника ошибок: 1) сам оператор; 2) наблюдаемый (управляемый) объект или событие; 3) «инструмент» (контрольно-измерительные системы); 4) окружение – внешняя среда. Эти источники порождают три вида ошибок: а) неточное наблюдение, измерение, восприятие информации; б) пропуск какого-либо обстоятельства; в) обнаружение, того, чего нет.

Поведение оператора определяют: входной сигнал S (изменение внешних условий), внутренняя реакция O (восприятие и обработка сигнала S), отклик на выходе R (реакция на входной сигнал: $S \rightarrow O \rightarrow R$). Надежность оперативного персонала в условиях эксплуатации ЭЭС (СЭС) определяется возможностью ошибок, среди которых: изменение внешних условий, не воспринимающееся как сигнал S ; невозможность отличия S_i и S_j ($i \neq j$); сигнал S воспринимается, но понят неправильно; сигнал S воспринимается, понят правильно, но правильный отклик R неизвестен; отклик R на S известен, но за пределами физических возможностей оператора; правильный отклик R в пределах возможностей оператора, но действие выполняется неправильно или в не требуемой последовательности; неудовлетворительная подготовка для выполнения поставленных задач; неудовлетворительные инструкции; непонимание последствий конкретных действий; плохие условия работы. Необходимо отметить, что не все ошибки, совершенные оператором равноценны и влияют на эффективность функционирования объектов энергетики. Однако они могут оказать существенное влияние на выполнение поставленной задачи (рис. 1).

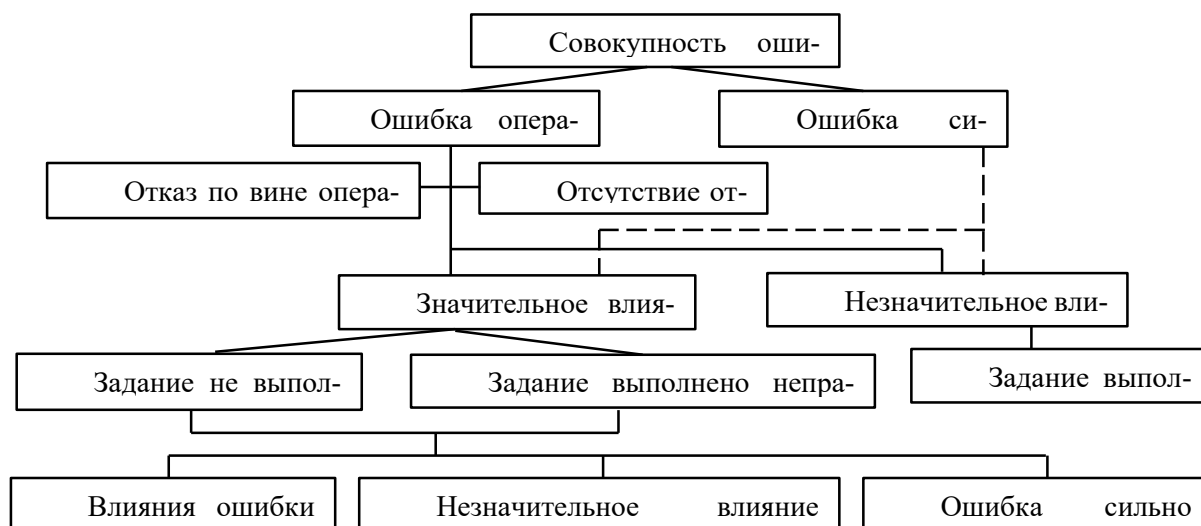


Рис. 1. Тип ошибки и ее влияние

В [8] отмечается, что частота ошибок оператора увеличивается в экстремальных условиях (работа на пределе возможностей) и взаимодействии группы операторов единого технологического процесса. Поскольку на работу оператора влияет множество случайных факторов, вероятность реакции на сигнал S изменится в пределах: от 0,0001 до 0,9999 (табл. 2) [8, 9].

Например, при «ручном» пуске электродвигателя средней мощности (технологически готов к пуску), надежность успешного запуска определяется по усредненным показателям безотказности действия оператора (табл. 3).

В соответствии с теорией надежности, это система с последовательно соединенными элементами и ее надежность определяется как

$$R = 0,9999 \cdot 0,9998 \cdot 0,9990 \cdot 9997 = 0,9984.$$

Очевидно, что даже для простейшей системы результат ненадежных действий оператора проявляется уже в третьем знаке.

Таблица 2

Оценки вероятностей ошибок оператора

| Характер ошибки | Вероятность ошибки |
|--|--------------------|
| Выбор переключателя, отличающегося по форме или расположению, без учета ошибки в принятии решения | 0,001 |
| Неправильное подсоединение элементов | 0,001 |
| Ошибка при выполнении операции типа «неправильный выбор переключателя из-за ошибки при считывании обозначений» | 0,003 |
| Кнопки миниатюрные, диаметром до 12 мм | 0,0005 |
| Число элементов, сигнализирующих о событии: | |
| 1 или 2 | 0,0002 |
| 3 или 4 | 0,0025 |
| 5 или 7 | 0,0048 |
| Ошибка пропуска операции при отсутствии сигнализации на пульте о ее выполнении (невозвращение переключателя в рабочее положение после технического обслуживания) | 0,01 |
| Арифметические ошибки при выполнении вычислений | 0,03 |

Таблица 3

Показатели вероятности успешного пуска электродвигателя

| Сообщение, действие | Вероятность |
|--|-------------|
| Двигатель готов к пуску (горит зеленая лампочка) | 0,9999 |
| Оператор воспринимает сигнал готовности | 0,9998 |
| Оператор принимает решение о пуске | 0,9990 |
| Оператор нажимает кнопку «Пуск» | 0,9997 |

Естественно, что, оператор должен получить подтверждение (сигнал) о последствиях своих действий. При этом канал обратной связи представляет произошедшие изменения в структуре и параметрах ЭЭС (СЭС). Тогда у оператора появляется дополнительная информация E для принятия решения о продолжении или прекращении отклика R на сигнал S .

Роль личности оператора в управлении. Безошибочность действий оператора определяется вероятностью P_{0i} его устойчивой работоспособности при каждой операции i -го вида и интенсивности λ_i допущенных ошибочных действий на интервале заданного рабочего цикла T_i :

$$P_{0i} = (N_i - C_i) / N_i,$$

где N_i – общее число выполняемых операций i -го вида; C_i – количество допущенных при этом ошибок.

Поскольку надежность оператора меняется с течением времени, среднее значение безошибочной работы определяется условной вероятностью

$$P_0 = \sum_{i=1}^n p_i | P_{0i},$$

где p_i – вероятность состояния ЭЭС (СЭС), требующая выполнения i -й операции при условии безошибочных действий P_{0i} .

Способ действия C_i ($1 \leq i \leq m$) оператора A – различные типы целеустремленного поведения в определенном окружении. Целеустремленность оператора A характеризуется: особенностями оператора A , выбирающего способ действия C_i ; доступными ему способами действий C_i ; окружением выбора действия C_i (режимы, показатели, параметры, характеристики) при S ; возможными результатами O_i . Связь между ними выражается: вероятностью P_i того, что оператор A выберет способ действия C_i при условиях S : $P_i = P(C_i|A, S)$; эффективностью способа действий E_{ij} – вероятностью того, что некоторый способ C_i действия оператора A будет соответствовать определенному результату O_j при условиях (ситуации) S : $E_{ij} = P(O_j|A, C_i, S)$; ценностью (полезностью) V_j результата O_j для оператора A – вероятностью того, что A выберет способ действий C_i , имеющий максимальную эффективность по результату O_j .

Отметим некоторые особенности этих связей [10].

1. Вероятность P_i относится к конкретному оператору, параметры которого со временем изменяются (дополнительное обучение, увеличение стажа).

2. Эффективности, измеряемой затратами получения определенного результата (результату при определенных затратах), соответствует вероятность, относящаяся к периоду Δt , оператору A и ситуации S .

3. Если ценности v_j , различных результатов положительны, то вероятность ценности каждого результата $V_j = v_j / \sum v_j$; $\sum V_j = 1$.

Вклад конкретного оператора в ситуацию выбора проявляется в воздействии, оказываемом им на результат [5]. Вероятность реализации конкретного результата O_j в конкретной ситуации определяется выражением

$$P(O_j) = \sum_i P_i E_{ij},$$

где P_i – вероятность выбора способа действий; E_{ij} – вероятность того, что этот способ действий даст результат O_j .

Если $P_1 = 0,6$; $P_2 = 0,4$; $E_{11} = 0,7$; $E_{12} = 0,3$; $E_{21} = 0,1$; $E_{22} = 0,9$, то:

$$P(O_1) = P_1 E_{11} + P_2 E_{21} = 0,6 \cdot 0,7 + 0,4 \cdot 0,1 = 0,46,$$

$$P(O_2) = P_1 E_{12} + P_2 E_{22} = 0,6 \cdot 0,3 + 0,4 \cdot 0,9 = 0,54,$$

$$\sum_2 P(O_i) = 1.$$

Вероятности P_i выбора и эффективности выборов E_{ij} зависят от свойств ситуации: возможных действий C_i и возможных результатов окружения O_i . Тогда вероятность результата $P(O_1)$ – функция ситуации выбора

$$P(O_j) = f[\{C_i\}, \{O_j\}, \{S_k\}].$$

Роль оператора A в ситуации S_k заключается в преобразовании свойств этой ситуации в вероятности: выбора определенного действия P_i ; эффективности его действия E_{ij} ; полезности (ценности) V_j результата O_j .

Если два оператора находятся в одинаковых условиях(ситуации) выбора действия, разница между ними – значения вероятностей: выбора P_i ; эффективности действий E_{ij} ; ценности (полезности) V_j полученных результатов O_j . В этом состоит «индивидуальность» оператора. При этом его ожидаемая ценность определяется суммой произведений трех параметров $EV = \sum_i \sum_j P_i E_{ij} V_j$.

Выводы

Высокая аварийность на энергетических объектах, большой технико-экономический ущерб, возрастающая цена ошибок оператора определяют необходимость поиска путей и средств обеспечения эффективного функционирования человека в ЭЭС (СЭС) в нормальных и экстремальных условиях. В ЭЭС (СЭС) существует высокая вероятность совершения ошибки при принятии разного рода управленческих решений. Эффективность, надежность и безопасность ЭЭС (СЭС) во многом зависят от условий эксплуатации энергетического оборудования. Раннее обнаружение отклонений в его работе для последующего принятия решения обеспечивается системой оперативного управления, включающей человека-оператора, роль которого пока остается определяющей. Поскольку цена отказа (ошибки) оператора достаточно высока, исследование формальных моделей его деятельности способствует повышению эффективности распознавания ситуаций в нормальных и аварийных режимах ЭЭС (СЭС) и принятию рациональных решений в конкретных системах управления.

Библиографический список

1. **Дьяков, А.Ф.** Надежная работа персонала в энергетике. – М.: Издательство МЭИ, 1991. – 224 с.
2. **Папков, Б.В.** Особенности управления объектами современной электроэнергетической системы / Б.В. Папков, В.Л. Осокин, Д.Е. Дулепов, С.В. Осокин // Вестник НГИЭИ. – 2021. – № 7 (122). – С. 26–37.
3. Экономика и управление в современной электроэнергетике России. – М.: НП «КОНЦ ЕЭС». 2009. – 616 с.
4. **Папков, Б.В.** Вероятности редких случайных событий в электроэнергетике / Б.В. Папков, А.Л. Куликов, В.Л. Осокин // Электричество. – 2019. – № 2, 2019. – С. 4–9.
5. **Симачкова, М.С.** Особенности оперативного управления в системах электроэнергетики / М.С. Симачкова, Б.В. Папков // Агротехника и энергообеспечение. – 2022. – № 4 (37). – С. 61–70.
6. **Острейковский, В.А.** Теория надежности. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
7. Культура безопасности на ядерных объектах Украины Киев: НТУУ КПИ, 2009. – 386 с.
8. Справочник по надежности. Т. 3. Под ред. Б.Е. Бердичевского. – М.: Мир. – 1970. – 376 с.
9. **Бахметьев, А.М.,** Самойлов, О.Б., Усынин, Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 136 с.
10. Акофф Р.Л., Эмери Ф.Э. О целеустремленных системах. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 272 с.

B.V. Papkov, M.S. Simachkova, M.A. Strelkova

FEATURES OF ASSESSING THE RELIABILITY OF THE OPERATIONAL PERSONNEL IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics

Abstract. In modern electric power systems (EPS) and power supply systems (PSS), the structure is becoming more complicated, the speed of transient processes is increasing, digital relay protection and emergency automation are being introduced, and the burden on operational personnel is increasing. The paper presents the results of the analysis of the types and probabilities of a number of errors and the behavior of the operator in normal and extreme conditions, which makes it possible to reduce the probability of erroneous decisions.

Key words: reliability, operating personnel, management, electric power systems, man-operator, efficiency

References

1. A.F. Dyakov Reliable work of personnel in the energy sector. - M.: MPEI Publishing House, 1991. – 224 p.
2. B. V. Papkov, V. L. Osokin, D. E. Dulepov, S. V. Osokin. Features of managing objects of the modern electric power system // Bulletin of NGIEI. 2021. No. 7 (122). pp. 26–37.
3. Economics and management in the modern electric power industry in Russia. M.: NP "KONTs UES". 2009. – 616 p.
4. B.V. Papkov, A.L. Kulikov, V.L. Osokin Probabilities of rare random events in the electric power industry // Electricity No. 2, 2019. P. 4–9.
5. M.S. Simachkova, B.V. Papkov. Peculiarities of operational management in electric power systems // Agrotechnics and energy supply. 2022. No. 4 (37). pp. 61–70.
6. V.A. Ostreikovskiy Theory of reliability. M.: Higher. school, 2003. – 463 p.
7. Safety culture at nuclear facilities in Ukraine Kyiv: NTUU KPI, 2009. – 386 p.
8. Handbook of reliability. T. 3. Ed. B.E. Berdichevsky. M.: Mir. – 1970. – 376 p.
9. A.M. Bakhmetiev, O.B. Samoilov, G.B. Usynin Methods for assessing and ensuring the safety of nuclear power plants. Moscow: Energoatomizdat. – 1988. – 136 p.
10. R.L. Akoff, F.E. Emery. About purposeful systems. M.: Publishing house LKI, 2008. – 272 p.

А.Р. Петров, Е.И. Грачева

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АППАРАТОВ

Казанский Государственный Энергетический Университет

Аннотация. В статье разработаны алгоритм и модели оценки эффективности эксплуатации рубильников внутризаводского электроснабжения, которые позволяют уточнять величину потерь активной мощности и электроэнергии в электрооборудовании.

Ключевые слова: низковольтные коммутационные аппараты, потери мощности, контактные соединения, аппроксимирующие функции, сопротивление контактов.

В работе представлен расчет сопротивления контактного соединения рубильников внутрицехового электроснабжения, позволяющий учитывать техническое состояние и уточнять величину энергии, выделившуюся в коммутационном аппарате в режиме эксплуатации электрической сети.

В паспортных данных коммутационных аппаратов указываются не все технические характеристики, не приводятся сопротивления большей части элементов низковольтных аппаратов [1].

Определим сопротивление контактов по выражению:

$$R = \frac{\Delta P}{I_n^2} \quad (1)$$

где ΔP – потери активной мощности на полюс аппарата, Вт, I_n – номинальный ток аппарата, А.

Сопротивление контактных соединений в зависимости от номинального тока и коэффициента загрузки [2]:

$$R_{\text{расч}} = \frac{2\sqrt{\lambda \cdot F \cdot k_m \cdot S}}{I^2} \cdot \left(\theta_k - \frac{I^2 \cdot \rho \cdot (1 + \alpha \cdot v_k)}{F \cdot k_m \cdot S} \right), \quad (2)$$

где λ – теплопроводность материала контакта; F – охлаждающая поверхность единицы длины проводника, м²; k_T – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поперечного сечения контактов, м²; I – ток через контакты, А; v_k – температура контактных площадок, °С; θ_k – допустимый перепад температуры контакта относительно температуры окружающей среды; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; α – температурный коэффициент сопротивления.

Для исследования были отобраны рубильники цеховых сетей на напряжение до 1 кВ различных заводов-изготовителей. На рис. 1 представлены графические зависимости потерь активной мощности ΔP . Для дальнейшего анализа рассмотрим аппараты производства «Курский электроаппаратный завод».

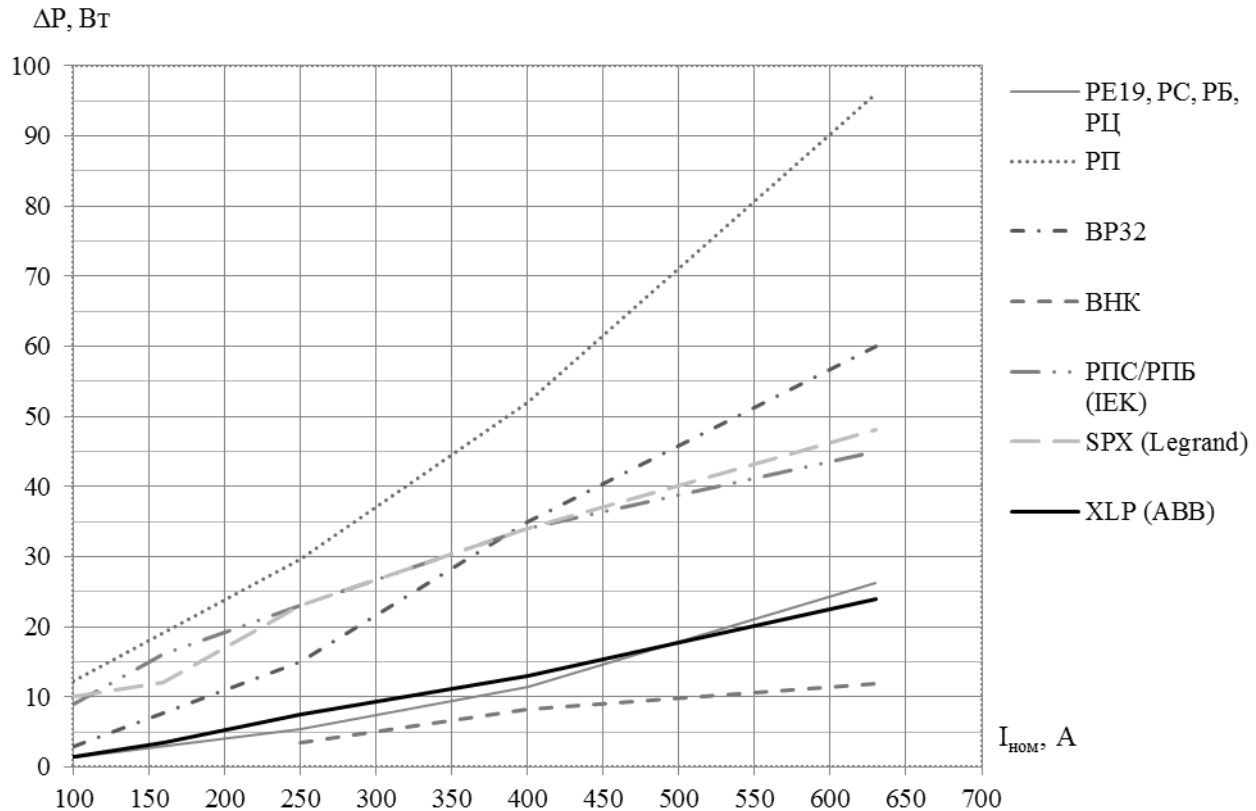


Рис. 1. Графические зависимости потерь активной мощности от номинального тока рубильников различных заводов-изготовителей

Аппроксимируем паспортные значения потерь мощности для рубильника РП [3]:

$$\Delta P_{\text{пот}} = 11,2 \cdot 10^{-5} \cdot I_n^2 + 0,076 \cdot I_n + 3,554 \quad (3)$$

Определим экспериментальным методом зависимости сопротивлений контактных соединений рубильника от номинального тока [4, 5].

Аналитическая зависимость сопротивления контактных соединений для рубильников имеет вид:

$$R = \frac{70}{I_n}. \quad (4)$$

Используя полученные данные, построим график зависимости сопротивления контактных соединений от номинального тока для рубильника серии РП (рис. 2).

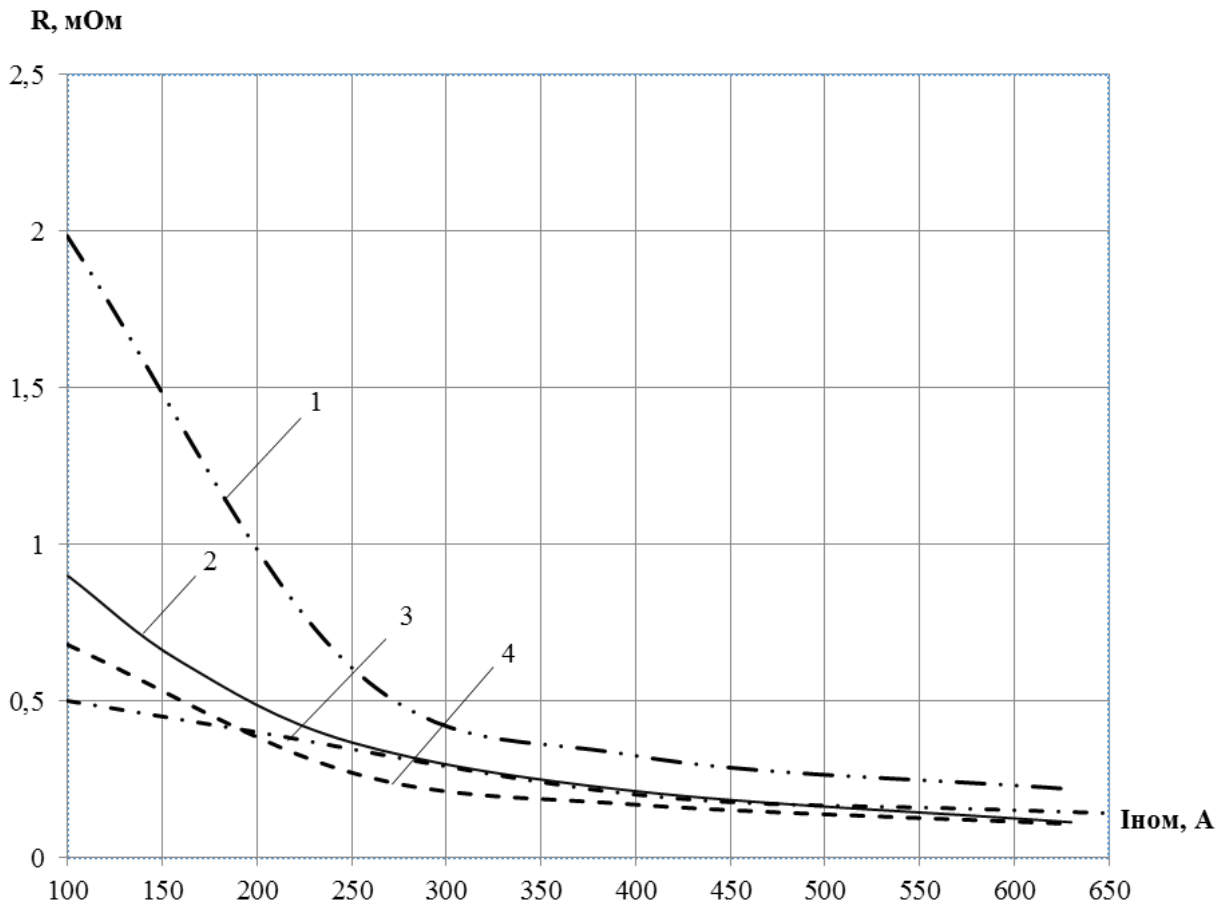


Рис. 2. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока

На рисунке 2 линии: 1 – расчетные значения $R_{расч}$; 2 – данные по потерям мощности $R_{пот}$; 3 – справочные данные $R_{спр}$; 4 – экспериментальные данные $R_{экс}$.
 Результаты аппроксимирующих функций, исследуемых рубильников представлены в табл. 1.

Таблица 1
Аппроксимирующие функции сопротивления контактных соединений

| Тип аппарата | Номинальный ток, А | Аппроксимирующая функция |
|--------------|--------------------|---|
| Рубильник | 100 ÷ 630 | $R_{пот,р} = 71,63 \cdot I_n^{-0,894}$ $R_{расч,р} = 521,9 \cdot I_n^{-1,218}$ |
| | 100 ÷ 1600 | $R_{спр,р} = 0,5547 \cdot e^{-0,002 \cdot I_n}$ |

Анализ параметров рубильников низковольтных сетей и результаты проведенных экспериментов предлагают в качестве одного из критериев эффективности исследуемых аппаратов использовать значение потерь активной мощности ΔP и сопротивлений в контактных соединениях.

Большинство рубильников предназначены для работы при длительном замкнутом состоянии контактных соединений, поэтому необходимо, чтобы аппараты функционировали со стабильным значением переходного сопротивления контактных групп.

Исследование показывает, что учет потерь мощности и сопротивления в контактных соединениях аппаратов внутризаводского электроснабжения позволяют в дальнейшем наиболее точно определять потери электроэнергии в этих сетях. Полученные зависимости позволяют выявить наиболее эффективные в эксплуатации типы рубильников низковольтных сетей.

Библиографический список

1. **Грачева Е.И.** Алгоритмы и модели потерь мощности в автоматических выключателях, устанавливаемых в цеховых сетях / Е.И. Грачева, А.И. Горлов, А.И. Алимova // Вестник МГТУ. – 2020. – Т. 23. – № 4. – С. 345-353.
2. **Грачева, Е.И.** Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения / Е.И. Грачева, А.И. Горлов, А.И. Алимova и др. // Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 350–360.
3. **Andrusca M., Adam M., Burlica R., Munteanu A., Dragomir A.** Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2016, pp. 123-128.
4. **Deac, C.N., Adam, M., Andrusca, M., Dragomir, A.** Aspects Regarding Contact Resistance Measurement // 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019, pp. 1-6.
5. **Егоров, Е.Г.** Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока / Е.Г. Егоров, Г.Е. Егоров, Н.Ю. Луия // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С.78-86.

A.R. Petrov, E.I. Gracheva

CALCULATED-EXPERIMENTAL STUDY OF CONTACT CONNECTION RESISTANCES OF LOW-VOLTAGE APPARATUSES

Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia

Abstract. The paper develops an algorithm and models for assessing the efficiency of operation of in-plant power switchgears, which allow specifying the value of active power and electric power losses in electrical equipment.

Key words: low-voltage switching devices, power losses, contact connections, approximating functions, contact resistance.

References

- [1] E. I. Gracheva, A. N. Gorlov, A. N. Alimova “Algoritmy i modeli poter’ moshchnosti v avtomaticheskikh vyklyuchatelyakh, ustanavlivayemykh v tsekhovykh setyakh [Algorithms and models of power losses in circuit breakers installed in networks]”, *Vestnik MGTU [Vestnik of MSTU]*. 2020. Vol. 23, no. 4. P. 345–353. (In Russian).
- [2] E. I. Gracheva, A. N. Gorlov, A. N. Alimova et al. “Opredeleniye zakonov izmeneniya soprotivleniya kontaknykh grupp elektricheskikh apparatov nizkogo napryazheniya [Resistance change of contact groups of low-voltage electrical apparatus: Determining the laws]”, *Vestnik MGTU [Vestnik of MSTU]*. 2021. Vol. 24, no. 4. P. 350–360. (In Russian).
- [3] M. Andrusca, M. Adam, R. Burlica, A. Munteanu, A. Dragomir Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2016, pp. 123-128.
- [4] C. N. Deac, M. Adam, M. Andrusca, A. Dragomir Aspects Regarding Contact Resistance Measurement. 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019, pp. 1-6.
- [5] E. G. Egorov, G. E. Egorov, N. Yu. Luiya “Osobennosti izmereniya vosstanavlivayushchey elektricheskoy prochnosti v nizkovol’nykh kontaktorakh peremennogo toka [Features of measurement of recoverable electrical strength in low-voltage ac contactors]”, *Vestnik Chuvashskogo universiteta [Bulletin of the Chuvash University]*. 2019. No. 3. P. 78–86. (In Russian).

Р.М. Петрова, Е.И. Грачева

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Казанский Государственный Энергетический Университет

Аннотация. В статье исследованы основные законы распределения: нормальный, экспоненциальный (показательный), распределение Вейбулла, позволяющие моделировать надежность систем внутризаводского электроснабжения.

Ключевые слова: закон распределения, надежность, низковольтное электрооборудование; нормальный закон распределения; вероятность безотказной работы; вероятность появления отказа, интенсивность отказа.

Актуальность данного исследования заключается в совершенствовании и методов определения параметров надежности низковольтного электрооборудования систем электроснабжения по статистическим эксплуатационным данным [1].

В своих проведенных исследованиях Р.М. Петрова, Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева и др. [1] определили законы изменения вероятностных характеристик надежности низковольтного электрооборудования – силовых трансформаторов, автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов на основании статистических данных эксплуатации.

Исследование [2] посвящено анализу и прогнозированию надежности электрооборудования низковольтных сетей на основе использования сравнения статистических и теоретических значений функции распределения вероятностей безотказной работы и появления отказа. Прогнозирование надежности может быть произведено только на основе вероятностного подхода. При этом необходимо выбрать закон распределения для расчета отказов систем электроснабжения, являющиеся случайными величинами, наиболее близко совпадающий с эмпирической функцией распределения.

В работах [3-4] исследуется надежность и перегрузочная способность силовых трансформаторов на примере цеховых трансформаторов марки ТМ-1600/10/0,4 кВ.

В статье Федотова А.И., Грачевой Е.И., Наумова О.В. [5] представлены основные методы исследования надежности низковольтных электрических аппаратов и приведены результаты анализа характеристик, определяющих их работоспособность.

Выбор закона распределения для расчета вероятности безотказной работы встречает определенные трудности, связанные с тем, что истинный характер распределения отказов низковольтного электрооборудования различный. Кроме того, по мере эксплуатации одного и другого электрооборудования на разных

производственных предприятиях могут быть расхождения в данных по отказам из-за климатических условий и нагрузки на оборудование. С данной целью необходимо выбрать оптимальный закон распределения. Для этого изучим основные законы распределения, а именно нормальный, экспоненциальный (показательный) законы и распределение Вейбулла, используемые в теории надежности и определим оптимальный из них в сравнении с эмпирическими значениями функции.

Эмпирическая функция вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P * (t_i) = \frac{N_0 - n_i(t)}{N_0}, \quad (1)$$

где $n_i(t)$ – суммарное число отказавших элементов, шт.; N_0 – количество рассматриваемых элементов, шт.

Эмпирическая функция вероятности появления отказа записывается в виде:

$$Q * (t_i) = \frac{n_i(t)}{N_0}, \quad (2)$$

$$Q * (t_i) = 1 - P * (t_i). \quad (3)$$

При нормальном законе распределения (также называется распределение Гаусса) теоретическая функция вероятности безотказной работы имеет вид: [2-3]

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{сред}} - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{сред}}}{\sigma}\right)}, \quad (4)$$

$$Q(t) = 1 - P(t), \quad (5)$$

где t – время наблюдения, год; $T_{\text{сред}}$ – средняя наработка на отказ, год; σ – среднеквадратическое отклонение наработки на отказ, год; F – функция Лапласа.

При расчетах экспоненциальным (показательным) законом распределения функция вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (6)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (7)$$

где λ – интенсивность отказов, $\lambda = \text{const}$.

Распределение Вейбулла:

$$P(t) = \exp(-\lambda t^b), \quad (8)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t^b), \quad (9)$$

где λ – параметр масштаба; b – параметр формы (безразмерная величина).

Нормальный и экспоненциальный (показательный) законы распределения образуют своеобразные крайние положения: при нормальном законе интенсивность отказов λ имеет возрастающий вид; при экспоненциальном законе имеет постоянное значение λ . На практике наиболее распространение получили именно эти два закона распределения.

Для наглядности дальнейших расчетов выберем магнитный пускатель марки ПМЛ-1100 завода-изготовителя КЭАЗ, г. Курск со следующими исходными данными: время наблюдения $t = 8$ годам, количество отказавших элементов $n = 135$ шт, количество рассматриваемых элементов $N_0 = 178$ шт., средняя наработка на отказ $T_{\text{сред}} = 6$ лет, среднеквадратическое отклонение наработки на отказ $\sigma = 2,4$ года.

По формулам (1) – (3) рассчитаем статическую вероятность безотказной работы и появления отказа. Вычислим по формулам (4) – (9) основные законы распределения. Сравним результаты расчетов (рис. 1).

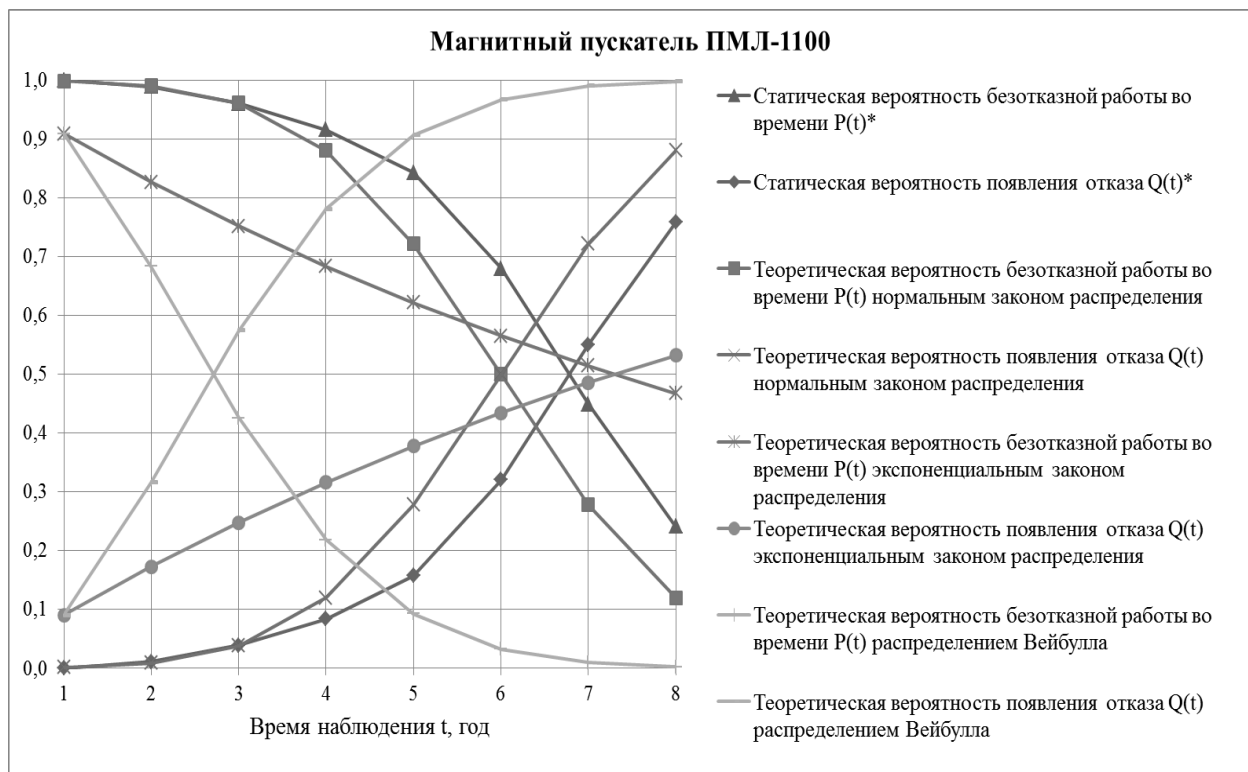


Рис. 1. Сравнение основных законов распределения со статическими данными для магнитного пускателя ПМЛ-1100

По рис. 1 видно, что для расчетов надежности магнитного пускателя ПМЛ-1100 наиболее точным является нормальный закон распределения.

В соответствии с ГОСТ 2491-82, вероятность безотказной работы рассматриваемых аппаратов (ПМЛ-1100) остается не ниже 0,85 для периода времени в течение первых 5 лет эксплуатации, затем данная величина резко снижается.

В табл. 1 приведены значения показателей критерия Колмогорова $P(y_n)$. Определим вероятность согласия $P(y_n)$ теоретического и эмпирического распределений по табличным данным для y_n . По значениям случайной величины y_n

определяется функция $P(y_n)$, используя линейную интерполяцию. Если $P(y_n) > 0,05$, то условие согласия является удовлетворительным.

Таблица 1

Значения показателей критерия Колмогорова

| y_n | $P(y_n)$ | y_n | $P(y_n)$ | y_n | $P(y_n)$ | y_n | $P(y_n)$ |
|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|------------|
| 0,0 | 1,00000 | 0,8 | 0,5441 | 1,6 | 0,0120 | 2,4 | 0,000020 |
| 0,05 | 1,00000 | 0,85 | 0,4653 | 1,65 | 0,0086 | 2,45 | 0,000012 |
| 0,1 | 1,00000 | 0,9 | 0,3927 | 1,7 | 0,0062 | 2,5 | 0,0000075 |
| 0,15 | 1,00000 | 0,95 | 0,3275 | 1,75 | 0,0044 | 2,55 | 0,0000044 |
| 0,2 | 1,00000 | 1,0 | 0,2700 | 1,8 | 0,0031 | 2,6 | 0,0000026 |
| 0,25 | 1,00000 | 1,05 | 0,2202 | 1,85 | 0,0021 | 2,65 | 0,0000016 |
| 0,3 | 0,99999 | 1,1 | 0,1777 | 1,9 | 0,0015 | 2,7 | 0,0000010 |
| 0,35 | 0,9997 | 1,15 | 0,1420 | 1,95 | 0,0010 | 2,75 | 0,0000006 |
| 0,4 | 0,9972 | 1,2 | 0,1122 | 2,0 | 0,0007 | 2,8 | 0,0000003 |
| 0,45 | 0,9874 | 1,25 | 0,0879 | 2,05 | 0,0004 | 2,85 | 0,00000018 |
| 0,5 | 0,9639 | 1,3 | 0,0681 | 2,1 | 0,0003 | 2,9 | 0,00000010 |
| 0,55 | 0,9228 | 1,35 | 0,0522 | 2,15 | 0,0002 | 2,95 | 0,00000006 |
| 0,6 | 0,8643 | 1,4 | 0,0397 | 2,2 | 0,0001 | 3,0 | 0,00000003 |
| 0,65 | 0,7920 | 1,45 | 0,0298 | 2,25 | 0,0001 | | |
| 0,7 | 0,7112 | 1,5 | 0,0222 | 2,3 | 0,0001 | | |
| 0,75 | 0,6272 | 1,55 | 0,0164 | 2,35 | 0,000032 | | |

Критерий Пирсона (или критерий χ^2) применяется для проверки гипотезы о соответствии теоретического и эмпирического распределения при большом объеме выборки ($n \geq 100$). Данный метод не применим для проверки, так как используется при многопараметрических распределениях.

В результате проведенных исследований на основании данных эксплуатации параметров надежности электрооборудования систем внутрицехового электроснабжения ряда предприятий г. Казани:

1. Наиболее подходящим является нормальный закон распределения при моделировании надежности систем электроснабжения.
2. Произведена проверка на соответствие нормального закона распределения с использованием критерия Колмогорова на основании магнитных пускателей ПМЛ-1100 завода-изготовителя КЭАЗ, г. Курск.

Библиографический список

1. **Петрова, Р.М.** Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения / Р.М. Петрова, Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И.Грачева, Valtchev S., Yousef Ibragim // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2 023. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 93-105.
2. **Петрова, Р.М.** Анализ надежности электрооборудования цеховых сетей // Материалы XVII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (20–22 октября 2022 г.) / редкол. А.Г. Арзамасова (отв. редактор). – Казань: ООО «Фолиант», 2022. – С. 206-209.
3. **Петрова, Р.М.** Надежность эксплуатации силовых трансформаторов / Вестник ПИТТУ

им. академика М.С. Осими». [Электронное издание]. – № 3 (24), 2022. – С. 52-57.

4. **Петрова, Р.М.** Надежность и перегрузочная способность силовых трансформаторов / Р. М. Петрова, Е.И. Грачева // Федоровские чтения – 2022: ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) (Москва, 15–18 ноября 2022 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. – М.: МЭИ, 2022. – С. 233-240.
5. **Федотов, А.И.** Исследования показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей / А.И. Федотов, Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9-10.

R.M. Petrova, E.I. Gracheva

SELECTION OF THE OPTIMAL DISTRIBUTION LAW FOR MODELING THE RELIABILITY OF INTRAFACORY POWER SUPPLY SYSTEMS

Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia

Abstract. The article investigates the main distribution laws: normal, exponential (exponential), Weibull distribution and Rayleigh's law, which allow modeling the reliability of intrafactory power supply systems.

Key words: distribution law, reliability, low-voltage electrical equipment; normal distribution law; probability of no-failure operation; probability of failure occurrence, failure rate.

References

- [1] Petrova RM, Abdullazyanov EYu, Grachieva EI, Valtchev S, Yousef Ibragim. *Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems*. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2023; 15; 1(57):93-105.
- [2] Petrova, R.M. *Reliability Analysis of Electrical Equipment of Shop Networks* // Proceedings of XVII All-Russian Open Youth Scientific-Practical Conference "Dispatching and Control in the Electric Power Industry" (20-22 October 2022) / edited by A.G. Arzamasova (Managing Editor). - Kazan: OOO "Foliant", 2022. - С. 206-209 (in Russian).
- [3] Petrova R.M. *Reliability of operation of power transformers* / Scientific and Technical Journal "WNEWS of PITTU named after academician M.S. Osimi". [Electronic edition]. - № 3 (24), 2022. - С. 52-57 (in Russian).
- [4] Petrova, R.M. *Reliability and overload capability of power transformers* / R.M. Petrova, E.I. Gracheva // Fedorovsky readings - 2022: LII All-Russian Scientific-Practical Conference with international participation (with the elements of scientific school for young people) (Moscow, November 15-18, 2022) / ed. by Yu.V. Matiunina. - Moscow: MPEI Publishing House. 2022. - С. 233-240 (in Russian).
- [5] Fedotov, A.I., Gracheva, E.I., Naumov, O.V. *Research of the reliability indexes of the low-voltage switching devices of the electrical networks* // Izvestia vuzov. Problems of power engineering. 2013. №9-10 (in Russian).

УДК 621.311.1

DOI: 10.46960/apeen_2023_282

Д.Ю. Платонов, Е.А. Кротков

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОРСКИХ ПОРТОВ

Самарский государственный технический университет

Аннотация. Морские порты являются одним из крупнейших перевалочных пунктов в логистике, для всех прибрежных государств. Наиболее мощными приемниками электрической энергии в системе электроснабжения порта являются перегрузочные машины. Ключевой особенностью перегрузочных машин является резкопеременный характер графика электрической нагрузки. Для выравнивания графика электрической нагрузки, требуется разработать специальные логистические решения. Настоящая работа посвящена анализу существующей литературы, посвященной исследованию графиков электрической нагрузки кранов морских портов.

Ключевые слова: морской порт, график электрической нагрузки, электрический приемник.

Водные грузоперевозки являются самым дешевым видом перевалки грузов. В связи с активным развитием северного морского пути, являющимся одной из ключевых задач для внутреннего флота в РФ, авторами настоящей работы будут рассмотрены особенности оценки электрической нагрузки в системах электроснабжения (СЭС) морского порта.

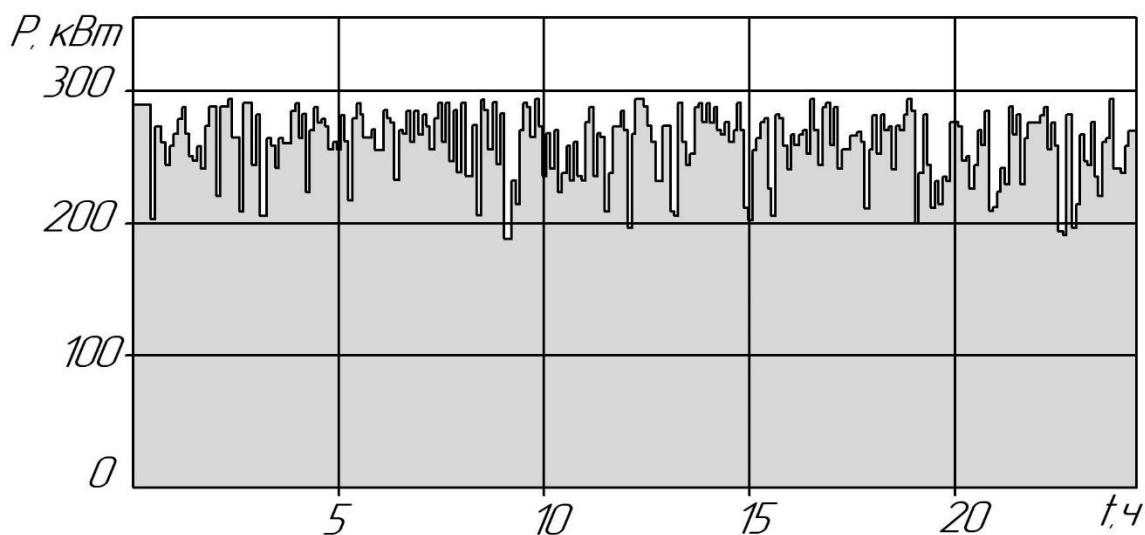


Рис. 1. Индивидуальный график электрической нагрузки крана

Пример СЭС морского порта с питанием от прилегающей сети напряжением 110 кВ представлен на рис. 2 [1].

В СЭС морского порта краны являются наиболее мощными электроприемниками с номинальной мощностью от 60 до 600 кВт. Графики электрической нагрузки (ГЭН) кранов морских портов имеют случайный и резкопеременный характер [2].

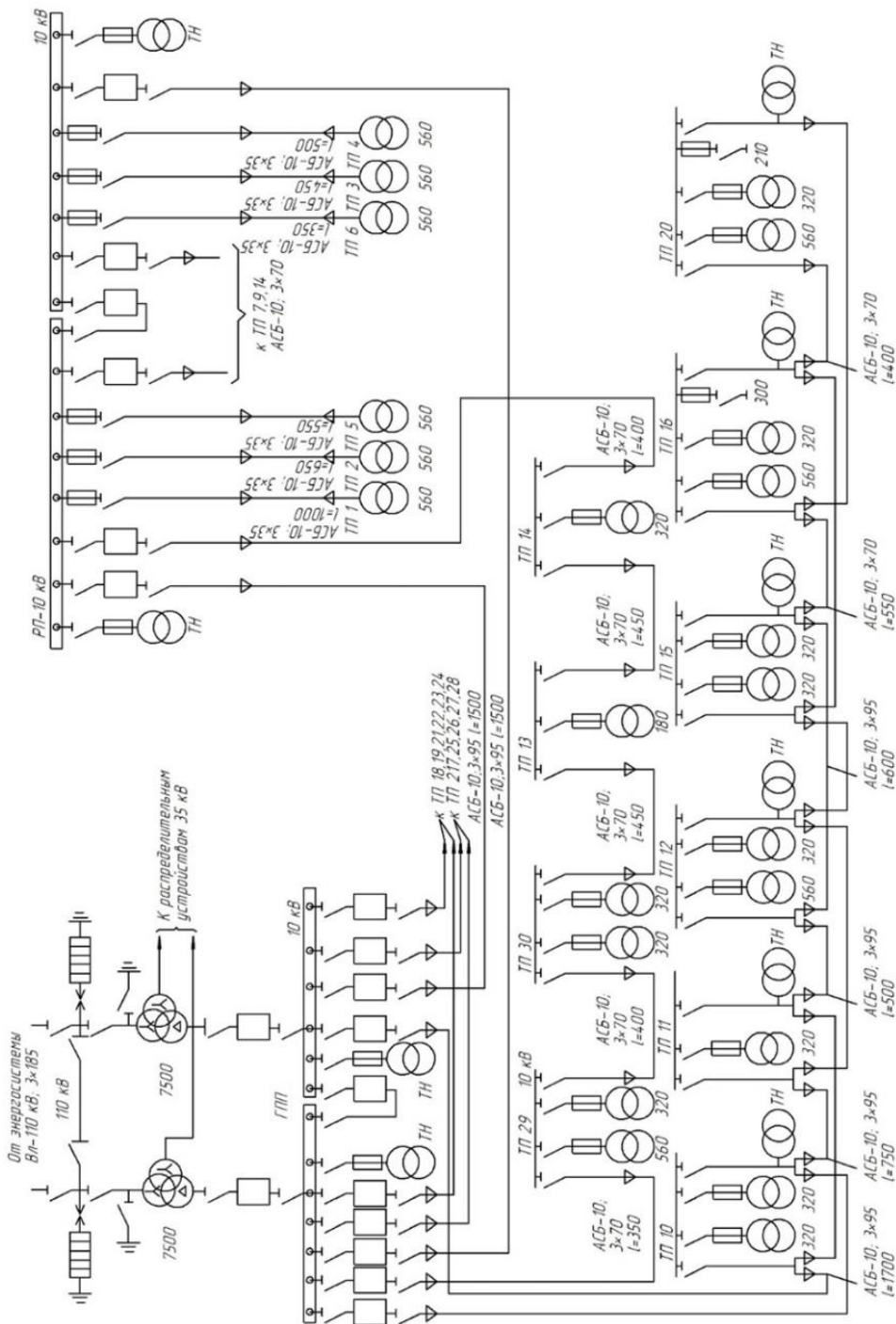


Рис. 2. Схема электроснабжения порта от энергосистемы на напряжении 110 кВ

Пример индивидуального ГЭН крана морского порта при работе со штучным грузом (контейнером) на суточном интервале приведен на рис. 1 [3,4,5,6].

Технологический процесс портового крана состоит из 6 основных действий (подъем, перемещение, спуск с/без груза) при среднем времени цикла 160 с, что представлено на рис. 3 [6].

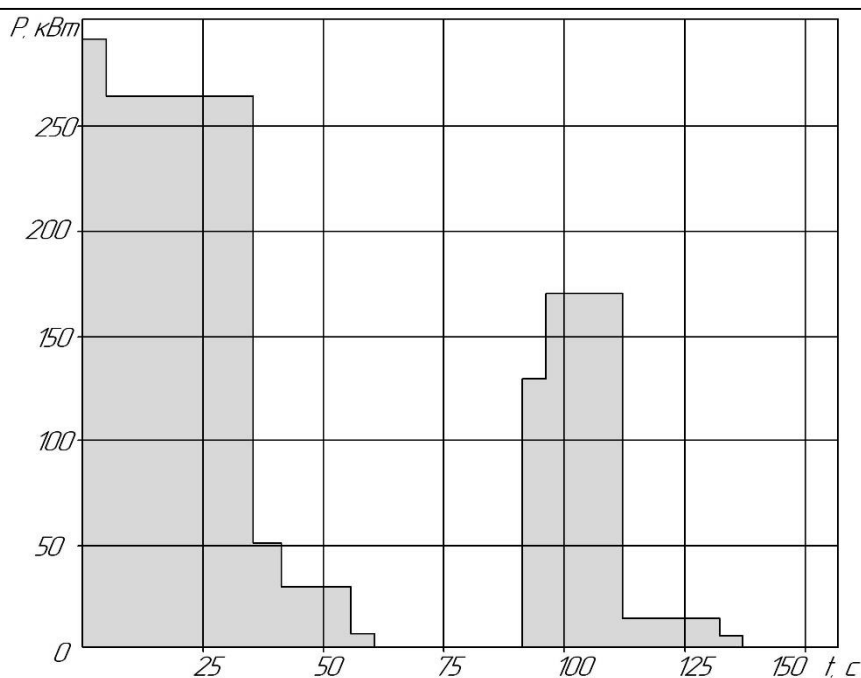


Рис. 3. График потребления мощности портового крана из прилегающей сети

Согласно рис. 3, периоды с начала цикла работы до 30 с. и с 90 до 110 с. соответствуют фазе подъема и характеризуются максимальным значением потребления мощности из прилегающей сети, с 30 до 60 с. и с 110 до 130 с. происходит фаза перемещение, с 60 до 90 с. и с 130 до 160 с. происходит фаза спуска

Исследованиями в области анализа и расчета электрических нагрузок кранов речных и морских портов в РФ, занимаются д.т.н., проф. Шошмин В.А и другие исследователи [7,8,9].

Развитие инфраструктуры речных и морских портов, как правило, отстает от развития перегрузочной техники, в связи с чем на настоящий момент большинство научных публикаций в РФ, сделаны для устаревшего перегрузочного оборудования. Планируемое развитие северного судоходства в России предполагают появление современных видов перегрузочного оборудования, например, для портовых кранов с гибридным электроснабжением.

Существуют ряд зарубежных исследований в области анализа и расчета электрических нагрузок кранов морских портов с гибридным электроснабжением [3,4,5,6].

В работе [6] рассмотрено использование аккумулирующей батареи параллельно с работой крана с/без возможности рекуперации, что позволяет снизить величину потребления активной мощности портового крана из прилегающей сети.

На рис. 4 и рис. 5 представлены графики потребления активной мощности портового крана с гибридным электроснабжением, где кривая 1 соответствует потреблению мощности из прилегающей сети, кривая 2 от аккумулирующей батареи, кривая 3 соответствует этапу рекуперации.

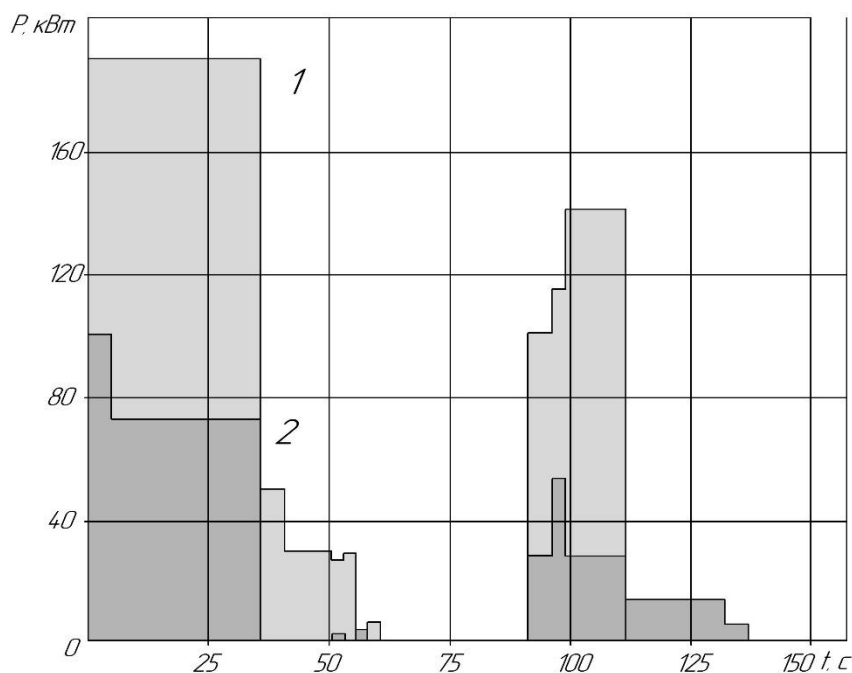


Рис. 4. График потребления активной мощности портового крана с батареями

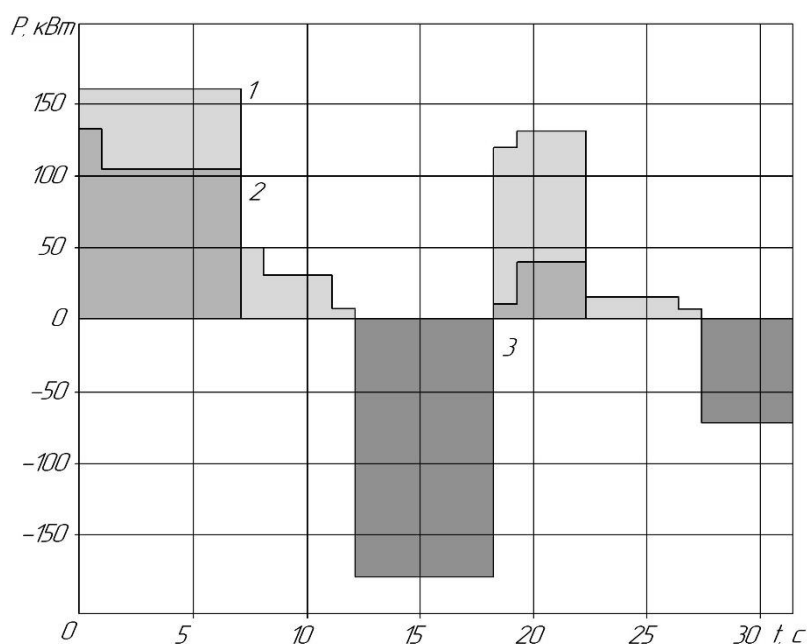


Рис. 5. График потребления активной мощности портового крана с батареями и рекуперацией

Согласно рис. 4 и рис. 5, применение портовых кранов с гибридной системой электроснабжения и возможностью рекуперации существенно снижает пиковую величину электрической нарезки на стадии подъема груза.

Анализ научных трудов показал, что создание математической модели для порталного крана с возможностью рекуперации является актуальным исследованием, которое может быть использовано для проектирования вводимых или реконструируемых морских и речных портов. Для достижения поставленной цели, авторами поставлены следующие задачи:

- 1) Необходимо провести исследования индивидуальных и групповых ГЭН кранов морских портов при работе со штучным грузом (контейнером);
- 2) Создать математическую модель для определения расчетной электрической нагрузки.

Библиографический список

1. **Кирпичников, Л.А.**, Хариф М.И. Электроснабжение и электросети порта. Изд. 2-е, перераб. – М.: Транспорт, 1975. – 192 с.
2. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский [и др.] – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
3. **Papaioannou, Vicky**, Stefano Pietrosanti, William Holderbaum, Victor M. Becerra, and Rayner Mayer. Analysis of energy usage for RTG cranes // *Energy* 125 (2017): 337-344
4. **Harrison, I.**, S. Pietrosanti, A. Luque, R. Mayer, and W. Holderbaum. Recording and analysing measurements from an RTG crane // *Measurement* 125 (2018): 284-293
5. **Alasali, Feras**, Stephen Haben, Victor Becerra, and William Holderbaum. "Analysis of RTG crane load demand and short-term load forecasting." *Int J Comput Commun Instrumen Eng* 3, no. 2 (2016): 448-454.
6. **Phiri, S.F.**, Kusakana K., Numbi B.P. Optimal Energy Control of a Rubber Tyre Gantry with Potential Energy Recovery // 2018 Open Innovations Conference (OI), Johannesburg, South Africa, 2018, pp. 124-128
7. **Толокнова, О.М.** Методы расчета электрических нагрузок для оптимизации процесса электроснабжения морских и речных портов / О.М. Толокнова, А.В. Саушев, В.А. Шошмин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2019. – Т. 2. – С. 57-60.
8. **Толокнова, О.М.** Метод анализа электропотребления перегрузочных процессов в порту / О.М. Толокнова, В.А. Шошмин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 2 (36). – С. 157-166.
9. **Толокнова, О.М.** Анализ связи и прогнозирование активных и реактивных электрических нагрузок грузоподъемных машин / О.М. Толокнова, А.В. Саушев, В.А. Шошмин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 6. – С. 1310-1319.

D.Y. Platonov, E.A. Krotkov

Development of the power supply system of seaports

Samara State Technical University, Samara, Russia

Abstract. Seaports are one of the largest transshipment points in logistics, for all coastal states. The most powerful receivers of electrical energy in the port's power supply system are transshipment machines. The key feature of reloading machines is the sharply variable nature of the electrical load schedule. To align the electrical load schedule, it is required to develop special logistics solutions. The present work is devoted to the analysis of the existing literature devoted to the study of graphs of the electrical load of cranes of seaports.

Key words: seaport, electrical load schedule, electrical receiver.

References

- [1] Power supply and power grids of the port. Kirpichnikov L.A., Kharif M.I. 2nd Ed., reprint. And additional M.: Transport, 1975. -192 p.
- [2] Electrical loads of industrial enterprises / S.D. Volobrinisky [et al.] – L.: Energiya, 1971. – 264 p.
- [3] Papaioannou, Vicky, Stefano Pietrosanti, William Holderbaum, Victor M. Becerra, and Rayner Mayer. "Analysis of energy usage for RTG cranes." *Energy* 125 (2017): 337-344
- [4] Harrison, I., S. Pietrosanti, A. Luque, R. Mayer, and W. Holderbaum. "Recording and analysing measurements from an RTG crane." *Measurement* 125 (2018): 284-293
- [5] Alasali, Feras, Stephen Haben, Victor Becerra, and William Holderbaum. "Analysis of RTG crane load demand and short-term load forecasting." *Int J Comput Commun Instrumen Eng* 3, no. 2 (2016): 448-454.
- [6] S.F. Phiri, K. Kusakana and B.P. Numbi, "Optimal Energy Control of a Rubber Tyre Gantry with Potential Energy Recovery," 2018 Open Innovations Conference (OI), Johannesburg, South Africa, 2018, pp. 124-128
- [7] Toloknova, O.M. Methods of calculating electrical loads for optimizing the process of power supply of sea and river ports / O.M. Toloknova, A.V. Saushev, V.A. Shoshmin // *Proceedings of the International Symposium "Reliability and quality"*. – 2019. – Vol. 2. – pp. 57-60.
- [8] Toloknova, O.M. Method of analysis of power consumption of transshipment processes in the port / O.M. Toloknova, V.A. Shoshmin // *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. – 2016. – № 2(36). – Pp. 157-166.
- [9] Toloknova, O.M. Communication analysis and forecasting of active and reactive electrical loads of lifting machines / O.M. Toloknova, A.V. Saushev, V.A. Shoshmin // *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. – 2017. – Vol. 9, No. 6. – pp. 1310-1319.

Л.Р. Романов, М.В. Шарыгин

СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–35 КВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрено влияние появления источников распределенной генерации и усложнение конфигураций сетей на эффективность работы устройств РЗА. Предложен способ повышения распознаваемости аварийных режимов токовой защитой. Приведено описание имитационной модели в программном комплексе *PSCAD* для проверки работоспособности предложенного алгоритма.

Ключевые слова: Релейная защита, многомерная защита, распределительные сети, имитационное моделирование, *PSCAD*.

Для успешного развития экономики и промышленности Российской Федерации требуется надежное и бесперебойное электроснабжение. Ключевую роль в этом вопросе играют устройства релейной защиты и автоматики (РЗА).

Тем не менее, в последнее время наблюдается активное появление источников собственной генерации у различных по величине промышленных предприятий (ПП) и на объектах нефте- и газодобычи на удаленных территориях Крайнего Севера, внедрение возобновляемых источников распределенной генерации, таких как ветряные электростанции (ВЭС), солнечные электростанции (СЭС), малые гидроэлектростанции (ГЭС) и станции с гибридным аккумулярованием (ГАЭС) и т.п.

Такие тенденции вынуждают пересматривать традиционные подходы к построению распределительных сетей, так как они не предназначены для работы с множеством источников питания. Одним из главных примеров негативного влияния появления большого количества источников распределенной генерации можно выделить увеличение количества возможных электрических режимов в прилегающих к ним сетям, а также усложнение ведения режимов работы для системных операторов.

К тому же все перечисленное ранее будет оказывать негативное влияние на эффективность работы устройств РЗА, снижая их чувствительность и быстродействие, тем самым нарушая условия селективности. Таким образом, существенно снижается управляемость электрических сетей и соответственно их надежность.

Для решения данной проблемы в соответствии с программой инновационного развития ПАО «Россети» [1] будет произведена реконструкция существующих электрических сетей и осуществлен переход к цифровым активно-адаптивным сетям с интеллектуальной системой автоматизации и управления.

Активное внедрение интеллектуальных устройств и других цифровых технологий в электроэнергетике является сильным драйвером роста эффективности современных алгоритмов различных релейных защит и автоматики. Переход на цифровые устройства РЗА открывает новые возможности для реализации принципиально иных подходов к построению релейной защиты распределительных сетей 6–35 кВ.

Алгоритмы работы микропроцессорной релейной защиты во многом отличаются от применяемых на электромеханической и электронной элементной базе. Это обуславливается различием технической основой и способом обработки сигналов. Именно эти особенности техники создают новые возможности цифровой обработки сигнала и обмена информацией между различными устройствами, что позволяет расширить область совершенствования и создания новых алгоритмов работы РЗА.

Недостатки традиционных токовых защит

В настоящее время, в распределительных и сетях напряжением 6–35 кВ наиболее широкое применение в качестве защит получили наиболее простые и надежные токовые защиты (токовая отсечка (ТО), максимальная токовая защита (МТЗ)) и их различные вариации [2]. Однако принципы построения различных релейных защит и логики их работы, реализованных даже на базе микропроцессорных терминалов релейной защиты, остаются неизменными. Зачастую алгоритмы различных защит просто копируют принципы системы РЗ на электромеханических реле. И как опоминалось ранее, при реконфигурациях защищаемой сети, усложнении ее топологии и появлении новых источников генерации будет наблюдаться ухудшение эффективности работы самих защит.

Таким образом, использование устаревших подходов организации систем релейной защиты в условиях развивающейся электроэнергетики является нецелесообразным, к тому же современные цифровые технологии позволяют реализовывать новые варианты построения релейных защит, улучшающих их эффективность, при этом не влияя на конечную стоимость микропроцессорного терминала релейной защиты. В особенности разработка новых и эффективных релейных защит имеет стратегическое значение в условиях политики импортозамещения.

Предлагаемый вариант улучшения токовых защит

Одним из перспективных вариантов повышения эффективности релейных защит в распределительных сетях 6–35 кВ является применение многопараметрической токовой защиты, построенной с использованием информационного подхода [3]. В своей основе такой подход использует принципы многократного имитационного моделирования с последующей статистической обработкой результатов моделирования.

Опираясь на данный принцип, имеется возможность построить алгоритм N-мерной токовой защиты, используя разные параметры сети.

Для реализации предлагаемого алгоритма токовой защиты возможно использовать, так называемый, чисто аварийный ток, вычисляемый в общем виде по следующей формуле:

$$I_{\text{ав}} = I - I_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{ав}}$ – чисто аварийный ток; I – ток, измеряемый защитой; $I_{\text{н}}$ – ток доаварийного (запомненного) режима.

В соответствии с принципом многомерности введем два измеряемых параметра сети. Улучшение эффективности защиты возможно достичь при помощи выделения модуля приращения действующего значения чисто аварийного тока и его фазы:

$$|I_{\text{ав}}| = |I(t) - I(t - 0.02)|; \quad (2)$$

$$|\varphi_{\text{ав}}| = |\varphi(t) - \varphi(t - 0.02)|, \quad (3)$$

где $I(t)$, $\varphi(t)$ – действующее значение тока и его фазы; $I(t-0.02)$, $\varphi(t-0.02)$ – действующее доаварийное (запомненное) значение тока и его фазы.

Предлагаемая многопараметрическая токовая защита использует несколько информационных параметров для своей работы. Таким образом, измерительный орган (ИО) защиты работает в двумерном пространстве, что в свою очередь упрощает выделение уставочных областей срабатывания в виде сеточных функций, которые являются хорошим способом для оптимизации вычислительных мощностей в устройствах релейной защиты [4].

Моделирование

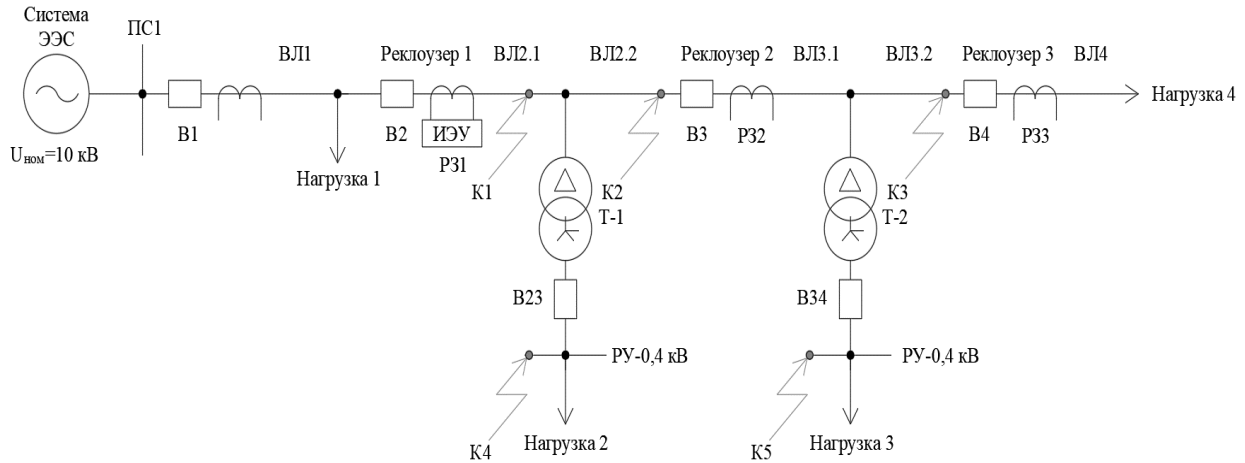
Для создания имитационной статистической модели предложенного алгоритма токовой защиты был использован программный комплекс *PSCAD*, позволяющий эффективно моделировать самые разнообразные режимы электрической сети, аварии, а также имитировать логику работы устройств РЗА.

В качестве исходных данных был построен участок электрической сети 10 кВ с односторонним питанием, предназначенного для электроснабжения магистрального трубопровода. Принципиальная схема сети и имитационной модели представлена на рис. 1.

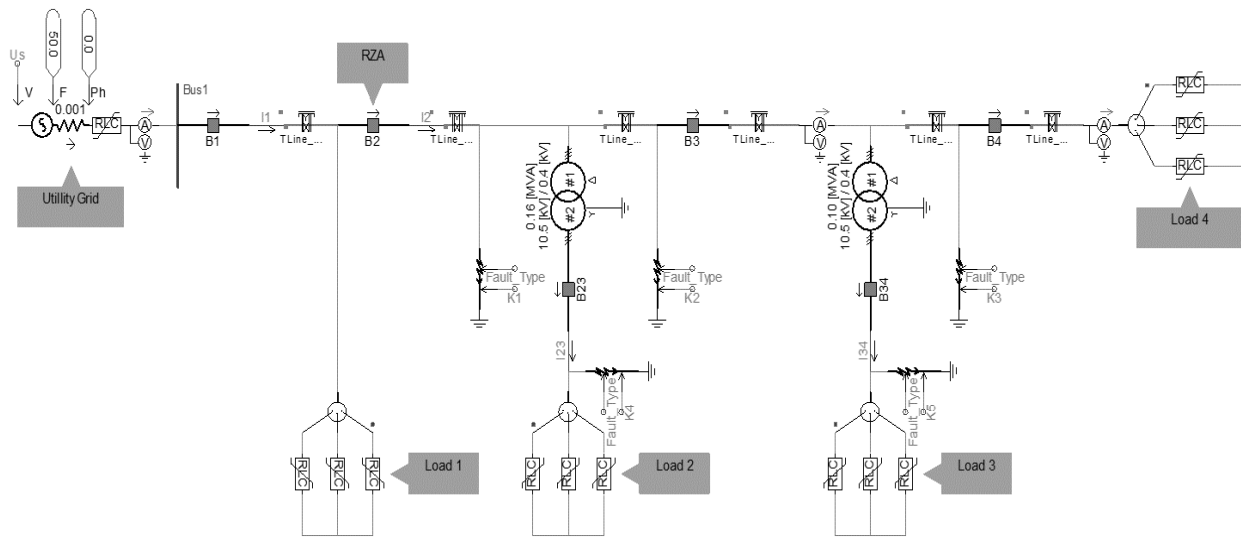
На основе полученных статистических данных о работе имитационной модели при задании случайного распределения параметров ее элементов были построены области распределения нормальных и аварийных режимов для классической и многопараметрической токовой защиты.

Для сравнения эффективности распознавания различных режимов разными видами защит возможно применить критерий оценки по количеству информации (энтропии) на основе информационной теории Шеннона [5]. Указанный критерий позволяет однозначно определить относительные вероятности правильного и ошибочного распознавания режима исследуемого варианта за-

щиты. Результаты моделирования показывают эффективность введения дополнительных информационных параметров для организации многопараметрической токовой защиты.



а)



б)

Рис. 1. Принципиальные схемы моделируемой сети:
 принципиальная схема участка электрической сети 10 кВ с односторонним питанием (а),
 имитационная модель участка электрической сети 10 кВ в PSCAD (б)

Выводы

В данной работе рассмотрено влияние появления большого количества источников распределенной генерации на эффективность релейной защиты.

Обозначены недостатки применения традиционных подходов к построению релейных защит в системах с большим числом источников генерации.

Предложен способ построения многопараметрической токовой защиты, использующей в качестве информационных критериев чисто аварийный ток $I_{ав}$ и его фазу $\varphi_{ав}$.

Библиографический список

1. Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 гг. с перспективой до 2025 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation__program.pdf (дата обращения 5.05.2023).
2. **Федосеев, А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов [Текст] / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
3. **Лямец, Ю.Я.** Об информационной теории релейной защиты / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, А.Н. Подшивалин, Я.В. Закончек // Известия АЭН РФ. – 2009. – № 1.
4. **Шарыгин, М.В.** Синтез универсального многомерного измерительно-пускового органа релейной защиты / М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов, А.А. Петров // Электричество. – 2020. – № 1. – С. 4–11.
5. **Шарыгин, М.В.** Защита и автоматика систем электроснабжения с активными промышленными потребителями: монография / М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017. – 284 с

L.R. Romanov, M.V. Sharygin

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF DIGITAL OVERCURRENT PROTECTION IN 6-35 KV DISTRIBUTION NETWORKS

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the influence of distributed generation sources emergence and the complication of network configurations on the efficiency of relay protection and automation devices. A method for increasing the recognizability of emergency modes by overcurrent protection is proposed. A description of the simulation model in the PSCAD software package for checking the operability of the proposed algorithm is given.

Key words: Relay protection, multidimensional protection, distribution networks, simulation modeling, PSCAD.

References

- [1] The program of innovative development of JSC "Rosseti" for the period 2016–2020 with the prospect until 2025 [Electronic resource]. – M.: JSC "Rosseti", (in Russian)
- [2] Fedoseev, A.M. Relay protection of electric power systems: Textbook. For university [Text] / A.M. Fedoseev, M.A. Fedoseev — 2nd ed., pererab. i dop. — M.: Energoatomizdat, 1992. — 528 p.: ill.parameters of emergency mode. Part 2. – M.: NTF "Energoprogress", 2019. – 80 p.]. (in Russian)
- [3] Lyamets, Nudelman G.S., Podshivalin A.N., Konkonchek Y.V. On the information theory of relay protection [Text]. – Izv. AEN RF, 2009, No 1. (in Russian)
- [4] Sharygin M.V., Kulikov A.L., Petrov A.A. Synthesis of a universal multidimensional measuring and starting body of relay protection [Text] / M.V. Sharygin, A.L. Kulikov, A.A. Petrov // Electricity. – 2020. – № 1. – S. 4–11. (in Russian)
- [5] Protection and automation of power supply systems with active industrial consumers: monograph / M.V. Sharygin, A.L. Kulikov. – Nizhny Novgorod: NRU RANEPА, 2017. – 284 p (in Russian)

А.В. Слузова, А.Л. Куликов

ЗАДАЧА РАСПОЗНАВАНИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО УЧАСТКА ЛИНИИ ПРИ ОМП

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрено влияние искажающих факторов на точность расчета устройств определения места повреждения (ОМП) и требования к формированию зоны обхода ВЛЭП при устранении повреждения оперативно-выездной бригадой. Предложен способ повышения точности и сокращения зоны обхода линии. Приведено описание предлагаемого метода, а также критерии эффективности алгоритма распознавания поврежденного участка ВЛЭП.

Ключевые слова: определение места повреждения, интервальный метод, короткое замыкание, показатели качества электроэнергии, критерии эффективности.

В силу большой протяженности высоковольтных воздушных ЛЭП определение места повреждения (ОМП) на них становится одной из важнейших задач. В случае устойчивого повреждения, чем зачастую является отключаемое защитой КЗ, основная цель ОМП – как можно более точное установление зоны поломки для ее оперативного устранения ремонтными бригадами. Однако в электрических сетях имеют место и неустойчивые повреждения, которые могут самоустраняться или переходить при определенных условиях в устойчивые. Информация о местоположении самоустранившихся повреждений довольно важна для эксплуатационной практики, поскольку в месте ослабленной самоустранившимся повреждением изоляции есть риск повторного возникновения аварии.

Стандарт ПАО «Россети» [1] устанавливает требования для определения зоны осмотра (обхода) ВЛЭП. После аварийного отключения ВЛЭП по данным расчета на основе показаний устройств ОМП необходимо исходить из того, что максимальное значение зоны осмотра составляет:

- $\pm 15\%$ длины ВЛЭП для линий протяженностью до 50 км включительно;
- $\pm 10\%$ для ВЛЭП протяженностью более 50 км до 100 км включительно;
- $\pm 7\%$ для ВЛЭП протяженностью от 100 до 300 км включительно;
- $\pm 5\%$ для ВЛЭП протяженностью от 300 км и более.

При этом расчетные алгоритмы не учитывают наличие переходного сопротивления в месте замыкания. Однако информация о величине сопротивления повреждения (напряжения в месте короткого замыкания) является важной, с эксплуатационной точки зрения. По этой информации можно предварительно определить характер (вид) повреждения, с целью подготовки и комплектования оперативно-выездной бригады необходимым инструментом.

Помимо переходного сопротивления на точность ОМП могут влиять:

- насыщение ТТ;
- отклонение показателей качества электроэнергии (ПКЭ).

Поскольку информативной базой существующих и используемых в эксплуатации устройств ОМП являются осциллограммы параметров аварийного режима, неучет искажающих факторов, а, следовательно, и неучет искажений осциллограмм токов и напряжений может привести к недопустимо большой ошибке расчета. По требованиям эксплуатационной практики [2], расчет расстояния до места повреждения является точным, если ошибка ОМП не превышает длины одного пролета линии. В табл. 1 приведены данные о габаритах ВЛ.

Таблица 1

Габариты ВЛ класса напряжения 110 кВ и выше

| Номинальное напряжение, кВ | Длина пролета, м | Расстояние между проводами, м | Высота опоры, м |
|----------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|
| 110 | 170-250 | 4 | 13-14 |
| 220 | 250-350 | 7 | 25-30 |
| 330 | 300-400 | 9 | 25-30 |
| 500 | 350-450 | 12 | 25-30 |
| 750 | 450-750 | 15 | 30-41 |

Согласно [1] при ОМП на ВЛ напряжением 110 кВ и выше возможно применение фиксирующих приборов (индикаторов), регистраторов аварийных событий, а также микропроцессорных устройств РЗА. Однако, в соответствии с [3] происходит широкое внедрение цифровых технологий во многие отрасли экономики РФ, включая энергетику. Таким образом, наибольший интерес для изучения представляют собой расчетные алгоритмы, реализующие программный метод ОМП. Функция ОМП зачастую встроена в микропроцессорные терминалы релейной защиты и автоматики (РЗА) и регистраторы аварийных событий (РАС). Учитывая информацию, приводимую в руководстве пользователя на терминалы, расчет расстояния до места повреждения во многом зависит от точности, заданной по расчетным параметрам модели ЛЭП. Однако руководство не приводит информацию о влиянии отклонений ПКЭ на цифровую обработку сигналов и, как следствие, на точность расчета.

Согласно [4], показатели качества электроэнергии делятся на две категории:

- 1) продолжительные изменения;
- 2) случайные события.

Влияние случайных отклонений ПКЭ не представляет особенного интереса, поскольку вероятность их возникновения одновременно с повреждением мала, поэтому будут рассмотрены только ПКЭ первой категории. К первой категории относятся:

- отклонение частоты;
- медленные изменения напряжения;

- колебания напряжения и фликер;
- несинусоидальность напряжения (гармонические и интергармонические составляющие);
- несимметрия напряжений в трехфазных системах.

Аналоговый сигнал, поступающий от измерительных ТТ и ТН и характеризующий контролируемые параметры режима, проходит предварительную аналоговую фильтрацию для улучшения качества цифровой обработки (рис.1). Благодаря этому этапу обработки сигнала исключается эффект наложения спектров. Получаемый на последующих этапах обработки цифровой сигнал поступает на входы измерительных органов цифрового устройства (ЦИО). Алгоритмом ЦИО является последовательность операций с цифровыми отсчетами (выборками), зависящими от входных аналоговых сигналов. Цифровой сигнал имеет две основные характеристики: количество выборок на период промышленной частоты N и период дискретизации T ,

$$T = \frac{1}{f_0 \cdot N}, \quad (1)$$

где f_0 – частота основной гармоники, Гц, а сам цифровой сигнал можно представить в следующем виде:

$$u(nT) = U_m^c \cdot \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U_m^s \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad (2)$$

где U_m^c и U_m^s – амплитуды косинусной и синусной ортогональных составляющих сигнала. Помимо полезного сигнала $u(nT)$ входной сигнал релейной защиты содержит помеховую составляющую $e(nT)$. Назначение цифровых фильтров, входящих в состав ЦИО, состоит в выделении полезного сигнала и максимальном подавлении помех. Сигнал помехи в свою очередь может содержать высшие гармоники, кратные основной частоте; затухающие аperiodические составляющие и т.д. Помимо высших гармоник на результаты цифровой обработки сигналов могут влиять интергармонические составляющие, имеющие частоту колебаний не кратную частоте основной гармоники. Их появление обусловлено наличием резко переменной нагрузки (электродуговые сталеплавильные печи, сварочные аппараты, тиристорные электроприводы с частотным регулированием), а также модуляцией несинусоидальных процессов [5].

Достаточно точно оценить амплитуды и частоты интергармоник проблематично из-за нестабильности их кривой, поэтому точный учет всех помеховых компонент невозможен, следовательно, на всех этапах обработки полезный сигнал будет выделяться с ошибкой. На практике помеховый сигнал представляется упрощенно, то есть учитывается экспоненциально затухающая аperiodическая составляющая и несколько высших гармоник, кратных основной. Таким образом, большинство алгоритмов обеспечивают необходимые характеристики ЦИО при условии, что производятся операции с цифровыми последовательностями, обусловленными цифровой обработкой только синусоидальных сигналов частоты 50 Гц, при этом подразумевается, что составляющие других частот практически отсутствуют.

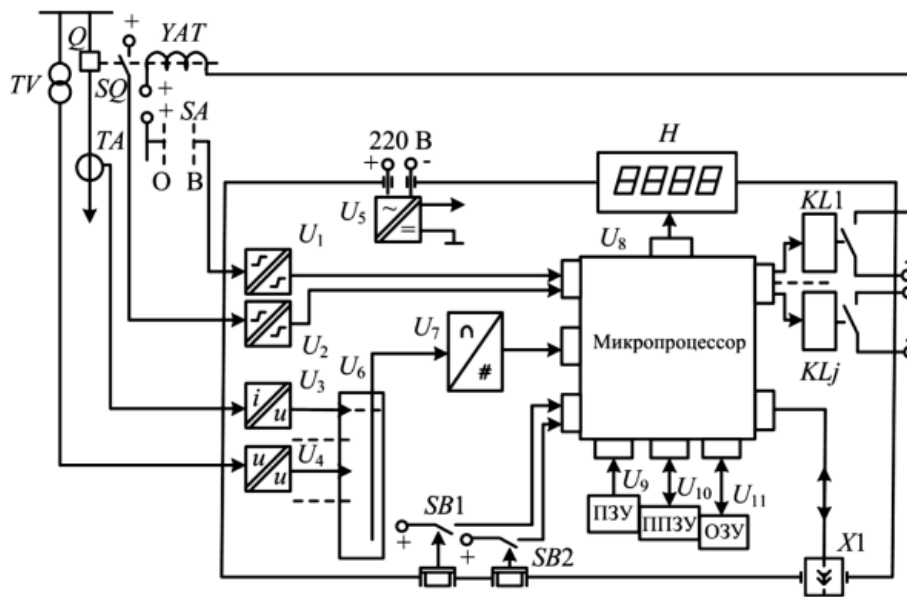


Рис. 1. Структурная схема цифрового устройства релейной защиты:

$U_1 - U_4$ – входные преобразователи сигналов, $KL_1 - KL_j$ – выходные преобразователи сигналов,

U_6, U_7 – тракт аналого-цифрового преобразования, SB_1, SB_2 – кнопки управления и ввода информации от оператора, H – дисплей, U_5 – блок питания, X_1 – коммуникационный порт

Также при отклонении частоты от номинального значения вносятся значительные погрешности в определение информационных параметров сигнала.

Руководства по эксплуатации микропроцессорных терминалов с функцией ОМП утверждают, что в большинстве случаев ошибка ОМП не превышает 1-5% от длины линии при одностороннем замере и 3-5% при двухстороннем замере, что не всегда может удовлетворять требуемой точности. При значительных ошибках ОМП фактическое место повреждения может оказаться за пределами сформированной зоны обхода ВЛЭП. Поскольку осмотр ВЛЭП на предмет выявления повреждения производится сначала в пределах соответствующей зоны обхода одной или несколькими бригадами, то правильное формирование такой зоны, однозначно включающей место повреждения, имеет принципиальное значение и влияет на время (скорость) ликвидации аварийной ситуации.

Предлагаемый метод ОМП нацелен на повышение устойчивости функционирования в условиях влияния искажающих факторов. При наличии отклонения ПКЭ от нормативных значений процедуру ОМП ВЛЭП целесообразно реализовать следующим образом: сначала рассчитать расстояние до места КЗ по одному из используемых в МП терминалах выражений без учета факторов, снижающих точность, затем определить ошибку ОМП из-за отклонений ПКЭ, после этого уточнить расстояние до места короткого замыкания и сформировать новую зону обхода ВЛЭП с учетом ошибки. На последнем этапе происходит переход от расчета расстояния к распознаванию поврежденного участка из ряда соседних (рис. 2). Это позволит включить в зону обхода лишь тот участок линии,

на котором имеется повреждение, за счет этого существенно сократится зона обхода. Минимальную длину участка линии, на котором однозначно можно распознать повреждение, будем называть «разрешающей способностью линии».

Для формирования рационального решающего правила при ОМП необходимо ввести показатели эффективности алгоритма распознавания поврежденного участка ЛЭП: вероятностные, экономические и информационные. Вероятностные критерии могут задаваться матрицей условных вероятностей для нескольких гипотез, каждая из которых соответствует своему поврежденному участку в пределах зоны обхода ЛЭП. Экономические критерии предлагается формировать в виде матрицы стоимостей ошибок ОМП. На основе такой матрицы можно ввести величину среднего риска, как среднюю стоимость ущерба многогипотезной процедуры ОМП, учитывая при этом неравнозначность ошибок. Информационные критерии основываются на возможностях по извлечению информации из осциллограмм аварийных токов и напряжений алгоритмов распознавания с учетом вариантов цифровой обработки сигналов. Максимальное использование информации о параметрах аварийного режима соответствует снижению неопределенности при принятии решения о поврежденном участке ЛЭП.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Библиографический список

1. ПАО «Россети» [ПАО «ФСК ЕЭС» Стандарт организации: СТО 56947007-29.240.55.159-2013 «Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше», дата введения: 28.11.2013.
2. **Куликов, А.Л.**, Обалин, М.Д. Адаптивное определение места повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. Часть 2. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2019. – 80 с.
3. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 511-р от 03.11.2013.
4. ГОСТ 32144 - 2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения; Введ. 2014-07-1. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
5. **Жежеленко, И.В.** Интергармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко // Вестник ПГТУ. – 1999. – № 8. – С. 5-10.
6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 2003.

A.V. Sluzova, A.L. Kulikov

THE PROBLEM OF RECOGNIZING A DAMAGED LINE SECTION DURING AN FAULT LOCATION DETERMINATION

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the influence of distorting factors on the calculation accuracy of the fault location devices (FLD) and the requirements for the formation of the overhead power line bypass zone when repairing damage by the operating crew. A method of increasing the accuracy and reducing the bypass zone of the line is proposed. A description of the proposed method is given, as well as the efficiency criteria of the algorithm for identifying the damaged section of the overhead line

Key words: fault location determination, interval method, short circuit, power quality indicators, efficiency criteria.

References

- [1] JSC ROSSETI [JSC Federal Grid Company of the Unified Electric Power System Organization Standard: STO 56947007-29.240.55.159-2013 "Standard Instruction on Organizing Work to Identify Locations of Overhead Power Lines of 110 kV and More", date of entry: 28.11.2013] (in Russian)
- [2] Kulikov A.L., Obalin M.D. Adaptive fault location of power lines by parameters of emergency mode. Part 2. - Moscow: NTF "Energoprogress", 2019. - 80 p.] (in Russian)
- [3] Strategiya razvitiya elektrosetevogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii [Development strategy for the power grid complex of the Russian Federation]. Approved by the order of the Government of the Russian Federation no. 511-r , from Nov. 03, 2013 (in Russian)
- [4] GOST 32144 - 2013. Electrical energy. Compatibility of technical means electromagnetic. Quality standards of electrical energy in general purpose power supply systems; Introduced. 2014-07-1. - Moscow: Standartinform, 2014. - 16 p.
- [5] Zhehelenko I. V. Interharmonics in power supply systems of industrial enterprises / I.V. Zhehelenko, Y.L. Saenko, T.K. Baranenko II Vestnik PSTU. - Mariupol, 1999. - № 8. -С. 5-10 (in Russian)
- [6] Rules of Technical Operation of Consumers' Electrical Installations. St. Petersburg: DEAN Publishing House, 2003 (in Russian)

Ю.И. Солуянов^{1,2,3}, А.И. Федотов^{1,3}, А.Р. Ахметшин^{1,3}, В.Н. Кулаков³

**РАЗРАБОТКА НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ
НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ
«Г. МОСКВА – МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ»**

Ассоциация «Росэлектромонтаж»¹

АО «Татэлектромонтаж»²

Казанский государственный энергетический университет³

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы разработки нормативных требований для расчета электрических нагрузок жилых комплексов на примере городской агломерации «Г. Москва – Московская область». Проанализированы получасовые графики нагрузок многоквартирных жилых домов, дошкольных и средних образовательных учреждений. Предложено внесение изменений в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» в части разработки раздела по расчету электрических нагрузок микрорайона (квартала), в том числе электрических сетей 10 кВ жилых комплексов, с разработкой новых коэффициентов совмещения максимумов нагрузок силовых трансформаторов. Внедрение изменений приведет к уменьшению затрат на строительство электрических сетей жилых комплексов.

Ключевые слова: запертая электрическая мощность, резервная электрическая мощность, потери электроэнергии, энергоэффективность, энергосбережение, система электропитания, удельное энергопотребление.

Актуальность выполняемой научно-исследовательской работы вызвана необходимостью реализации пункта 7 Перечня поручений Правительства Российской Федерации (РФ) от 27 июня 2016 г. № ДМ-П9-3732 и подпункта «в» пункта 2 Перечня поручений по итогам заседания Государственного Совета РФ «О развитии строительного комплекса и совершенствовании градостроительной деятельности в РФ» от 17 мая 2016 г. № Пр-1138ГС о приведении в соответствие с современными требованиями документов технического регулирования в сфере строительства, в том числе о принятии мер по гармонизации отечественных и международных стандартов с учетом лучших мировых практик.

На сегодняшний день существует весомая разница (более 2 раз) между расчетными и реальными (фактическими) электрическими нагрузками жилых и общественных зданий (дошкольных (ДОУ) и средних образовательных учреждений (СОШ)) [1-3]. Следствием данного факта является низкая загрузка (20-30% в максимальном режиме) силовых трансформаторов (СТ), питаемых жилые комплексы [4-6]. На основании многочисленных обращений строительных компаний (ПАО «ГК «Самолет», ООО СЗ «ДОМКОР», ООО «АК БАРС Инжиниринг», Capital Group, АО «ТАТЭМ» и др.), а также в соответствии с результатами анализа нормативных документов СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых

и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» (СП) и РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей» (РД) выявлена необходимость дополнить СП следующими разделами: расчет электрической нагрузки микрорайона (квартала); расчет электрических нагрузок электрических сетей 10 кВ и центров питания (ЦП).

Необходимо отметить, что СП является основным документом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ для проектирования и монтажа электроустановок жилых и общественных объектов, тогда как РД утвержден Министерством энергетики Российской Федерации.

Для подтверждения необходимости внесения изменений в СП выполнен анализ получасовых графиков электрических нагрузок на примере жилого комплекса, состоящего: МКД №1 – 536 квартир; МКД №2 – 442 квартиры; МКД №3 – 688 квартир; МКД №4 – 559 квартир; МКД №5 – 704 квартиры; ДОУ №1 – 250 воспитанников; ДОУ №2 – 240 воспитанников; СОШ – 1490 учеников (рис. 1). Каждый МКД питается от своей трансформаторной подстанции (ТП), нагрузка ДОУ и СОШ распределена по пяти ТП.

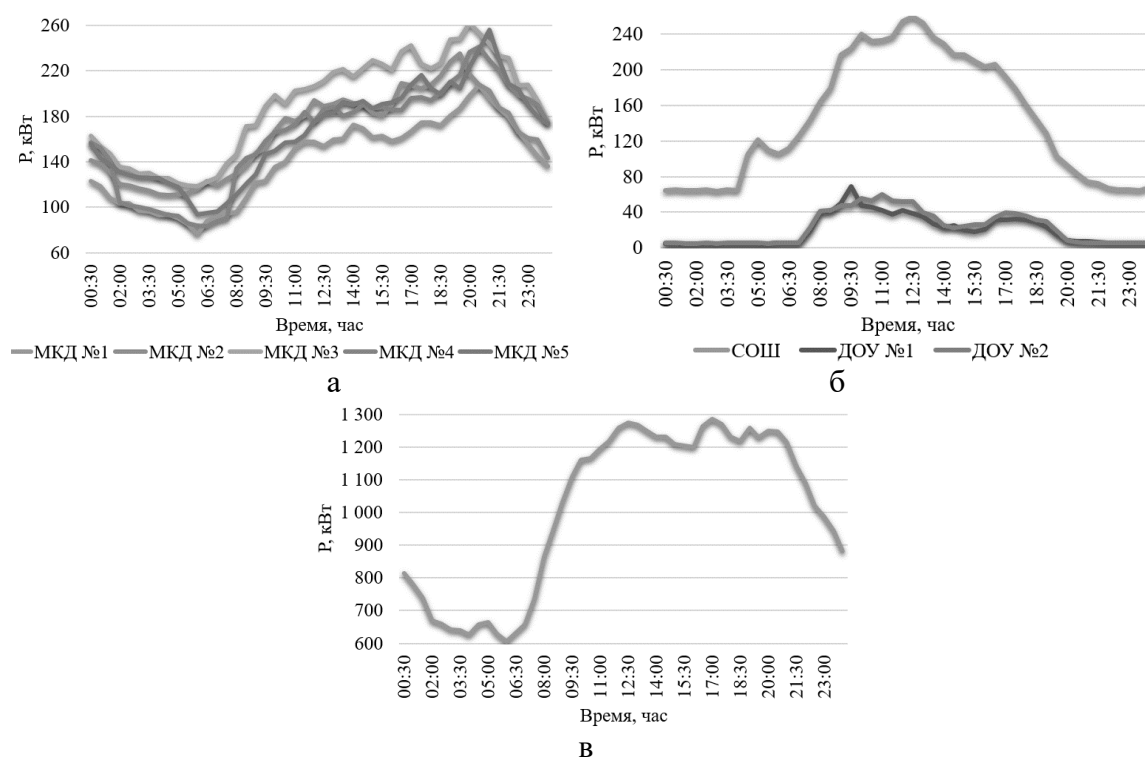


Рис. 1. Получасовые графики электрических нагрузок (а – МКД; б – СОШ и ДОУ; в – суммарный (совмещенный))

Рис. 1 демонстрирует, что максимумы электрических нагрузок имеют разные временные интервалы как для однотипных, так и для разнородных объектов.

В отличие от СП расчет электрических нагрузок городских сетей 10 кВ представлен в РД, который определяется умножением суммы расчетных нагрузок СТ отдельных ТП, присоединенных к элементу электрической сети (ЦП, рас-

пределительной подстанции, линии и др.), на коэффициент, учитывающий совмещение максимумов их нагрузок (коэффициент участия в максимуме нагрузок), принимаемый по табл. 2.4.1 РД.

Суммируя максимумы электрических нагрузок трансформаторных подстанций (рис. 1, а), б)) рассматриваемого жилого комплекса по СП, получаем 1 592 кВт (100%), в то же время максимум нагрузок суммарного (совмещенного) графика составляет 1 285 кВт (80,7%), тем самым коэффициент совмещения максимумов нагрузок СТ составляет 0,807.

Технико-экономический эффект от внедрения результатов исследования заключается в снижении капитальных расходов строительных компаний на системы электроснабжения жилых комплексов, вследствие снижения расходов на заявленные мощности трансформаторных подстанций и кабельно-проводниковую продукцию, предназначенную для строительства электрических сетей, в связи с использованием электрооборудования с меньшей мощностью и меньшим расходом электротехнических материалов.

Важно отметить, что разработка методики расчета электрической нагрузки микрорайона (квартала), в том числе расчета электрических нагрузок электрических сетей 10 кВ и центров питания (ЦП) с определением коэффициента совмещения максимумов нагрузок для разного количества СТ требует обоснования с проведением соответствующих статистических исследований с доказательством репрезентативности выборки.

Библиографический список

1. Солуянов, Ю.И. и др. Результаты статистического анализа электрических нагрузок многоквартирных домов г. Москвы // Электрические станции. – 2023. – № 2 (1099). – С. 22-28. – EDN WUEGJL.
2. Солуянов, Ю.И., Федотов, А.И., Галицкий, Ю.Я. и др. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. – 2021. – № 6. – С. 62-71. – EDN RRSRRX.
3. Солуянов, Ю.И., Федотов, А.И., Ахметшин, А.Р. и др. Исследование электрических нагрузок многоквартирных жилых комплексов в период распространения новой коронавирусной инфекции // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 2(31). – С. 57-67. – EDN OOUAON.
4. Солуянов, Ю.И., Ахметшин, А.Р., Солуянов, В.И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 47-57. – EDN LANQDE.
5. Солуянов, Ю.И., Федотов, А.И., Ахметшин А.Р. и др. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 134-147. – EDN MBYUSE.
6. Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., др. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области // Промышленная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 20-28. – DOI 10.34831/EP.2022.41.57.003. – EDN HXYLKK.

Yu.I. Soluyanov^{1,2,3}, A.I. Fedotov^{1,3}, A.R. Akhmetshin^{1,3}, V.N. Kulakov³

**DEVELOPMENT OF REGULATORY REQUIREMENTS
FOR CALCULATION OF ELECTRIC LOADS OF RESIDENTIAL
COMPLEXES ON THE EXAMPLE OF THE CITY AGGLOMERATION
«MOSCOW - MOSCOW REGION»**

Association «Roselectromontazh»¹

JSC «Tatelektromontaz»²

Kazan State Power Engineering University³

Abstract. The article deals with the development of regulatory requirements for the calculation of electrical loads of residential complexes on the example of the urban agglomeration «Moscow - Moscow region». The half-hour graphs of loads of multi-apartment residential buildings, preschool and secondary educational institutions are analyzed. It is proposed to amend SP 256.1325800.2016 "Electrical installations of residential and public buildings. Design and Installation Rules" in terms of developing a section on calculating the electrical loads of a microdistrict (quarter), including electrical networks of 10 kV residential complexes, with the development of new coefficients for combining the maximum loads of power transformers. The introduction of changes will lead to a reduction in the cost of building electrical networks in residential complexes.

Key words: blocked electric power, reserve electric power, electric power losses, energy efficiency, energy saving, power supply system, specific energy consumption.

References

- [1] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin et al. "Rezultaty statisticheskogo analiza elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh domov g. Moskvy [Results of statistical analysis of electrical loads of apartment buildings in Moscow]", *Elektricheskie stantsii [Electric stations]*, no. 2(1099), pp. 22-28, 2023 (in Russian)
- [2] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, Yu.Ya. Galitsky et al. "Aktualizatsiya normativnykh znacheniy udel'noy elektricheskoy nagruzki mnogokvartirnykh domov v Respublike Tatarstan [Updating the normative values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan]", *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 6, pp. 62-71, 2021 (in Russian)
- [3] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin et al. "Issledovaniye elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh kompleksov v period rasprostraneniya novoy koronavirusnoy infektsii [Investigation of the electrical loads of multi-apartment residential complexes during the spread of a new coronavirus infection]". *Voprosy elektrotekhnologii [Issues of electrical technology]*, no. 2(31), pp. 57-67, 2021 (in Russian)
- [4] Yu.I. Soluyanov, A.R. Akhmetshin, V.I. Soluyanov "Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok pomeshcheniy obshchestvennogo naznacheniya, vstroyennykh v zhilyye zdaniya [Actualization of specific electrical loads of public premises built into residential buildings]", *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Energy problems]*, no. 3, pp. 47-57, 2021 (in Russian)
- [5] Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R. et al. "Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok pomeshcheniy obshchestvennogo naznacheniya, vstroyennykh v zhilyye zdaniya [Analysis of the actual electrical loads of public premises built into residential buildings]",

Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Energy problems], no. 6, pp. 134-147, 2021. (in Russian)

- [6] Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., etc. “Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskovskoy oblasti [Analysis of the actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region]”, *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*, no. 4, pp. 20-28, 2022 (in Russian)

Ю.И. Солуянов^{1,2,3}, А.И. Федотов^{1,3}, А.Р. Ахметшин^{1,3}, В.И. Солуянов^{1,2,3}

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РАЗРАБОТКОЙ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ С УЧЕТОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Ассоциация «Росэлектромонтаж»¹

АО «Татэлектромонтаж»²

Казанский государственный энергетический университет³

Аннотация. В статье представлены исследования электрических нагрузок жилых и общественных зданий с последующей разработкой нормативных требований с учетом региональных особенностей. Проведен анализ получасовых удельных электрических графиков многоквартирных жилых домов г. Москвы, г. Магнитогорска, г. Казани, который показал отличие величин нагрузок. Проведен сравнительный анализ действующих нормативных требований для проектирования электрических сетей в жилищном строительстве для различных регионов. Предложено разработать удельные расчетные электрические нагрузки электроприемников квартир жилых зданий с учетом региональных и климатических особенностей на примере 6-7 регионов Российской Федерации, основываясь на опыте г. Москвы, агломерации городской «г. Москва – Московская область», Республики Татарстан.

Ключевые слова: запертая электрическая мощность, резервная электрическая мощность, потери электроэнергии, энергоэффективность, энергосбережение, система электропитания, удельное энергопотребление.

Актуализация удельных электрических нагрузок жилых и общественных зданий является важной задачей для электросетевого и строительной отраслей. Так как использование устаревших нормативных величин приводит к удорожанию систем электроснабжения, эксплуатационным затратам, в том числе повышенным потерям в силовых трансформаторах [1-3].

Важно отметить, что единых значений удельных электрических нагрузок для всей страны применять не следует, так как электропотребление и нагрузки в жилищном секторе в регионах различаются.

Этот факт также подтверждается годовым душевым потреблением электроэнергии, рис. 1 [4], имеющим региональный характер. Это может объясняться стоимостью электроэнергии, размахом среднегодовой температуры по стране (от -23 до +13), а также долготе дня, которая имеет протяженность 11,4 часа.

Как видно из рис. 1, расход электроэнергии в быту в зависимости от региона может отличаться в разы.

Для подтверждения необходимости разработки удельных электрических нагрузок с учетом региональных особенностей на рис. 2 представлены получа-

совые графики удельных электрических нагрузок, замеренные на типовых многоквартирных жилых домах (МКД) в г. Москве (рис. 2, а), г. Магнитогорске (рис. 2, б), г. Казани (рис. 2, в) за период апрель-сентябрь 2022 г.

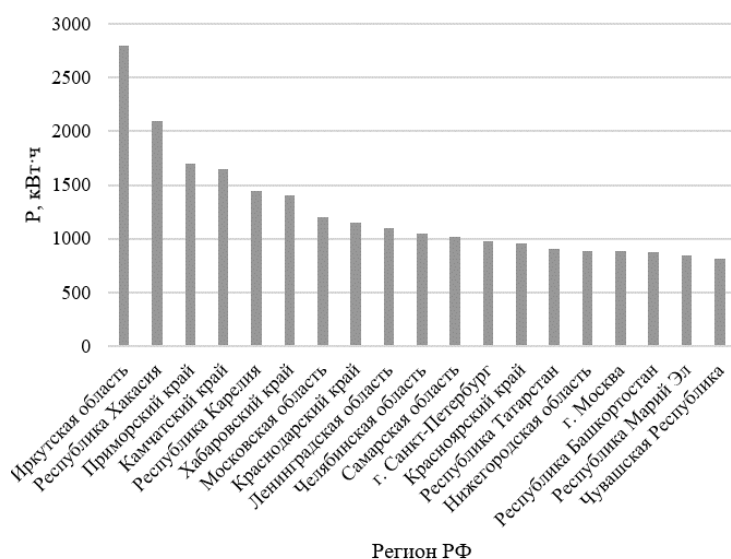


Рис. 1. Годовой душевой расход электроэнергии в быту

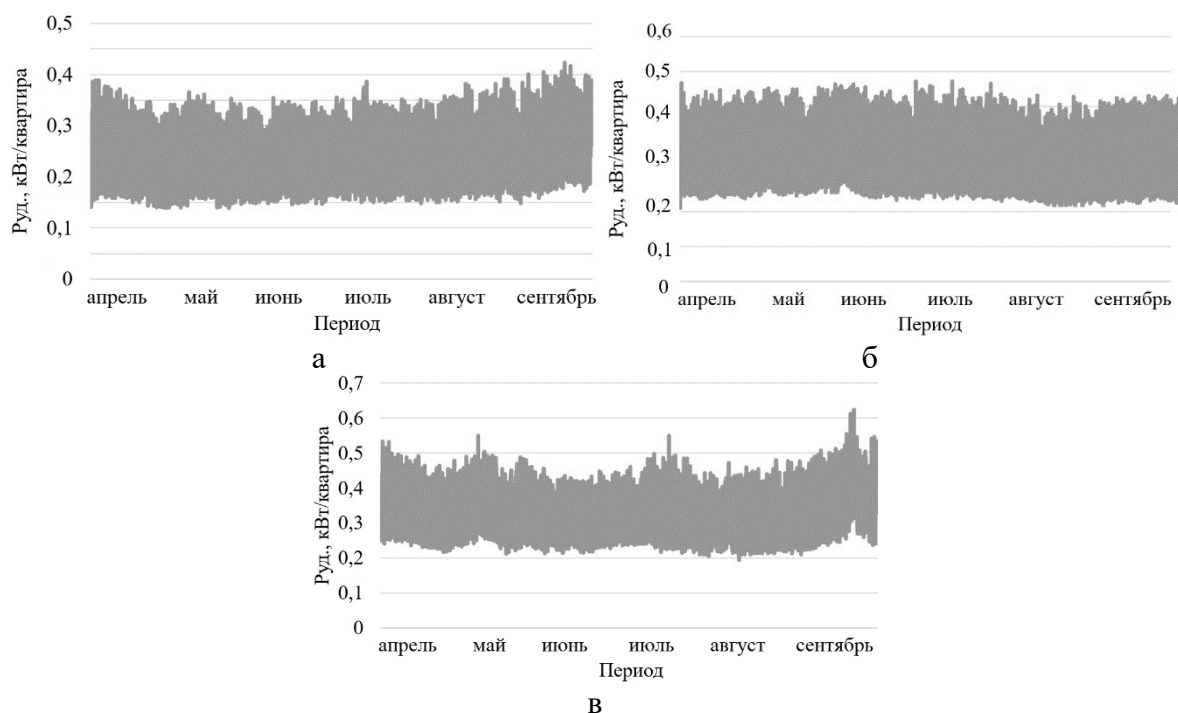


Рис. 2. Удельные электрические нагрузки МКД г. Москвы (а), г. Магнитогорска (б), г. Казани (в)

Рис. 2 демонстрирует, что уровень удельных электрических нагрузок в зависимости от города варьируется, свидетельствуя о необходимости учета регионального признака при актуализации удельных значений электрической нагрузки.

Для выполнения данной задачи Ассоциацией «Росэлектромонтаж» (Ассоциация) в 2021 г. были внесены изменения № 4 в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» (СП) в виде поправочного коэффициента ($k_{п.к.}$) для определения расчетной нагрузки жилого дома для регионов Российской Федерации (РФ) (табл. 1). Также в изменениях № 4 СП предусмотрена корректировка $k_{п.к.}$ для конкретного применения с учетом региональных условий.

Таблица 1

Поправочный коэффициент для определения расчетной нагрузки жилого дома для регионов РФ

| Регион РФ | Значение $k_{п.к.}$ |
|---|---------------------|
| Центральный федеральный округ | 0,81 |
| Северо-Западный федеральный округ; Южный федеральный округ; Северо-Кавказский федеральный округ; Приволжский федеральный округ; Уральский федеральный округ; Сибирский федеральный округ; Дальне-восточный федеральный округ. | 0,91 |

По результатам двухлетней научно-исследовательской работы по актуализации удельных значений электрических нагрузок для г. Москвы и Московской области в 2022 г. были подготовлены изменения № 6 в СП, в которых появилась возможность введения городских агломераций. Удельные расчетные электрические нагрузки электроприемников квартир жилых зданий для агломерации городской «г. Москва – Московская область» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Удельная расчетная электрическая нагрузка электроприемников квартир жилых зданий для агломерации городской «г. Москва – Московская область», кВт/квартира

| Потребители электроэнергии | Удельная расчетная электрическая нагрузка при количестве квартир | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| | 1-5 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 24 | 40 | 60 | 100 | 200 | 400 | 600 | 1000 | 1500 | 2000 |
| Квартиры с плитами: - на газе | 3,65 | 2,27 | 1,86 | 1,62 | 1,46 | 1,34 | 1,13 | 0,97 | 0,85 | 0,69 | 0,62 | 0,58 | 0,56 | 0,54 | 0,53 | 0,53 |
| -электрическими, мощностью 8,5 кВт | 8,1 | 4,11 | 3,07 | 2,6 | 2,26 | 2,1 | 1,78 | 1,31 | 1,05 | 0,88 | 0,82 | 0,72 | 0,61 | 0,598 | 0,58 | 0,57 |

Помимо СП существуют региональные нормативы, регламентирующие уровень удельных электрических нагрузок:

- методика расчета электрических нагрузок многоквартирных домов, разработанная по заказу Департамента градостроительной политики г. Москвы в рамках государственного контракта от 22.01.2018 № ДГП 18-05-Р. Разработчик: ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» (Методика);

- постановление КМ РТ от 27 декабря 2013 г. N 1071 «Об утверждении республиканских нормативов градостроительного проектирования Республики Татарстан» (с изменениями и дополнениями) (Постановление).

Стоит отметить, что в ряде случаев существуют проблемы при прохождении экспертизы в надзорных органах, так как основным документом для проектирования электроустановок жилых и общественных зданий является СП.

На рис. 3 представлено сравнение удельных электрических нагрузок электроприемников квартир жилых зданий, указанных в нормативных документах федерального и регионального уровней.

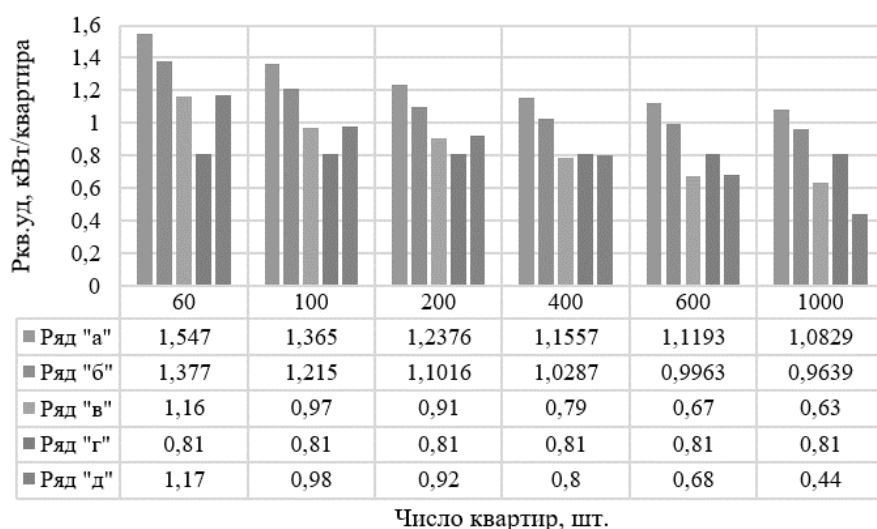


Рис. 3. Значения удельных расчетных электрических нагрузок электроприемников квартир жилых зданий (Ряд «а» – СП с $k_{п.к.}=0,91$; Ряд «б» – $k_{п.к.}=0,81$; Ряд «в» – СП агломерация городская «г. Москва – Московская область»; Ряд «г» – Постановление; Ряд «д» – Методика)

Рис. 3 демонстрирует расхождение нормативных значений, которые отличаются более чем на 50%. Поправочные коэффициенты 0,81 и 0,91 нуждаются в пересмотре с учетом региональных отличий. Необходимо выделить Постановление (ряд «г», рис. 3), в котором применен кластерный метод, недостаток которого заключается в том, что удельное значение электрических нагрузок не зависит от количества квартир.

Предлагается разработать проект изменений в СП для учета региональных характеристик с актуализацией удельных расчетных электрических нагрузок электроприемников квартир жилых зданий на примере городской агломерации «г. Москва – Московская область» на основании статистических исследований с доказательством достаточности выборки. Уменьшение разрыва между реальными и рассчитанными электрическими нагрузками приведет к значительному экономическому эффекту за счет уменьшения стоимости технологического присоединения и сокращения эксплуатационных затрат, включая потерь в СТ.

Библиографический список

1. **Солуянов, Ю.И.**, Федотов, А.И., Ахметшин, А.Р. и др. Результаты статистического анализа электрических нагрузок многоквартирных домов г. Москвы // Электрические станции. – 2023. – № 2(1099). – С. 22-28. – EDN WUEGJL.
2. **Солуянов, Ю.И.**, Федотов А.И., Галицкий Ю.Я. и др. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. – 2021. – № 6. – С. 62-71. – EDN RRSRRX.
3. **Солуянов, Ю.И.**, Федотов, А.И., Ахметшин, А.Р. и др. Исследование электрических нагрузок многоквартирных жилых комплексов в период распространения новой коронавирусной инфекции // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 2(31). – С. 57-67. – EDN OOUAON.
4. **Антонов, Н.В.**, Евдокимов, М.Ю., Чичеров, Е.А. Проблемы в оценке региональной дифференциации потребления электроэнергии в бытовом секторе России // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. – 2019. – № 4. – С. 53-71. – DOI: 10.18384/2310-7189-2019-4-53-71
5. **Солуянов, Ю.И.** Ахметшин, А.Р., Солуянов В.И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 47-57. – EDN LANQDE.
6. **Солуянов, Ю.И.**, Федотов, А.И., Ахметшин, А.Р. и др. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 134-147. – EDN MBYUSE.
7. **Солуянов, Ю.И.**, Федотов, А.И., Ахметшин, А.Р., др. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области // Промышленная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 20-28. – DOI 10.34831/EP.2022.41.57.003. – EDN HXYLKK.

Yu.I. Soluyanov^{1,2,3}, A.I. Fedotov^{1,3}, A.R. Akhmetshin^{1,3}, V.I. Soluyanov^{1,2,3}

STUDY OF ELECTRICAL LOADS OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS WITH THE FURTHER DEVELOPMENT OF REGULATORY REQUIREMENTS TAKING INTO ACCOUNT REGIONAL PECULIARITIES

Association «Roselectromontazh»¹
JSC «Tatelectromontazh»²
Kazan State Power Engineering University³

Abstract. The article presents studies of the electrical loads of residential and public buildings with the subsequent development of regulatory requirements, taking into account regional characteristics. The analysis of half-hour specific electrical graphs of multi-apartment residential buildings in Moscow, Magnitogorsk, Kazan was carried out, which showed the difference in load values. A comparative analysis of the current regulatory requirements for the design of electrical networks in housing construction for various regions has been carried out. It is proposed to develop the specific design electrical loads of electrical receivers of apartments in residential buildings, taking into account regional and climatic features, using the example of 6-7 regions of the Russian Federation, based on the experience of Moscow, the urban agglomeration "Moscow – Moscow Region", Republic of Tatarstan.

Key words: blocked electric power, reserve electric power, electric power losses, energy efficiency, energy saving, power supply system, specific energy consumption.

References

- [1] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin et al. “Rezultaty statisticheskogo analiza elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh domov g. Moskvy [Results of statistical analysis of electrical loads of apartment buildings in Moscow]”, *Elektricheskie stantsii [Electric stations]*, no. 2(1099), pp. 22-28, 2023 (in Russian)
- [2] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, Yu.Ya. Galitsky et al. “Aktualizatsiya normativnykh znacheniy udel'noy elektricheskoy nagruzki mnogokvartirnykh domov v Respublike Tatarstan [Updating the normative values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan]”, *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 6, pp. 62-71, 2021 (in Russian)
- [3] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin et al. “Issledovaniye elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh kompleksov v period rasprostraneniya novoy koronavirusnoy infektsii [Investigation of the electrical loads of multi-apartment residential complexes during the spread of a new coronavirus infection]”. *Voprosy elektrotekhnologii [Issues of electrical technology]*, no. 2(31), pp. 57-67, 2021 (in Russian)
- [4] Antonov N.V., Evdokimov M.Yu., Chicherov E.A. “Problemy v znachitel'noy differentsiatsii potrebleniya elektroenergii v bytovom reyestre Rossii [Problems in Significant Differentiation of Electricity Consumption in the Household Register of Russia]” // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki [Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences]*, no. 4, pp. 53–71, 2019 (in Russian)
- [5] Yu.I. Soluyanov, A.R. Akhmetshin, V.I. Soluyanov “Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok pomeshcheniy obshchestvennogo naznacheniya, vstroyennykh v zhilyye zdaniya [Actualization of specific electrical loads of public premises built into residential buildings]”,

Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Energy problems], no. 3, pp. 47-57, 2021 (in Russian)

- [6] Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R. et al. “Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok pomeshcheniy obshchestvennogo naznacheniya, vstroyennykh v zhilyye zdaniya [Analysis of the actual electrical loads of public premises built into residential buildings]”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Energy problems]*, no. 6, pp. 134-147, 2021. (in Russian)
- [7] Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., etc. “Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskovskoy oblasti [Analysis of the actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region]”, *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*, no. 4, pp. 20-28, 2022 (in Russian)

М.В. Убасева¹, Е.С. Воробьев^{1,2}, В.И. Антонов^{2,3}, А.В. Солдатов^{2,3}

РАСПОЗНАВАНИЕ СЛАГАЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА МАЛОМ ЧИСЛЕ ОТСЧЕТОВ СИГНАЛА

ООО «ЭКРА ИТ»¹
ЧГУ им. И.Н. Ульянова²
ООО НПП «ЭКРА»³

Аннотация. В статье рассматриваются методы распознавания слагаемых электрической величины на коротком окне наблюдения на основе адаптивного фильтра с распределенной структурой. Предлагается схема совместной обработки сигналов по измерениям от различных устройств. Преимущества методов демонстрируется на примере оценивания параметров основной гармоники.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, структурный анализ сигналов, адаптивный фильтр с распределенной структурой, канонический фильтр составляющей сигнала, фильтр остаточного сигнала, совместная обработка сигналов.

Релейная защита и ОМП в сетях с быстродействующими выключателями распознают слагаемые электрической величины на малой выборке отсчетов сигнала. Основным инструментом для обработки электрического сигнала обычно в них является фильтр Фурье. Однако его недостаток заключается в появлении значительной погрешности в оценке основной гармоники, если в электрической величине присутствует апериодическая составляющая.

Известен способ выделения слагаемых электрической величины [1], согласно которому итерационно настраивают многозвенный адаптивный фильтр на полное подавление электрической величины и по корням характеристического уравнения фильтра определяют характеристические параметры слагаемых. Коэффициенты a_m адаптивного фильтра подбираются таким образом, чтобы сигнал на выходе фильтра (невязка)

$$e(k) = \sum_{m=0}^M a_m x(k-m)$$

не содержал составляющих цифрового образа полезного сигнала, M – порядок фильтра [2 – 5]. Про такой фильтр говорят, что он настроен на полное подавление сигнала $x(k)$.

Однако для эффективного распознавания структуры сигнала, содержащего множество гармоник, апериодическую составляющую и шумы, требуется адаптивный фильтр высокого порядка. Это приводит к увеличению окна наблюдения и, следовательно, к снижению быстродействия способа.

В работе рассматриваются новые быстродействующие методы распознавания составляющих электрической величины, способные работать на малом числе отсчетов сигнала.

Адаптивный фильтр с распределенной структурой

При распознавании сигнала, представленного на относительно коротком окне наблюдения, адаптивный фильтр с распределенной структурой превосходит классический адаптивный фильтр по разрешающей способности [6 – 7]. Он состоит из каскада последовательно соединенных канонических фильтров компонентов распознаваемого сигнала $C_1 - C_{M_c}$ (M_c – число фильтров), таких как апериодическая составляющая и/или 1-я, 3-я, 5-я гармоники, и фильтра остаточного сигнала F_r (рис. 1).

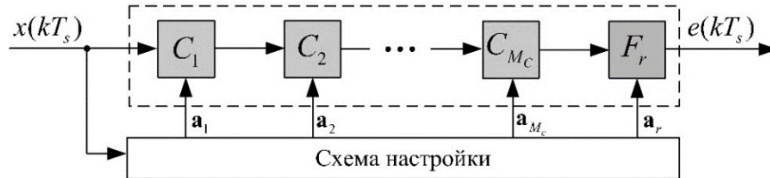


Рис. 1. Адаптивный фильтр с распределенной структурой:

$C_1 - C_{M_c}$ – канонические фильтры компонентов, F_r – фильтр остаточного сигнала

Настройка фильтра осуществляется итерационно в многоканальной схеме настройки (рис. 2), на каждом этапе σ добиваясь оптимальности решения. Каждый канал представляет собой составной фильтр компонента, который образуется в результате исключения из общего фильтра (рис. 1) заграждающего фильтра формируемого компонента. Поэтому для настройки каждого из фильтров доступно большее число уравнений (невязок), чем это возможно при настройке классического адаптивного фильтра.

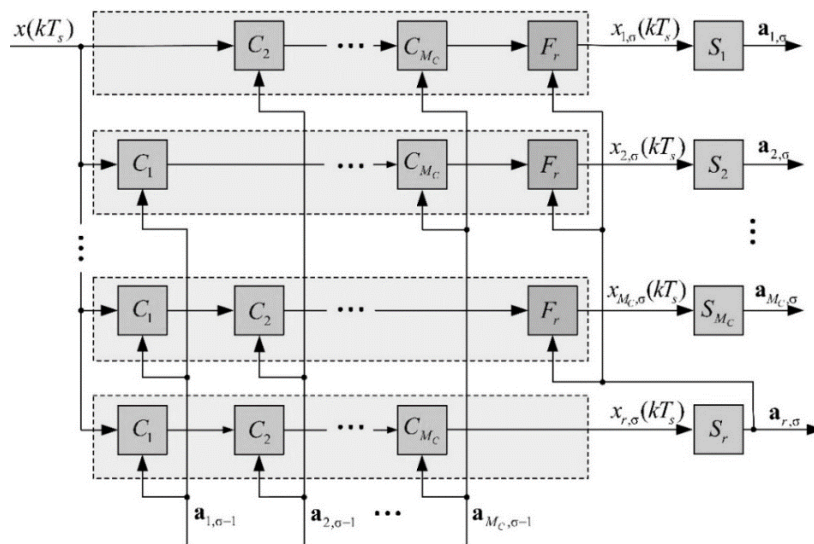


Рис. 2. Схема настройки адаптивного фильтра:

$S_1 - S_{M_c}$ – блоки настройки канонических фильтров компонентов, S_r – блок настройки фильтра остаточного сигнала, σ – этап настройки

Все фильтры настраиваются в своих блоках настройки: канонические фильтры в блоках S_i ($i = \overline{1, M_c}$), а фильтр остаточного сигнала F_r – в блоке S_r .

При этом методы настройки фильтров могут быть различными. Наиболее прост метод наименьших квадратов [4].

Очевидно, что чем точнее настраивается любой канонический фильтр на заграждение своего компонента, тем лучшие условия создаются для настройки остальных канонических фильтров и фильтра остаточного сигнала. Благодаря этому свойству, многоканальная структура настройки адаптивного фильтра приобретает своеобразный эффект положительной обратной связи, повышая сходимость процедуры настройки отдельных частей адаптивного фильтра.

Качество настройки адаптивного фильтра контролируют по уровню целевой функции $E(\sigma)$, которую задают, например, в виде абсолютного значения разности евклидовых норм векторов коэффициентов адаптивного фильтра на текущей σ и предыдущей $(\sigma-1)$ итерациях настройки:

$$E(\sigma) = \sum_{i=1}^{M_c} |\|a_i^\sigma\|_E - \|a_i^{\sigma-1}\|_E|.$$

Считается, что достигнут необходимый уровень качества настройки, если значение целевой функции $E(\sigma)$ не превышает заданного порога $E_{t\Box} > 0$.

Совместная обработка сигналов

Подсистемы сбора и долгосрочного хранения информации многих интеллектуальных систем управления концентрируют в себе множество файлов осциллограмм одних и тех же аварийных процессов от различных цифровых устройств РЗА. Как следствие, одна и та же электрическая величина оказывается представленной в виде множества цифровых сигналов.

Несмотря на то, что такие сигналы получены путем преобразования одной и той же электрической величины, они могут отличаться за счет различных дополнительных составляющих, вызванных измерителями, искажениями в тракте АЦП и шумами. В результате, в моделях сигналов появляются лишние компоненты, не относящиеся к распознаваемому сигналу, но идентифицируемые как часть полезного сигнала. Это приводит к тому, что при обработке этих сигналов по отдельности возникнет множественность невзаимосвязанных решений.

С целью достижения единственности решения при выделении слагаемых электрической величины, а также минимизации числа отсчетов, необходимых для настройки адаптивного фильтра, предлагается использование совместной настройки адаптивных фильтров всех цифровых сигналов $x^n (kT_s^n)$, где $n = \overline{1, N}$, N – число сигналов [8]. Схема совместной настройки адаптивных фильтров для оценки параметров основной гармоник по двум цифровым сигналам представлена на рис. 3.

Для обеспечения взаимосвязанности решений в схеме настройки адаптивного фильтра n -го цифрового сигнала используются канонические фильтры компонентов, настроенные на подавление другого $(n-1)$ -го цифрового сигнала, поскольку, по сути, они настраиваются на заграждение одной и той же электрической величины (рис. 3).

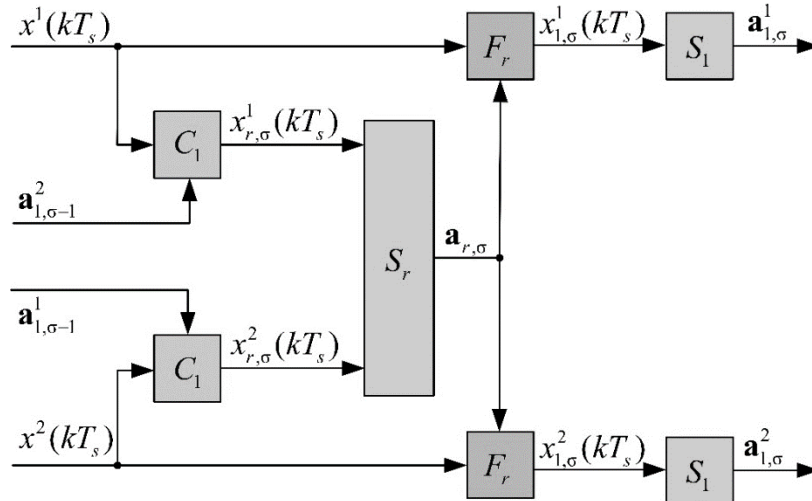


Рис. 3. Схема совместной настройки адаптивных фильтров

А фильтр остаточного сигнала F_r принимают единым для адаптивных фильтров всех цифровых сигналов и настраивают в общем блоке настройки S_r , в котором вектор коэффициентов $\mathbf{a}_{r,\sigma}$ ищут как решение системы

$$\mathcal{N}_{r,\sigma} \mathbf{a}_{r,\sigma} = \beta_{r,\sigma},$$

при этом его траекторную матрицу

$$\mathcal{N}_{r,\sigma} = \begin{bmatrix} X_{r,\sigma}^1 \\ \vdots \\ X_{r,\sigma}^N \end{bmatrix}$$

и вектор наблюдения

$$\beta_{r,\sigma} = \begin{bmatrix} b_{r,\sigma}^1 \\ \vdots \\ b_{r,\sigma}^N \end{bmatrix}$$

получают путем вертикальной конкатенации траекторных матриц, полученных для всех остаточных сигналов

$$X_{r,\sigma}^n = \begin{bmatrix} x_{r,\sigma}^n(k - M_r - L_r + 1) & x_{r,\sigma}^n(k - M_r - L_r + 2) & \cdots & x_{r,\sigma}^n(k - L_r) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{r,\sigma}^n(k - M_r) & x_{r,\sigma}^n(k - M_r + 1) & \cdots & x_{r,\sigma}^n(k - 1) \end{bmatrix} \in R^{L_r \times M_r},$$

и векторов наблюдения

$$b_{r,\sigma}^n = [x_{r,\sigma}^n(k - L_r + 1), x_{r,\sigma}^n(k - L_r + 2), \dots, x_{r,\sigma}^n(k)]^T \in R^{L_r},$$

где L_r – число уравнений,

M_r – порядок фильтра остаточного сигнала F_r .

Такой подход искусственно увеличивает окно наблюдения, что позволяет выделить слагаемые электрической величины на коротких отрезках сигнала.

Вычислительный эксперимент

Сравним быстродействие распознавания основной гармоники классическим адаптивным фильтром и фильтром с распределенной структурой для тестового сигнала с шумом $w(t)$, отсчеты которого представлены в [4].

$$x(t) = 2,73 \cos(2\pi 50,18t + 2,77) + 0,089 \cos(2\pi 150,54t + 2,02) + 2,29e^{-72t} + w(t),$$

где $f_1 = 50,18$ Гц и $f_3 = 150,54$ Гц – частоты основной и третьей гармоник, $\alpha = 72$ с⁻¹ – коэффициент затухания апериодической составляющей.

Если оценивание частоты основной гармоники тестового сигнала с точностью 0,1 Гц под силу классическому фильтру при порядке $M = 12$ и ширине окна наблюдения в 24 отсчета (оценка частоты 50,19 Гц), то фильтру с распределенной структурой, состоящему из каскада канонического фильтра основной гармоники и фильтра остаточного сигнала порядка $M_r = 10$, удается справиться с этой задачей на окне наблюдения размером в 23 отсчета (оценка частоты 50,18 Гц).

При совместной обработке однородного цифрового сигнала

$$x(t) = 2,73 \cos(2\pi 50,18t + 2,77) + 0,089 \cos(2\pi 150,54t + 2,02) + 2,29e^{-72t}$$

с различным уровнем шумов

$$x_1(t) = x(t) + w_1(t),$$

$$x_2(t) = x(t) + w_2(t),$$

минимальная ширина окна наблюдения составляет 19 отсчетов (оценка частоты 50,22 Гц), что подтверждает превосходство метода совместной настройки адаптивных фильтров всех цифровых сигналов перед классическим методом настройки фильтра при распознавании слагаемых электрической величины.

Выводы

Применение распределенной структуры адаптивного фильтра создает благоприятные условия для распознавания структуры сигнала на небольшой выборке отсчетов за счет отдельной настройки структурных единиц фильтра. При наличии измерений от различных устройств уменьшение числа отсчетов, необходимого для настройки адаптивного фильтра, достигается благодаря виртуальному увеличению окна наблюдения за счет использования совместной настройки общей модели некоторых компонентов сигнала.

Библиографический список

1. **Иванов, С.В.** Оценка параметров элементарных компонентов электрической величины по малому числу отсчетов / С.В. Иванов, Ю.Я. Лямец, Ф.А. Макашкин // Электротехника. – 2020. – № 3. – С. 59-67.
2. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
3. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети: монография / [Антонов В.И. и др.]. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 324 с.
4. **Антонов, В.И.** Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В. И. Антонов. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – 334 с.
5. **Антонов, В.И.** Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.Н. Кудряшова [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2 (35). – С. 18-27
6. **Vorobyev, E.** Fundamentals of Multichannel Structural Analysis of Electrical Signals / E. Vorobyev, V. Antonov, N. Ivanov [et al.] // Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 ноября 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – DOI 10.1109/USSEC53120.2021.9655762

7. **Воробьев, Е.С.** Многоканальный адаптивный структурный анализ / Е.С. Воробьев, В.И. Антонов, Н.Г. Иванов [и др.] / Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: Материалы научно-технической конференции молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021», Чебоксары, 20–22 апреля 2021 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. – С. 114-120
8. **Убасева, М.В.** Распознавание слагаемых электрической величины по измерениям от различных устройств / М.В. Убасева, Е.С. Воробьев, В.С. Петров, В.И. Антонов / Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2023»; Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары, 2023. – С. 134-139

M.V. Ubaseva¹, E.S. Vorobyev^{1,2}, V.I. Antonov^{2,3}, A.V. Soldatov^{2,3}

RECOGNITION OF TERMS OF AN ELECTRICAL QUANTITY ON A SMALL NUMBER OF SIGNAL SAMPLES

EKRA IT Ltd¹
Chuvash State University²
R&P EKRA Ltd³

Abstract. The article discusses methods for recognizing the terms of an electric quantity on a short observation window based on an adaptive filter with a distributed structure. A scheme of joint signal processing based on measurements from various devices is proposed. The advantages of the methods are demonstrated by the example of estimating the parameters of the fundamental harmonic.

Key words: digital signal processing, structural analysis of signals, adaptive filter with distributed structure, canonical filter of signal component, residual signal filter, joint signal processing.

References

- [1] Ivanov, S.V. Estimation of parameters of elementary components of an electric quantity by a small number of counts / S.V. Ivanov, Yu.Ya. Lyametz, F.A. Makashkin // *Electrical Engineering*. – 2020. – No. 3. – pp. 59-67.
- [2] *Adaptive filters* / Ed. C.F.N. Cowan and P.M. Grant. - M.: Mir, 1988. - 392 p.
- [3] *Fundamentals of relay protection and automation of intelligent electrical network: monograph* / [Antonov V.I. et al.]. – Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2023. – 324 p.
- [4] Antonov, V.I. Adaptive structural analysis of electric signals: the theory and its applications in intellectual power engineering / V.I. Antonov. – Cheboksary: Chuvash State University. –2018. – 334 p. ISBN 978-5-7677-2571-7
- [5] Antonov V.I. An adaptive structural analysis of electric signals: the theory for the engineer / V.I. Antonov, V.A. Naumov, M.N. Kudryashova [et al.] // *Relay protection and automation*. – 2019. – № 2(35). – Pp. 18-27
- [6] Vorobyev E. Fundamentals of Multichannel Structural Analysis of Electrical Signals / E. Vorobyev, V. Antonov, N. Ivanov [et al.] // *Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021, Novosibirsk, November 13-15, 2021*. – Novosibirsk, 2021. – DOI 10.1109/USSEC53120.2021.9655762
- [7] Vorobyev E.S. Multichannel adaptive structural analysis / E.S. Vorobyev, V.I. Antonov, N. G. Ivanov [et al.] // *Modern trends in the development of digital relay protection and automation systems: Materials of the scientific and technical conference of young specialists within the framework of the forum "RELAVEXPO-2021"*, Cheboksary, April 20-22, 2021. Cheboksary: I.N. Ulyanov Chuvash State University, 2021. – pp. 114-120
- [8] Ubaseva, M.V. Recognition of terms of electrical magnitude by measurements from various devices / M.V. Ubaseva, E.S. Vorobyev, V.S. Petrov, V.I. Antonov // *Modern trends in the development of digital relay protection and automation systems: materials of scientific and technical conference of young specialists of the forum "RELAVEXPO-2023"*; I.N. Ulyanov Chuvash State University. – Cheboksary, 2023. – pp. 134-139

А.Н. Фитасов¹, А.С. Петрицкий¹, С.А. Мамонов¹

ПРИМЕНЕНИЕ КАРТ ШУХАРТА ДЛЯ АНАЛИЗА ОТКЛОНЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье исследуется применение статистического метода контроля качества выпускаемой продукции с использованием контрольных карт применительно к мониторингу показателей качества электрической энергии (ПКЭ), на примере отклонения частоты. На примере данных отклонения частоты анализируются результаты выборочного контроля при определении динамики изменения ПКЭ. Приведен пример применения R и X карт Шухарта для анализа отклонения напряжения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, мониторинг, контрольные карты.

Введение

При выпуске продукции для оценки качества используются статистические методы контроля качества. Статистический контроль можно разделить на два вида. Первый вид статистического контроля – текущий контроль производственного процесса методами математической статистики. Второй вид контроля используется при приемочных работах, пооперационном и окончательном контроле предприятия с целью проверки готовых изделий. При втором виде контроля применяются математико-статистические методы выборочного контроля. Техническим вспомогательным средством статистического регулирования является контрольная карта, позволяющая наглядно отразить ход производственного процесса на диаграмме и таким образом выявить нарушения технологии, т.е. предотвратить появление брака продукции.

Применение статистических методов для управления и контроля производимой продукции нашло применение в различных сферах промышленного производства, медицине, анализе бизнеса и т.п. [1,2,3]. Статистических методов контроля и управления разработано достаточно много. Как правило, наиболее известными являются схемы характерных факторов и причинных связей - схема Исикава, диаграмма Парето, карты Шухарта, гистограммы и т.д. [4,5].

Постановка задачи

Для обеспечения высокой оперативности, гибкости (адаптивности) и устойчивости системы электроснабжения должны быть обеспечены системами мониторинга, которые контролировали бы показатели качества электрической энергии и системами, которые на основании данных, полученных от систем мониторинга могли бы осуществлять управляющее воздействие на системы для

приведения показателей качества к диапазонам нормативных величин в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [6,7].

Величина частоты является основным системным параметром функционирования системы электроснабжения в нормальном режиме, так же величину частоты как показатель ПКЭ, можно рассматривать как продукцию в области электроэнергетики, а отклонение частоты как допуски к параметру продукции. Показатель качества электрической энергии как отклонение частоты, можно рассматривать как продукцию в области электроэнергетики.

Рассмотрим применение контрольных карт количественных данных для анализа отклонения частоты. Ранее подобные исследования по применению контрольных карт при отклонении напряжения приводились в статье [8]. Данные по частоте взяты из свободного доступа в электронном виде с сайта системного оператора единой энергетической системы, с 03-07.09.2021 [9]. Для анализа по контрольным картам было принято 120 значений частоты за указанный период. На рис. 1 приведен график изменения частоты на указанном интервале.

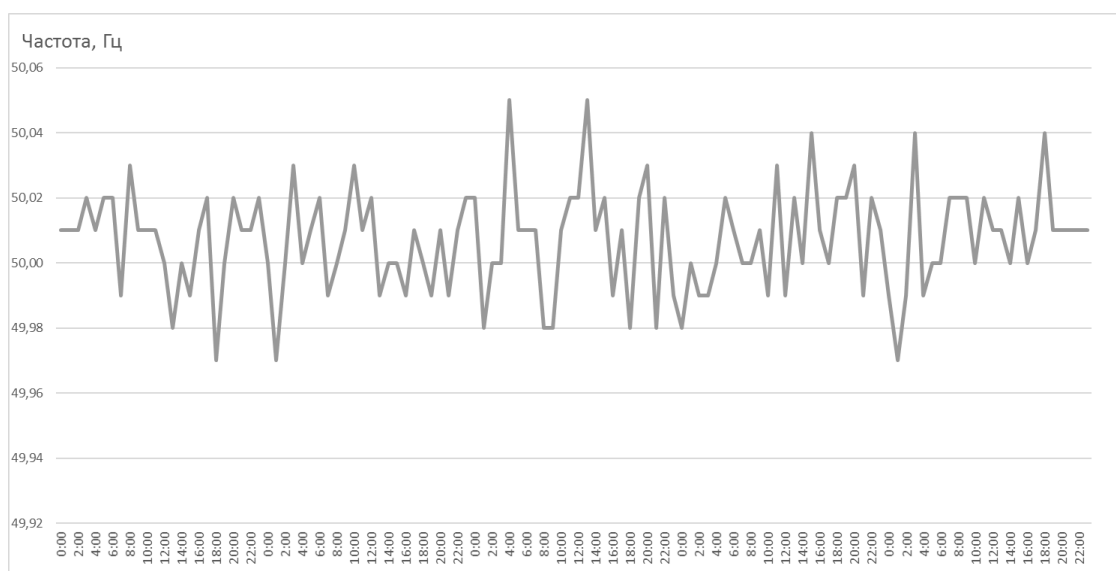


Рис. 1. Изменение частоты в период с 03-07.09.2021

На основе полученных фактических значений величин отклонения частоты предлагается провести анализ с применением статистического метода анализа данных. Отметим, что при анализе принимается допущение, что величина отклонения частоты носит случайный характер и имеет нормальный закон распределения, т.е. отклонения ПКЭ относительно средней величины будут носить тоже нормальный закон распределения. Как уже было приведено выше методика построения контрольных карт приведена [8].

Пример анализа отклонения частоты по картам Шухарта

Данные по частоте, взятые из свободного доступа в электронном виде с сайта системного оператора единой энергетической системы, за 03-07.09.2021, были преобразованы в выборки 24 шт. по 5 значений в выборке. Преобразованные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пример преобразования данных для анализа по количественным контрольным картам

| Наименование | Частота в Гц | | | | | |
|---------------|--------------|--------|--------|--------|---|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | - | 25 |
| Номер выборки | | | | | | |
| X1 | 50,01 | 50,02 | 50,01 | 49,99 | - | 50,01 |
| X2 | 50,01 | 50,02 | 50,01 | 50,01 | - | 50,01 |
| X3 | 50,01 | 49,99 | 50,00 | 50,02 | - | 50,01 |
| X4 | 50,02 | 50,03 | 49,98 | 49,97 | - | 50,01 |
| X5 | 50,01 | 50,01 | 50,00 | 50,00 | - | 50,01 |
| | | | | | - | |
| сумма X_i | 250,06 | 250,07 | 250,00 | 249,99 | - | 250,05 |
| среднее X | 50,01 | 50,01 | 50,00 | 50,00 | - | 50,01 |
| Разброс R | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | - | 0,00 |

Величина среднего X для каждой выборки определяется по выражению:

$$X_{\text{сред}} = \frac{\sum X_i}{n}, \tag{1}$$

где X_i – величина значения частоты в Гц в одной выборке; n – количество величин X_i в одной выборке, в данном примере равно 5.

Величина разброса R для каждой выборки определяется по выражению:

$$R_{\text{разброс}} = X_{i \text{ макс}} - X_{i \text{ мин}}, \tag{2}$$

где $X_{i \text{ макс}}$ – величина максимального значения частоты в Гц в одной выборке; $X_{i \text{ мин}}$ – величина минимального значения частоты в Гц в одной выборке.

Определив средние значения частоты и разброс частоты по выборкам переходим к построению карт Шухарта. Карты Шухарта для количественных данных могут составляться в нескольких вариациях в зависимости от того какие данные представлены.

Составим карты Шухарта, когда не задана центральная величина и стандартное отклонение частоты, при этом отклонение частоты $\pm 0,2$ Гц будет использоваться для расчета «браковочных границ», т.е. выход величины средних за эти границы будем считать «браком». Как уже было написано выше отклонение частоты $\pm 0,4$ Гц не будем рассматривать в данном примере. Центральная величина и стандартное отклонение будет определяться по фактическим данным. При расчетах будут использоваться коэффициенты в соответствии с литературой [10, 11], соответствующие величине 5 количество элементов в одной выборке.

Построение карт Шухарта в данном случае начнем с R-карты. Рассчитаем центральную величину, верхние и нижние границы карт по выражениям.

$$CL_R = R_{\text{среднее}} = \frac{\sum R_{\text{разброс } i}}{k}, \tag{3}$$

$$UCL_R = D_4 * R_{\text{среднее}}, \tag{4}$$

$$LCL_R = D_3 * R_{\text{среднее}}, \tag{5}$$

где $R_{\text{разброс } 1}$ – средний разброс в единичной выборке определяемый по выражению (2); k – количество выборок, в данном примере 24; D_4, D_3 – коэффициенты, используемые в расчете [10, 11] при количестве элементов в выборке 5 шт.

Проведем расчет верхних и нижних границ зон В, С для карты размахов. Границы зон определяются по выражения:

$$C_R = R_{\text{среднее}} \left(1 \pm \frac{d_3}{d_2} \right), \quad (6)$$

$$B_R = R_{\text{среднее}} \left(1 \pm \frac{2*d_3}{d_2} \right). \quad (7)$$

Границами зоны А будут являться верхняя и нижняя граница карты размахов, соответственно UCL_R и LCL_R .

Для построения X-карты необходимо провести подобные расчеты. Рассчитаем центральную величину, верхние и нижние границы карт по выражениям.

$$CL_X = X_0 = \frac{\sum X_{\text{среднее } i}}{k}, \quad (8)$$

$$UCL_X = X_0 + A_2 * R_{\text{среднее}}, \quad (9)$$

$$LCL_X = X_0 - A_2 * R_{\text{среднее}}, \quad (10)$$

где $X_{\text{среднее}}$ – средняя величина единичной выборке, определяемый по выражению (1); k – количество выборок, в данном примере 24; A_2 – коэффициент, используемый в расчете [10, 11] при количестве элементов в выборке 5 шт.

Определяем верхние и нижние границ зон В, С для карты размахов. Границы зон определяются по выражения:

$$C_X = X_0 \pm \frac{A_2 * R_{\text{среднее}}}{3}, \quad (11)$$

$$B_X = X_0 \pm \frac{2 * A_2 * R_{\text{среднее}}}{3}. \quad (12)$$

Границами зоны А будут являться верхняя и нижняя граница карты размахов, соответственно UCL_X и LCL_X .

Для карт средних значений необходимо провести расчет браковочных границ. Верхняя и нижняя браковочные границы определяются по выражениям:

$$B\Gamma_{\text{верхняя } X} = \left(T_{\text{в}} - \frac{3 * R_{\text{среднее}}}{d_2} \right) + A_2 * R_{\text{среднее}}, \quad (13)$$

$$B\Gamma_{\text{нижняя } X} = \left(T_{\text{н}} + \frac{3 * R_{\text{среднее}}}{d_2} \right) - A_2 * R_{\text{среднее}}, \quad (14)$$

где $T_{\text{в}}, T_{\text{н}}$ – стандартное отклонение частоты $\pm 0,2$ Гц в синхронизированных системах электроснабжения в течение 95 % времени интервала в одну неделю.

Построение начинается с R-карты, потом строится X-карты. На рис. 2 приведена диаграммы R-карты, на рис. 3 X карты.

Проведем анализ контрольных карт среднего и размахов частоты по восьми признакам в соответствии с [10,11] на статическую управляемость процесса. Проверка X-карт и R- карт по восьми признакам на статическую управляемость или неуправляемость процесса показала, что все критерии дали отрицательный результата, т.е. не выполняются. Невыполнение критериев означает, что процесс статически управляемый и контролируема величина не выйдет за допустимые границы.

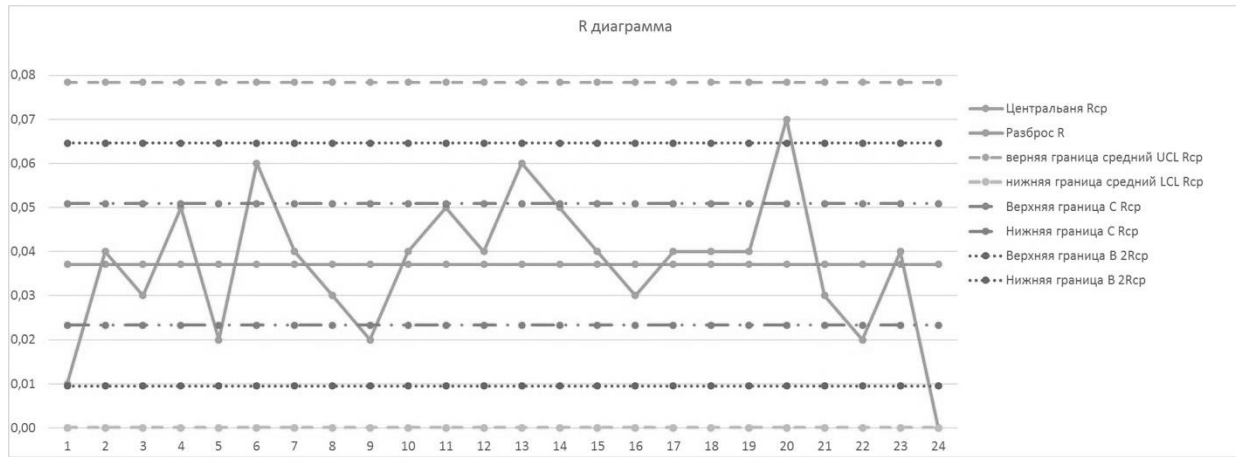
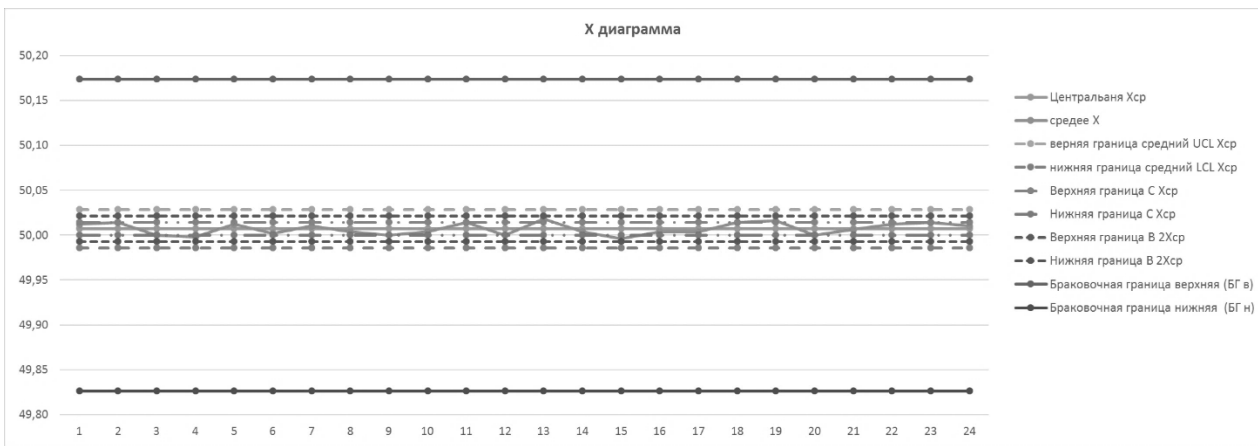
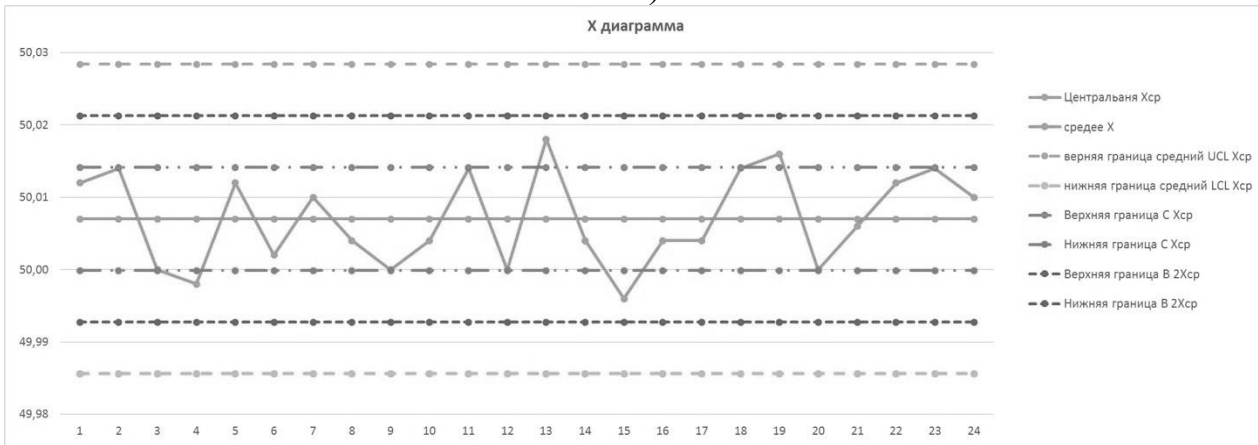


Рис. 2. Диаграмма контрольной карты размахов частоты



а)



б)

Рис. 3. Диаграмма контрольной X-карты выборочных значений частоты:

а) диаграмма контрольной карты средних с браковочными границами

б) увеличенная часть диаграммы контрольной карты средних

Проведенный анализ диаграмм контрольных карт средних и размахов показывает, что превышение контрольных границ отсутствует. Для карты средних приведены две диаграммы с браковочными границами и без них, т.к. если рас-

смаатривать диаграмму карту с браковочными границами, то невозможно определить, как ведет себя величина средних значений внутри контрольных границ. По диаграмме карт средних видно, что величина частоты находится на значительном удалеe от «браковочных границ». Анализ карты средних и карты размахов по восьми признакам показал, что не один признак не выполнен, т.е. процесс считается статически управляемым.

Выводы

1. Построение контрольных карт Шухарта позволило сделать следующие выводы. Величина размахов и средних значений частоты не выходят за пределы контрольных границ карт. Для карты средних приведены две диаграммы с браковочными границами и без них, т.к. если рассматривать диаграмму карту с браковочными границами, то невозможно определить, как ведет себя величина средних значений внутри контрольных границ. По диаграмме карт средних видно, что величина частоты находится на значительном удалеe от «браковочных границ». Анализ карты средних и карты размахов по восьми признакам показал, что не один признак не выполнен, т.е. процесс считается статически управляемым.

2. Для построения контрольных карт желательно использовать принцип построения, когда средние и размахи определяются по фактическим данным, а стандартные отклонения используются для расчета браковочных границ.

3. Применение метода контрольных карт Шухарта, которые уже отработаны и применяются при контроле качества выпускаемой продукции на промышленных предприятиях, дает предрасположение к разработке методов управления КЭЭ для систем промышленного электроснабжения. Предложения по применению карт Шухарта для анализа отклонения напряжения давались [8].

Библиографический список

1. **Shewhart, W.A.** (1931). Economic control of quality of manufactured product. ASQ Quality Press.
2. **Микшина, В.С.,** Шайторова И.А., Лысенкова С.А. Идентификация угроз аварийных ситуаций объектов в нефтяной промышленности // Вестник кибернетики. – 2018 – № (4). – С. 211-216.
3. **Адлер, Ю.П.,** Максимова О.В., Шпер В.Л. Контрольные карты Шухарта в России и за рубежом. Часть 1 // Стандарты и качество. – 2011. – № 7. – С. 82-87.
4. ГОСТ Р ИСО 13053-2-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы. Статистические методы. Количественные методы улучшения процессов «шесть сигм». Часть 2. – М.: Стандартинформ, 2016.
5. **Уилер, Д.** Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Д. Уилер, Д. Чамберс. – М.: Альпина Паблишер, 2020. – 410 с.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.

7. **Соснина, Е.Н.** Исследование влияния твердотельных регуляторов напряжения на показатели качества электроэнергии / Е.Н. Соснина, С.А. Петрицкий, С.Н. Юртаев, А.М. Мамонов, А.Н. Фитасов // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей конференции. – Н. Новгород, 2021. С. 280-285.
8. **Вагин, Г.Я.**, Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Фитасов А.Н. Применение контрольных карт для оценки статистических характеристик показателей качества электрической энергии в системах промышленного электроснабжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 93-его заседания семинара. Вып. 72. Кн. 2. Отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск, 2021. С. 182-190.
9. Сайт системного оператора единой энергетической системы. Раздел частота. [электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.so-ups.ru/functioning/ees/ees-indicators/ees-freq/>
10. **Солонин, С.И.** Метод контрольных карт: учебное пособие: [Электронное текстовое издание] / С.И. Солонин. – Екатеринбург: ЦНОТ ИТОО УрФУ, 2014. – 213 с.
11. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011 Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. – М.: Стандартиформ, 2012. – 20 с

A.N. Fitasov, A.S. Petritsky, S.A. Mamonov

USE OF SHUKHART CHARTS FOR VARIATION ANALYSIS FREQUENCIES

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article explores the use of a statistical method for quality control of products using control charts in relation to monitoring indicators of the quality of electrical energy (PQI), using the frequency deviation as an example.

Using the example of frequency deviation data, the results of sampling control are analyzed when determining the dynamics of changes in the SQI. An example of the use of R and X Shewhart charts for the analysis of voltage deviation is given.

Key words: power quality, monitoring, control charts.

References

- [1] Shewhart, W.A. (1931). Economic control of quality of manufactured product. ASQ Quality Press.
- [2] Mikshina V.S., Shaitorova I.A., Lysenkova S.A. Identification of threats of emergency situations of objects in the oil industry. Bulletin of Cybernetics. 2018;(4):211-216.
- [3] Shewhart's control charts in Russia and abroad. Part 1. Adler Yu.P., Maksimova O.V., Shper V.L. standards and quality. 2011. No. 7. S. 82-87.
- [4] GOST R ISO 13053-2-2015. National standard of the Russian Federation. Statistical methods. Statistical methods. Quantitative Methods for Improving Six Sigma Processes. Part 2. M.: Standartinform, 2016.
- [5] Donald Wheeler Statistical Process Control: Business Optimization Using Shewhart Control Charts / Donald Wheeler, David Chambers. - Moscow: Alpina Publisher, 2020. - 410 p.
- [6] GOST 32144-2013. Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. - M.: Standartinform, 2013. - 16 p.
- [7] E.N. Sosnina, S.A. Petritsky, S.N. Yurtaev, A.M. Mamonov, A.N. Fitasov. Study of the influence of solid-state voltage regulators on the quality of electricity. Actual problems of electric power industry. Collection of scientific and technical articles of the conference. Nizhny Novgorod, 2021, pp. 280-285.
- [8] Vagin G.Ya., Kulikov A.L., Sevostyanov A.A., Fitasov A.N. The use of control charts to assess the statistical characteristics of indicators of the quality of electrical energy in industrial power supply systems. Methodological issues of researching the reliability of large energy systems. Materials of the 93rd session of the seminar. In 2 books. Volume Issue 72. Book 2. Responsible editor N.I. Voropay. Irkutsk, 2021 (Pages: 182-190).
- [9] Website of the system operator of the unified energy system. Frequency section. [electronic resource]. – Access mode <https://www.so-ups.ru/functioning/ees/ees-indicators/ees-freq/>
- [10] Solonin S.I. Method of control charts: textbook: [Electronic text edition] / S. I. Solonin; ; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Ural Federal University. - Yekaterinburg, TsNOT ITOO UrFU, 2014. - 213 p.
- [11] GOST R ISO 7870-1-2011 Statistical methods. Control cards. Part 1. General principles. M.: Standartinform, 2012. 20 p.

УДК 621.315.6

DOI: 10.46960/apeen_2023_327

А.А. Шевченко, А.Д. Чернова

СПОСОБЫ АППРОКСИМАЦИИ РАНГОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВОДОРОДА В ИЗОЛЯЦИОННОМ МАСЛЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург, Россия

Аннотация. В данной статье рассмотрен техноценологический подход к предиктивной диагностике силового оборудования с помощью хроматографического анализа растворенных в масле газов. Рассмотрены способы аппроксимации ранговых распределений, выбран наиболее достоверный.

Ключевые слова: хроматографический анализ масла, техноценоз, аппроксимация, ранговые распределения, предиктивная диагностика, силовое маслонаполненное оборудование.

Трансформаторное масло находит широкое применение в электрооборудовании и является основной изоляцией токоведущих обмоток в трансформаторах. Также оно может являться источником информации о скрытых дефектах внутри оборудования. Поэтому для обнаружения скрытой неисправности трансформатора используется хроматографический анализ растворенного газа (ХАРГ) в масле. При проведении ХАРГ определяют следующие концентрации газов: водород (H_2), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), этилен (C_3H_4), этан (C_2H_6), когда концентрация составляющих газов в работающем трансформаторном масле достигает определенного значения [1], например,

$$\phi(CH_4) > 0,01\%об; \quad (1)$$

$$\phi(C_2H_2) > 0,001\%об; \quad (2)$$

$$\phi(H_2) > 0,01\%об; \quad (3)$$

где $\phi(X)$ – концентрация газа X в масле, %об,

следует поставить трансформатор на учащенный контроль. Но это не означает, что в данное время трансформатор выйдет из строя [2].

Рассмотрим метод Н-распределений, в нем используется техноценологический подход к описанию состояния силовых маслонаполненных трансформаторов, основанных на ранговом анализе Н-распределений по результатам ХАРГ. Техноценоз не поддается описанию ни традиционными методами, ни имитационными, поэтому отдельное внимание следует уделять выборке, то есть построению видовых и ранговых распределений [3].

В данной работе под видом ценоза понимается маслонаполненный трансформатор, в качестве параметрического описания используется концентрация газов.

Одной из главных задач при работе с ранговыми распределениями является выбор способа аппроксимации. Аппроксимация – определение такой функции $f(x)$, чтобы отклонение эмпирических точек y от $f(x)$ в заданной области было наименьшим. Так как все распределения являются гиперболическими, то стандартная форма имеет вид:

$$f(x) = \frac{A}{x^\beta}, \quad (4)$$

где A и β – искомые параметры.

Различают следующие методы аппроксимации Н-распределений:

- 1) метод наименьшего модуля;
- 2) линейный метод наименьших квадратов;
- 3) метод наименьших квадратов.

Для рангового анализа уровня содержания водорода в газе необходимо составить информационную базу данных объектов, которая бы включала в себя ранг объекта, его вид и видообразующий параметр. Используемые данные по трансформаторам за период с 2003г. по 2012г. содержат информацию по 11 трехобмоточным силовым маслонаполненным трансформаторам 110 кВ с РПН разных типов, различной номинальной мощности, эксплуатируемые в восточной части Оренбургской области.

Для того, что проанализировать распределение необходимо построить аппроксимирующую кривую, так как таким образом учитывается конечная выборка эмпирических точек техноценоза как генеральная совокупность. Поэтому аппроксимационная форма является соответствующим вероятностным распределением техноценоза [4].

Для построения любого вида распределений в графической форме используются эмпирические данные. Значения x и y определяются в зависимости от вида распределения.

1. Для рангового видового распределения x – это номер ранга вида, y – количество особей в виде (рис. 1).

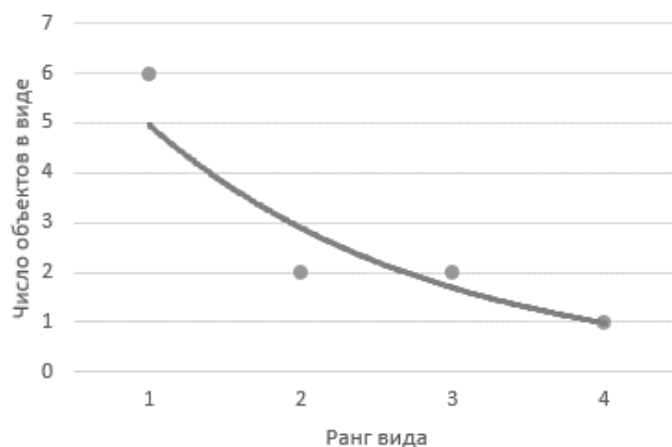


Рис. 1. Ранговое видовое распределение техноценоза

2. Для видового распределения x – это количество особей в виде, y – число видов, содержащее x особей (рис. 2). В видовом распределении объекты не ранжируются, поэтому есть точки, отклоняющиеся от аппроксимирующей кривой. Те точки, что находятся под аппроксимирующей кривой (1;2); (6;1), характеризуют повышенную унификацию, при которой один вид трансформатора выполняет свою технологическую функцию. Есть также точка, отклоняющаяся выше кривой (2;2). Это свидетельствует о большом разнообразии техники в этой зоне.

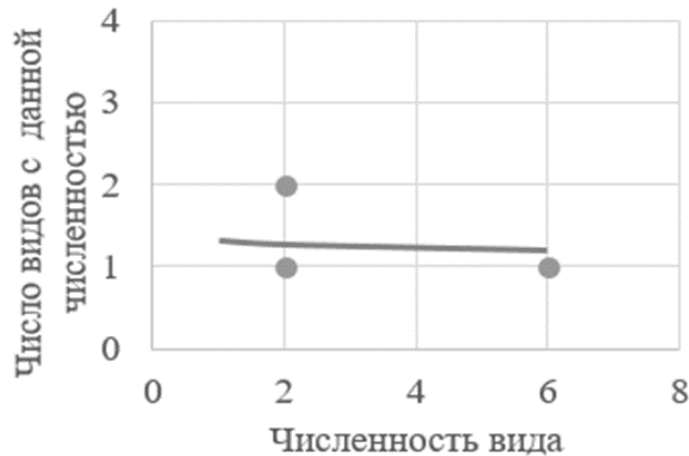


Рис. 2. Видовое распределение техноценоза

Построенные распределения позволяют судить о структуре техноценоза, однако для выявления аномального значения концентрации необходимо построить ранговое параметрическое распределение.

3. Для рангового параметрического распределения x – это номер ранга особи, y – значение параметра (рис. 3).

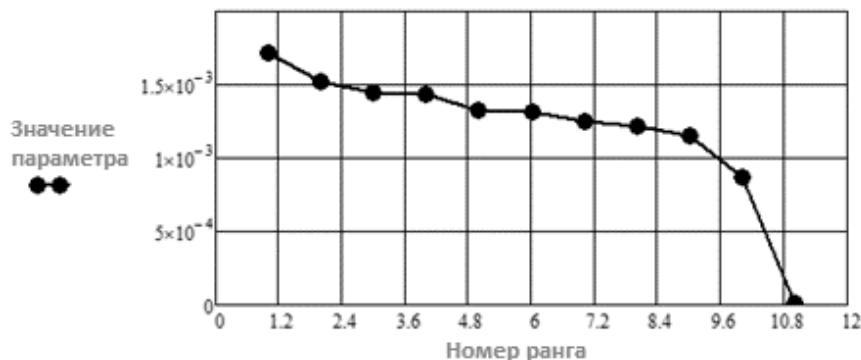


Рис. 3. Ранговое параметрическое распределение техноценоза

Совокупность ранговых распределений во времени концентрации газов за 5 лет задает ранговую поверхность N -распределения - динамику первого рода (рис. 4).

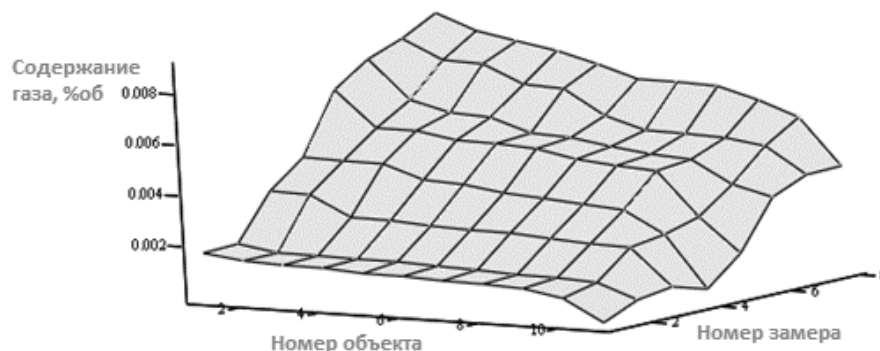


Рис. 4. Динамика 1-го рода техноценоза

Для расчета и сравнения методов аппроксимации использовалась программная среда «MathCAD». Сутью сравнения является нахождение истинной ошибки (рис. 5).

| | | | |
|------------------------------|--|--|--|
| Истинная ошибка - | $\varepsilon 1 := Y - y1$ | $\varepsilon 2 := Y - y2$ | $\varepsilon 3 := Y - y3$ |
| Максимальное значение - | $\max(\overrightarrow{\varepsilon 1}) = 1.153 \times 10^{-3}$ | $\max(\overrightarrow{\varepsilon 2}) = 1.391 \times 10^{-3}$ | $\max(\overrightarrow{\varepsilon 3}) = 1.391 \times 10^{-3}$ |
| Суммарное значение - | $\sum_{i=1}^n (\overrightarrow{\varepsilon 1})_i = 2.454 \times 10^{-3}$ | $\sum_{i=1}^n (\overrightarrow{\varepsilon 2})_i = 6.863 \times 10^{-3}$ | $\sum_{i=1}^n (\overrightarrow{\varepsilon 3})_i = 6.863 \times 10^{-3}$ |
| Относительное значение - | $\varepsilon_{otn1} := \overrightarrow{[\varepsilon 1 \cdot (Y^{-1})]}$ | $\varepsilon_{otn2} := \overrightarrow{[\varepsilon 2 \cdot (Y^{-1})]}$ | $\varepsilon_{otn3} := \overrightarrow{[\varepsilon 3 \cdot (Y^{-1})]}$ |
| Вычисление истинной ошибки - | $MNM := \sum_{i=1}^n (\overrightarrow{\varepsilon_{otn1}})_i$ | $MNK := \sum_{i=1}^n (\overrightarrow{\varepsilon_{otn2}})_i$ | $mthod3 := \sum_{i=1}^n (\overrightarrow{\varepsilon_{otn3}})_i$ |
| Результаты - | $MNM = 116.461$ | $MNK = 46.999$ | $mthod3 = 46.999$ |
| | $\text{corr}(Y, y1) = 0.545$ | $\text{corr}(Y, y2) = 0.475$ | $\text{corr}(Y, y3) = 0.475$ |

Рис. 5. Сравнение методов аппроксимации, реализованное в среде «MathCAD»

На рис. 5 можно увидеть, что результаты вычисления истинной ошибки метода наименьших квадратов в разы меньше результатов метода наименьших модулей (МНК и МНМ соответственно). Полученные графики по результатам вычисления истинной ошибки позволяют судить о том, что нелинейный метод наименьших квадратов оказался наиболее корректным, что в дальнейшем позволит более точно отслеживать доверительный интервал. На рис. 6 представлен метод наименьших квадратов. На рис. 7 – метод наименьших модулей. На рис. 8 – линейный метод наименьших квадратов.

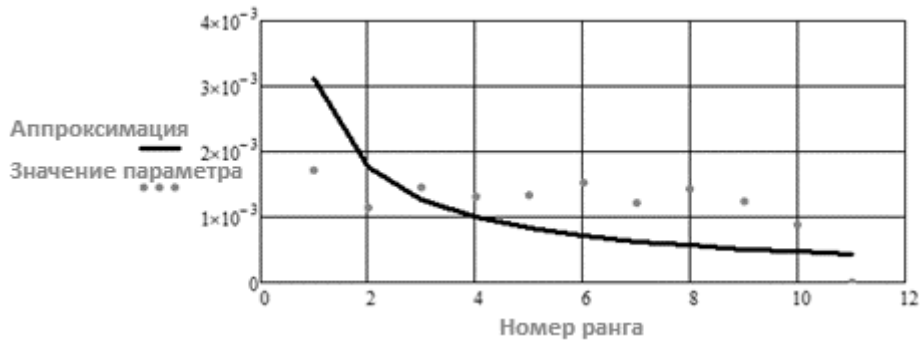


Рис. 6. Аппроксимация методом наименьших квадратов

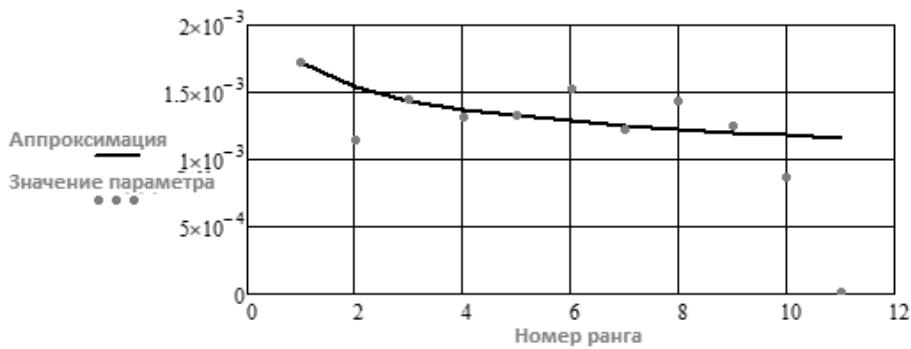


Рис. 7. Аппроксимация методом наименьших модулей

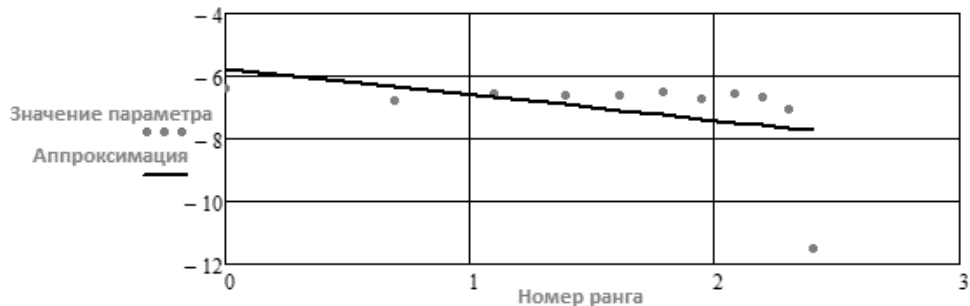


Рис. 8. Аппроксимация линейного метода наименьших квадратов

Библиографический список

1. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – Введ. с 22.01.2001. – Москва, 2001. – 42 с.
2. **Yanping, Li**, Yong, Li, Yunqi, Li. Oil Chromatographic Analysis and Fault Diagnosis Case Analysis for Transformers. Автореферат. Цзинань, 2019. – С. 3.
3. **Гнатюк, В.И.** Закон оптимального построения техноценозов. – Вып. 29. Ценологические исследования. – М.: Изд-во ТГУ – Центр системных исследований, 2005. – 384 с.
4. **Чупак, Т.М.** Прогнозирование технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.02. – 20 с.

A.A. Shevchenko, A.D. Chernova

**METHODS OF APPROXIMATION OF THE RANK DISTRIBUTION
OF HYDROGEN CONCENTRATIONS IN THE INSULATING OIL
OF POWER TRANSFORMERS**

Orenburg State University
Orenburg, Russia

Abstract. This article discusses a technocenological approach to predictive diagnostics of power equipment using chromatographic analysis of gases dissolved in oil. Methods of approximation of rank distributions are considered, the most reliable one is selected.

Keywords: chromatographic analysis of oil, technocenosis, approximation, rank distributions, predictive diagnostics, power oil-filled equipment.

References

- [1] Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil. – Introduced Jan. 30, 2001. Moscow RD 153-34.0-46.302-00., pp. 42, 2001 (in Russian)
- [2] Yanping Li, Young Li, Yundi Li. Oil Chromatographic Analysis and Fault Diagnosis Code Analysis for Transformers // Abstract. Jinan, pp. 3. 2019.
- [3] Gnatyuk V.I. The law of optimal construction of technocenoses. pp. 27. 2005 (in Russian)
- [4] Chupak T.M. Forecasting the technical condition of power oil-filled transformers // Abstract. Krasnoyarsk, pp. 20, 2007 (in Russian)

Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.311.001.57

DOI: 10.46960/apeen_2023_333

А.Д. Ахметбаев**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ ТОКОВ В РАСЧЕТАХ
УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ СЛОЖНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

ТОО «ТИ Си Компани»

Аннотация. Из теоретической электротехники известно, что для определения рабочего режима сложной схемы нет необходимости в совместном решении всей системы уравнений. В работе излагаются возможности упрощения алгоритмов расчета рабочих режимов сложной электрической сети, при использовании условия независимости токов ее схемы замещения. Применение обобщенных пассивных параметров схемы электрической сети дают достаточно простую связь искомых параметров рабочего режима с ее заданными активными параметрами. Матрица коэффициентов токораспределения формируется на основе натуральных параметров электрической сети и может быть использована в качестве исходных данных при выполнении различных электрических расчетов, в частности для определения токов в ветвях. Это позволяет предварительно выбрать независимые токи и упростить расчетную схему сложной электрической сети.

Поэтому разработка упрощенных алгоритмов формирования рабочих режимов с учетом независимых токов в ветвях схемы имеет как теоретически, так и практически интерес, которые могут быть использованы при различных видах электрических расчетов.

Ключевые слова: коэффициенты токораспределения, независимые токи, дерево, хорда, напряжение.

Электрическое состояние сети полностью определяется на основе законов теории электротехники [1-3].

Параметры установившегося режима определяются на основе нелинейного матричного уравнения узловых напряжений, формализованного на основе линейных параметров сети [4,5]. Сложность расчета установившегося режима электрической сети может быть упрощена с применением коэффициентов распределения задающих токов [6-8]. Прямое формирование установившегося режима существенно сокращает объем выполняемых работ, повышает наглядность выполнений алгоритмов расчета и обеспечивает быструю и надежную сходимость итерации [9,10]. Матрица коэффициентов распределения задающих токов может быть формализована как методами преобразования схем, так и аналитическими методами с использованием ее натуральных параметров. Точность значений коэффициентов токораспределения определяется с точностью задания па-

раметров исследуемой электрической сети. Следовательно, распределение задающих токов по ветвям схемы замещения сложной электрической сети определяется с точностью задания ее натуральных параметров.

При отсутствии э.д.с. в ветвях, коэффициенты распределения задающих токов позволяют определить токи ветвей электрической сети и формировать параметров ее установившегося режима[4]. Следовательно, после выбора и установления независимых токов, возникает возможность упрощения расчетной схемы для формирования установившегося режима.

Формализация задачи

Условия взаимной независимости токов в ветвях схемы могут быть определены на основе матричного уравнения первого закона Кирхгофа[4,11,12]:

$$M \cdot \dot{I} = \dot{J}, \quad (1)$$

где M -прямоугольная первая матрица инцидентции; \dot{I} -столбцовая матрица комплексных токов ветвей; \dot{J} - столбцовая матрица комплексных задающих токов.

Если разделить уравнение (1) на блочные матрицы относительно токов дерева и хорд и после матричного умножения можно записать в виде:

$$M_d \cdot \dot{I}_d + M_x \cdot \dot{I}_x = \dot{J}, \quad (2)$$

где \dot{I}_d -столбцовая матрица токов дерева схемы; \dot{I}_x - столбцовая матрица токов хорд схемы; \dot{J} -исходная матрица задающих токов

Полученное уравнение (2) легко преобразуется, если учесть что матрица M_d является квадратной и неособенной. Матрицу токов дерева \dot{I}_d схемы можно определить по формуле:

$$\dot{I}_d = M_d^{-1} \cdot (\dot{J} - M_x \cdot \dot{I}_x). \quad (3)$$

Это выражение подтверждает, что предварительно определенные токи в каждой хорде схемы могут быть выражены в виде слагающих задающих токов, приложенных у ее вершин.

Из уравнений(3) определяется эквивалентный задающий ток в виде:

$$J_o = \dot{J} - M_x \cdot \dot{I}_x. \quad (4)$$

При этом в конечной вершине токи хорды учитываются с теми же знаками, что и токи в ветвях, а в начальной вершине – с противоположными. Это приводит к существенному упрощению расчетной модели путем удаления всех хорд из схемы замещения, при этом остается только дерево схемы.

Таким образом, после выбора и определения токов в хордах сложной схемы электрической цепи на основе известной матрицы коэффициентов токораспределения можно существенно упростить расчетную схему сложной электрической цепи, путем исключения из ее схемы всех хорд.

Расчеты узловых падений напряжения определяются по упрощенной схеме в виде [10-12]:

$$\dot{U}_\Delta = C_d^t Z_b C_d \dot{J}. \quad (5)$$

$C_d = M^{-1}$ - матрица коэффициентов токораспределения дерева схемы, \underline{Z}_B - матрица сопротивлений ветви дерева схемы, t - знак транспонирования матрицы.

Реализация алгоритмов

В качестве примера рассмотрим исследованную схему из [4,5], изображенную на рис. 1, с параметрами: $\underline{Z}_1 = 10\text{M}$, $\underline{Z}_2 = 20\text{M}$, $\underline{Z}_3 = 30\text{M}$, $\underline{Z}_4 = 40\text{M}$, $\underline{Z}_5 = 50\text{M}$ и задающим токам: $J_1 = 1\text{A}$, $J_2 = 2\text{A}$, $J_3 = 3\text{A}$.

Напряжения узлов равны:

$$\dot{U}_1 = 2,6625\text{B}; \dot{U}_2 = 5,989\text{B}; \dot{U}_3 = 8,556\text{B}.$$

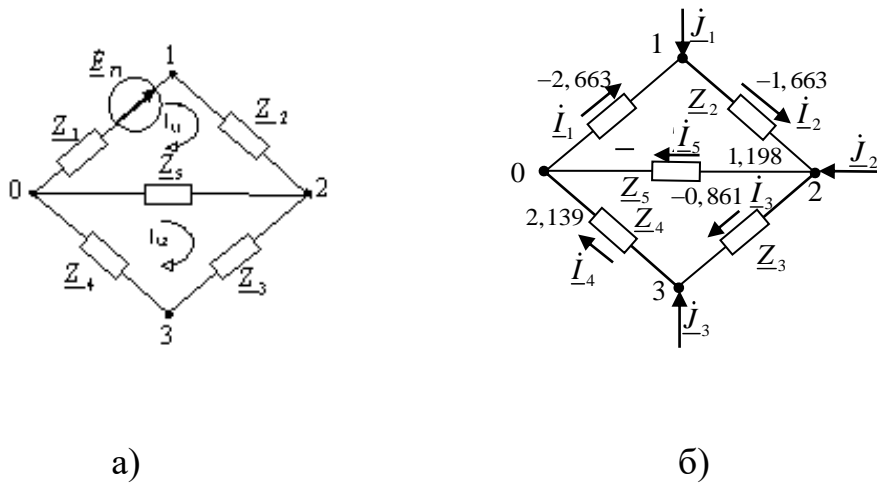


Рис. 1. Схемы: а) электрической цепи, б) расчетная

Аналитические выражения для элементов матрицы коэффициентов токораспределения определенные методом контурных токов, представлены в виде:

$$\underline{C} = \frac{1}{Z_{11}Z_{22} - Z_5^2} \begin{pmatrix} -(Z_2Z_{22} + Z_5(Z_3 + Z_4)) & -Z_5(Z_3 + Z_4) & -Z_4Z_5 \\ Z_1Z_{22} & -Z_5(Z_3 + Z_4) & -Z_4Z_5 \\ Z_1Z_5 & Z_5(Z_1 + Z_2) & -Z_4Z_{11} \\ Z_1Z_5 & Z_5(Z_1 + Z_2) & Z_3Z_{11} + Z_5(Z_1 + Z_2) \\ Z_1(Z_3 + Z_4) & (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4) & Z_4(Z_1 + Z_2) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Тогда матрица токов в ветвях схемы определяются в виде [3]:

$$\underline{i} = \underline{C}\underline{j} \quad (7)$$

Первый столбец матрицы коэффициентов токораспределения (6) определяется решением системы контурных уравнений, составленной на основе расчетной схемы рис. 1, б.

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{11} \dot{I}_{k1} - \underline{Z}_5 \dot{I}_{k2} &= \underline{Z}_1 \\ -\underline{Z}_5 \dot{I}_{k1} - \underline{Z}_{22} \dot{I}_{k2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

решение которой имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{k1} &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_5^2}, \\ \dot{I}_{k2} &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_5^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_5$; $\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5$ - контурные сопротивления.

Действительные токи в ветвях исходной схемы являются элементами первого столбца матрицы (6). Остальные коэффициенты этой матрицы определяются аналогично решением контурных уравнений для двух других фиктивных схем, составляемых на основе рис. 1, а.

После подстановки численных значений параметров имеем:

$$C = \frac{1}{71} \begin{vmatrix} -59 & -35 & -20 \\ 12 & -35 & -20 \\ 5 & 15 & -32 \\ 5 & 15 & 39 \\ 7 & 21 & 12 \end{vmatrix}$$

Токи в ветвях схемы, согласно (7), равны:

$$i = \begin{vmatrix} -2,663 \\ -1,663 \\ -0,861 \\ 2,139 \\ 1,198 \end{vmatrix}$$

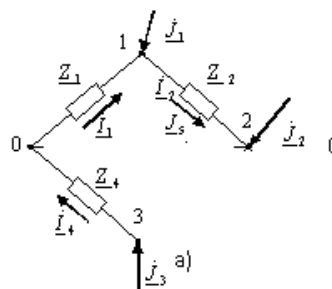
Предположим, что хордами являются ветви с токами

$$\dot{I}_3 = -0,861; \dot{I}_5 = 1,198.$$

Тогда, эквивалентные значения задающих токов согласно (4) определяются в виде:

$$j_3 = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -0,861 \\ 1,198 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 1,663 \\ 2,139 \end{vmatrix} \text{ А}$$

После удаления ветви с сопротивлениями \underline{Z}_3 , \underline{Z}_5 , имеем расчетную схему



в которой напряжения узлов определяются, согласно (5), в виде:

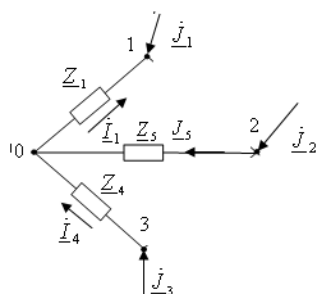
$$\dot{U}_{\Delta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1,00 \\ 1,663 \\ 2,139 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,663 \\ 5,989 \\ 8,556 \end{bmatrix} \text{ В.}$$

Как видно, расчеты полностью совпадают с результатами, полученными по исходной схеме.

Если хордами являются ветви с токами $i_2 = -1,663$, $i_3 = -0,861$, то значения эквивалентных задающих токов будут равными:

$$\dot{J}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1,663 \\ -0,861 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,663 \\ 1,198 \\ 2,139 \end{bmatrix} \text{ А.}$$

Если удалить ветви с сопротивлениями Z_2 и Z_3 , то получим расчетную схему



тогда напряжения узлов, соответственно будут равными:

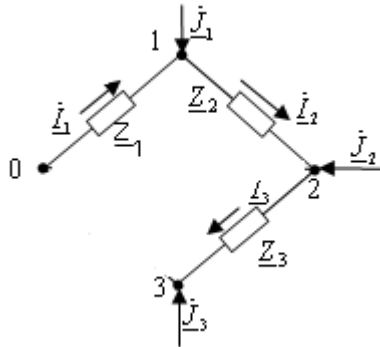
$$\dot{U}_{\Delta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2,663 \\ 1,198 \\ 2,139 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,663 \\ 5,99 \\ 8,556 \end{bmatrix} \text{ В,}$$

что хорошо согласуется с результатами предыдущих расчетов.

Если хордами являются ветви с токами $i_4 = 2,139$, $i_5 = 1,198$, то значения эквивалентных задающих токов будут равными:

$$\underline{J}_9 = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 2,139 \\ 1,198 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0,802 \\ 0,861 \end{vmatrix} A.$$

Искомая расчетная схема сети определяется после удаления соответствующих ветвей, и имеет вид:



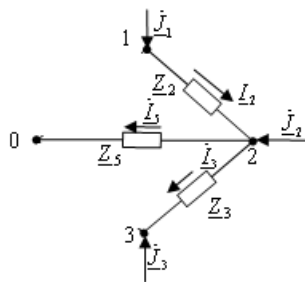
а напряжения узлов, соответственно будут равными:

$$\underline{U}_\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 \\ 0,802 \\ 0,861 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2,663 \\ 5,989 \\ 8,572 \end{vmatrix} B.$$

Если хордами являются ветви с токами $i_1 = -2,633, i_4 = 2,139$, то значения эквивалентных задающих токов будут равными:

$$\underline{j}_9 = \begin{vmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -2,663 \\ 2,139 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1,663 \\ 2,00 \\ 0,861 \end{vmatrix} A.$$

Тогда напряжения узлов расчетной схемы будут равными:



$$\underline{U}_\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} -1,663 \\ 2,00 \\ 0,861 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2,664 \\ 5,99 \\ 8,573 \end{vmatrix} B.$$

Проведенные расчеты показывают, что значения узловых напряжений, полученные на основе различной модели, хорошо согласуются и отличаются друг от друга в пределах погрешности округления.

Выводы

Учет независимых токов ветвей существенно упрощает алгоритм расчета рабочих режимов сложных электрических сетей, что позволит:

- 1) упростит расчетную схему сложной электрической сети;
- 2) определить значения коэффициентов распределения по дереву графа сложной электрической сети;
- 3) повысить оперативность расчета режимов сложной электрической сети;

Данные положения способствуют использованию измеренных параметров телеметрии для оценки режима электрической сети.

Библиографический список

1. **Бессонов, Л.А.** Теоретические основы электротехники. В 2-х томах. Т. 1. – М.: ВШ, 1978. – 528 с. Т. 2. – М.: Высшая школа, 1978. – 231 с.
2. **Зевеке, Г.В.** и др. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
3. **Ахметбаев, Д.С.** Теоретические основы электротехники. – Алматы, 2021. – 361 с.
4. **Мельников, Н.А.** Матричный метод анализа электрических цепей. – М.: Энергия, 1972. – 232с.
5. **Русина, А.Г., Филиппова А.Н.** Режимы электрических станций и электроэнергетических систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 400 с.
6. **Ахметбаев, Д.С.** Метод расчета установившихся режимов электрических сетей на основе коэффициентов токораспределения // Электричество. – 2010. – № 11. – С. 23-27.
7. **Dauren S. Akhmetbayev, Daurenbek A. Aubakir, Yermek Zh. Sarsikeyev, Bakhtybek A. Bainiyazov, Mikhail A. Surkov, Vitaliy I. Rozhko, Gulbahit N. Ansabekova, Assel S. Yerbolova, Azamat T. Suleimenov, Miramgul S. Tokasheva.** Development of topological method for calculating current distribution coefficients in complex power networks, //Results in Physics, 2017, 7, стр.,1644-1649.(скопус, Томсон)
8. **Ахметбаев, Д.С., Ахметбаев, А.Д., Бердыгожин, А.С., Мукатов, Б.Б.** Теоретические основы топологического анализа стационарных режимов сложных электрических сетей // Вестник АУЭС. – 2015. – № 3 (30). – С.15-21.
9. **Ахметбаев, Д.С., Ахметбаев, А.Д., Бердыгожин, А.С.** Топологический метод формирования узловых уравнений в обращенной форме для электроэнергетических систем // Электричество. – 2018. – № 5. – С.18-27.
10. **Ахметбаев, Д.С., Ахметбаев А.Д., Жантлесова А.Б.** Формирование z-формы уравнений установившего режима сложных электрических сетей энергосистем // Методические вопросы исследования надежности больших систем: Вып. 69. Надежность развивающихся систем энергетики. В 2-х кн. / Книга 2. – М.: ИСЭМ СО РАН, 2018. С. 159-167.
11. **Akhmetbaev, D.S., Dzhandigulov A.R., Akhmetbaev A.D.** Investigations of the topological method and voltage generation algorithms for nodes of complex electrical networks//International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies («FarEastCon») (Vladivostok, RusskyIsland, 6-7 October 2020)
12. **Ахметбаев, А.Р.** Джандигулов, А.Д. Ахметбаев. К расчету мощности и места установки компенсирующих устройств в распределительной электрической сети // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – 2021. – № 1. – С. 85-96.

A.D. Akhmetbaev

APPLICATION OF INDEPENDENT CURRENTS IN CALCULATIONS OF STEADY-STATE COMPLEX MODES ELECTRICAL NETWORK

"TI C Company" LLP

Abstract. from theoretical electrical engineering it is known that to determine the operating mode of a complex circuit there is no need to jointly solve the entire system of equations. The paper outlines the possibilities of simplifying algorithms for calculating the operating modes of a complex electrical network, using the condition of independence of the currents of its equivalent circuit. The use of generalized passive parameters of the electrical network circuit provides a fairly simple connection between the desired parameters of the operating mode and its specified active parameters. The matrix of current distribution coefficients is formed on the basis of the natural parameters of the electrical network and can be used as initial data when performing various electrical calculations, in particular to determine currents in branches. This allows you to pre-select independent currents and simplify the design diagram of a complex electrical network.

Therefore, the development of simplified algorithms for the formation of operating modes taking into account independent currents in the branches of the circuit is of both theoretical and practical interest, which can be used in various types of electrical calculations.

Key words: current distribution coefficients, independent currents, tree, chord, voltage.

References

- [1] Bessonov L.A. Theoretical foundations of electrical engineering. M.: Higher School, 1978. In 2 volumes, M.: Higher School, 1978. 528 and 231 pp.
- [2] Fundamentals of circuit theory / G.V. Zeweke, P.A. Ionkin, A.V. Netushil, S.V. Strakhov. M.: Energy, 1975. 752 p.
- [3] Akhmetbaev D.S. Theoretical foundations of electrical engineering. Almaty, 2021. 361 p.
- [4] N.A. Melnikov. Matrix method of analysis of electrical circuits. M.: Energia, 1972. 232 p.
- [5] A.G. Rusina, T.A. Filippova Modes of electric power plants and electric power systems. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2016.-400 p.
- [6] Akhmetbaev D.S. Method for calculating steady-state modes of electrical networks based on current distribution coefficients // Electricity. Moscow. 2010., No. 11, pp. 23-27.
- [7] Dauren S. Akhmetbayev, Daurenbek A. Aubakir, Yermek Zh. Sarsikeyevev, Bakhtybek A. Bainiyazov, Mikhail A. Surkov, Vitaliy I. Rozhko, Gulbahit N. Ansabekova, Assel S. Yerbolova, Azamat T. Suleimenov, Miramgul S. Tokasheva. Development of topological method for calculating current distribution coefficients in complex power networks, //Results in Physics, 2017, 7, pp., 1644-1649. (Scopus, Thomson)
- [8] Akhmetbaev D.S., Akhmetbaev A.D., Berdygozhin A.S., Mukatov B.B. Theoretical foundations of topological analysis of stationary modes of complex electrical networks // Vestnik AUES. Almaty, 2015.-No.3 (30).-P.15-21.
- [9] Akhmetbaev D.S., Akhmetbaev A.D., Berdygozhin A.S. Topological method for forming nodal equations in reverse form for electric power systems // Electricity. Moscow. 2018, no. 5, pp. 18-27.
- [10] Akhmetbaev D.S., Akhmetbaev A.D., Zhantlesova A.B. Formation of the z-form equations of the established mode of complex electrical networks of power systems. Methodological issues in

studying the reliability of large systems: Vol. 69. Reliability of developing energy systems. In 2 books. / Book2 / Answer. ed. N.I. Voropai – ISEM SB RAS, 2018-P. 159-167.

- [11] Akhmetbaev D.S., Dzhandigulov A.R., Akhmetbaev A.D. Investigations of the topological method and voltage generation algorithms for nodes of complex electrical net-works//International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (“FarEastCon”) (Vladivostok, RussianIsland, 6- October 7, 2020)
- [12] Akhmetbaev, A.R. Dzhandigulov, A.D. Akhmetbaev. To calculate the power and installation location of compensating devices in the electrical distribution network // Problems of energy and resource saving No. 1. TASHKENT - 2021. P. 85-96.

Р.Ш. Бедретдинов, Д.А. Гусев, Е.В. Крюков

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ МОЩНОСТИ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос управления потоками мощности в электрической сети с распределенной генерацией и тиристорными регуляторами мощности (ТРМ). В программном комплексе *PSCAD* разработана имитационная модель электрической сети с источником традиционной генерации, возобновляемым источником энергии (ВИЭ) и ТРМ. Приведено описание разработанной модели и ее основных элементов. Имитационная модель позволяет выполнить комплекс исследований, необходимых для внедрения ТРМ в электрическую сеть с многосторонним питанием.

Ключевые слова: тиристорный регулятор мощности, распределенная генерация, продольное и поперечное регулирование, имитационная модель.

Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике является основной тенденцией развития многих стран мира. Кроме того, одной из ключевых задач Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года является развитие и распространение инновационных технологий в области внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распределенной генерации [1]. В настоящее время строительство крупных электростанций фактически невозможно из-за плотности застройки в городах. Выходом из ситуации является интеграция установок на основе ВИЭ в централизованную электрическую сеть. На фоне постоянного роста нагрузок такой подход обеспечит надежность и качество электроснабжения. В связи с этим важным вопросом является управление потоками мощности в электрической сети с многосторонним питанием.

Для оптимального потокораспределения предлагается использование тиристорного регулятора мощности (ТРМ), который способен изменять величину и направление потоков мощности [2, 3]. При внедрении ТРМ в электрическую сеть с многосторонним питанием важной задачей является исследование влияния ТРМ на параметры режима и качество электрической энергии. Основная сложность применения ТРМ в сети с ВИЭ заключается в отсутствии алгоритмов оптимального управления потоками мощности. Поэтому на начальном этапе исследования необходимо разработать имитационную модель электрической сети с источниками традиционной генерации, разнотипными ВИЭ и ТРМ.

В качестве среды моделирования выбран программный комплекс *PSCAD* [4]. В данном комплексе имеется возможность моделирования работы энергосистем и силовых преобразователей при их проектировании, анализе, оптимизации. С помощью встроенного модуля переходных процессов *EMTDC* возможен

анализ работы энергооборудования в нормальных и аварийных режимах. Моделирование электрической сети осуществлялось на основе библиотеки – *Master Library* – основной библиотеки, содержащей большинство компонентов, необходимых для создания схемы.

Исходными данными для моделирования распределительной электрической сети (РЭС) являются номинальные мощности электроприемников 0,4 и 10 кВ и протяженность линий электропередачи. На структурной схеме электрической сети с ВИЭ (рис.1) пунктиром выделены места размещения ТРМ для управления потокораспределением.

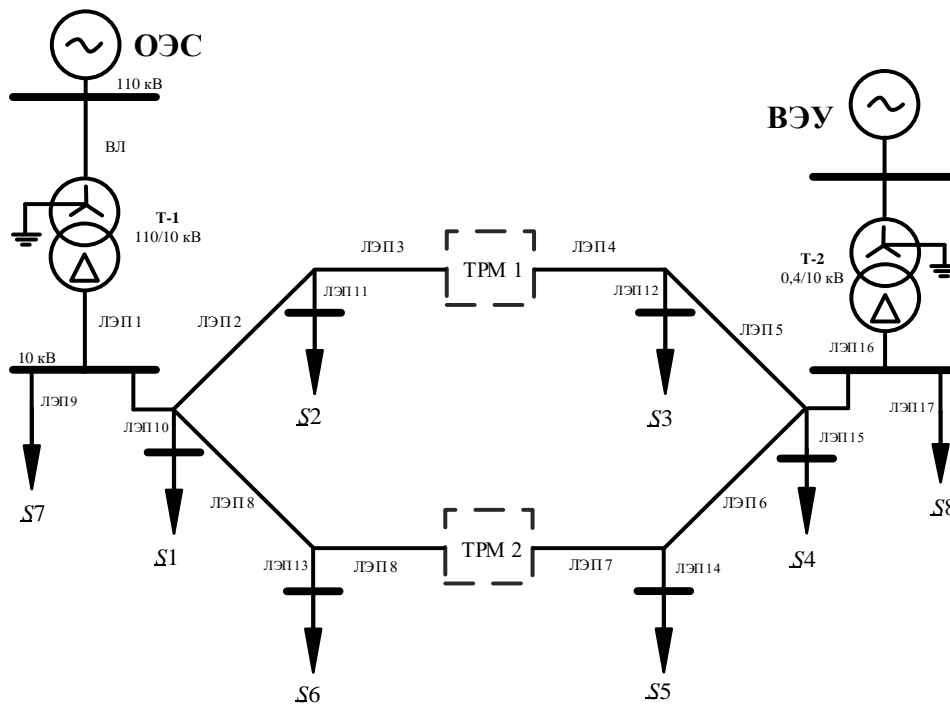


Рис. 1. Структурная схема с ВИЭ и ТРМ

Силовая схема ТРМ (рис. 2) содержит параллельный (шунтовой) трансформатор $T1$ и последовательные (серийные) трансформаторы $T2$. Первичные обмотки трансформатора $TV1$ подключены к входным зажимам ТРМ. Вторичные обмотки $T1$ через модули поперечного и продольного регулирования [5] подключены к первичным обмоткам трансформаторов $T2$. Вторичные обмотки трансформатора $T2$, включенные между входными (A, B, C) и выходными ($A2, B2, C2$) зажимами РПМ (в расщелку линии), вносят продольно-поперечную составляющую напряжения, регулируемую тиристорными коммутаторами по фазе и величине.

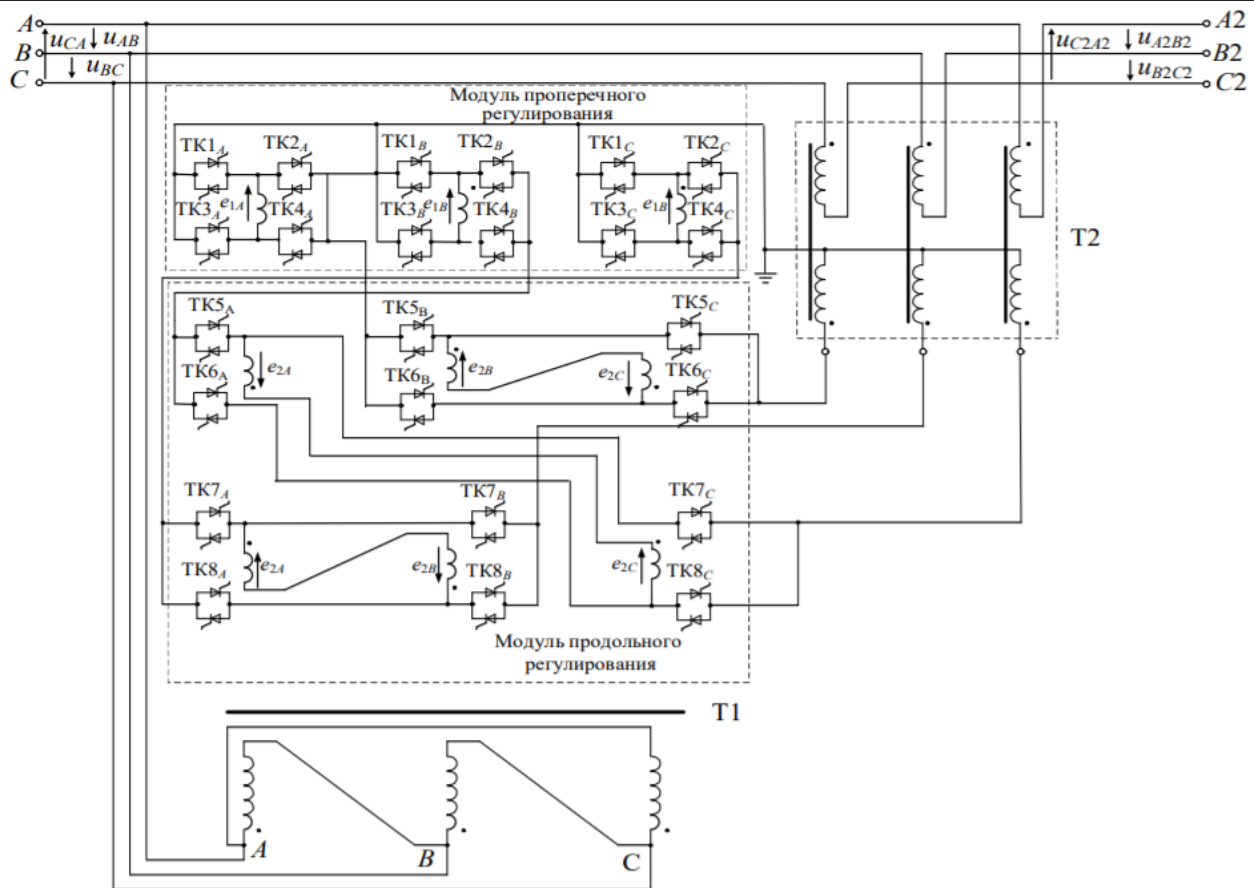


Рис. 2. Силловая схема ТРМ

Расчет электрических нагрузок и выбор элементов РЭС (силовых трансформаторов и линий электропередачи (ЛЭП)) заложен в программе. Последовательность расчета приведена на рис. 3. Расчетные значения элементов РЭС сведены в табл.1, 2.

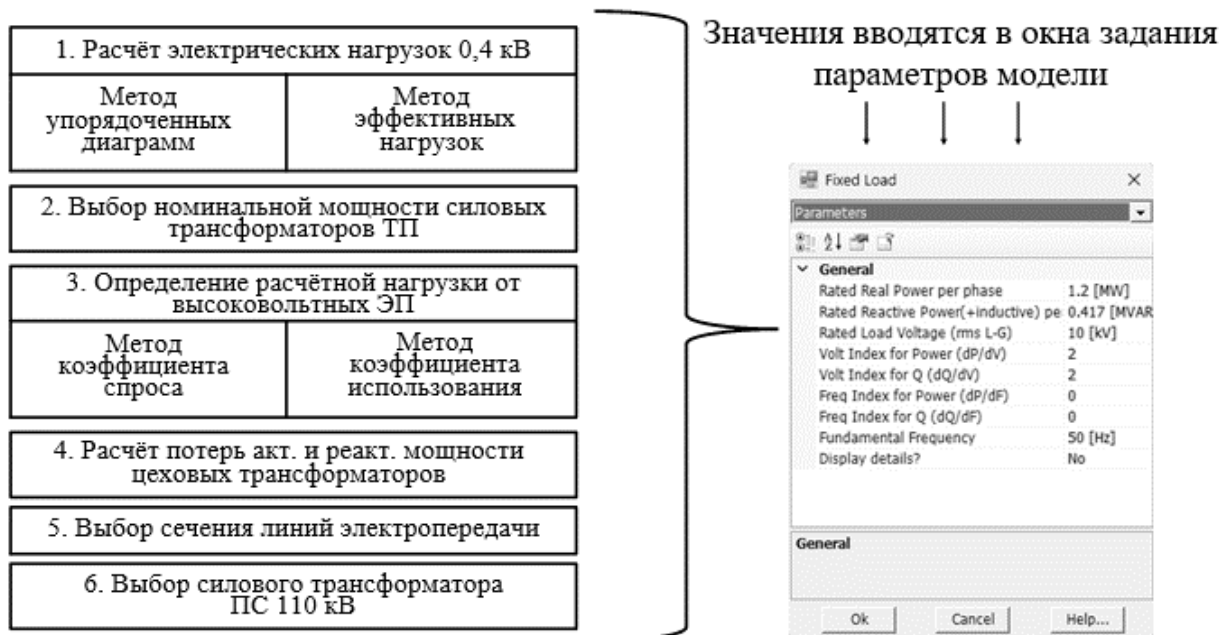


Рис. 3. Порядок расчета электрических нагрузок и выбора элементов РЭС

Таблица 1

Расчетные данные электрических нагрузок 10 кВ

| Номер нагрузки | P , кВт | Q , квар | $\cos\varphi$ | $\operatorname{tg}\varphi$ | S , кВА |
|----------------|-----------|------------|---------------|----------------------------|-----------|
| 1 | 3600 | 1450 | 0,93 | 0,40 | 3881,04 |
| 2 | 1300 | 350 | 0,97 | 0,27 | 1346,29 |
| 3 | 2600 | 1130 | 0,92 | 0,43 | 2834,94 |
| 4 | 1800 | 550 | 0,96 | 0,31 | 1882,15 |
| 5 | 520 | 210 | 0,93 | 0,40 | 560,80 |
| 6 | 830 | 350 | 0,92 | 0,42 | 900,78 |
| 7 | 3600 | 1250 | 0,94 | 0,35 | 3810,84 |
| 8 | 4200 | 2010 | 0,90 | 0,48 | 4656,19 |

Таблица 2

Технические параметры для линий электропередач

| Наименование | Марка | Активное удельное сопр, Ом/км | Индуктивное удельное сопр, Ом/км |
|---|-----------|-------------------------------|----------------------------------|
| Питающие ЛЭП 110 кВ, ЛЭП транзит | АС 70/11 | 0,422 | 0,367 |
| Питающие ЛЭП 10 кВ | АС 95/16 | 0,301 | 0,356 |
| Отходящие к нагрузке 7 и 8 ЛЭП 10 кВ | АС 70/11 | 0,422 | 0,367 |
| Отходящие к кольцу ЛЭП 10 кВ и кольцо 10 кВ | АС 95/16 | 0,301 | 0,356 |
| Отходящие к нагрузке 1,3 ЛЭП 10 кВ | АС 70/11 | 0,422 | 0,367 |
| Отходящие к нагрузке 2,4,5,6 ЛЭП 10 кВ | АС 25/4,2 | 1,152 | 0,401 |

При построении модели использован принцип структурного моделирования, основанный на создании моделей отдельных блоков и последующего синтеза всей системы. При разработке модели приняты следующие основные допущения:

- принимается источник бесконечной мощности ($X_{\text{системы}} = 0$);
- проводится замена одного трехфазного шунтового трансформатора на три однофазных трансформатора (для ТРМ);
 - параметры схемы замещения линии принимаются сосредоточенными;
- линия электропередачи моделируется, как активно-индуктивная нагрузка.

Имитационная модель электрической сети с источником традиционной генерации, ВИЭ и ТРМ представлена на рис. 4. В данной модели к блокам ТРМ и ВЭУ была применена функция маскирования в отдельную компоненту с целью получения более компактной схемы.

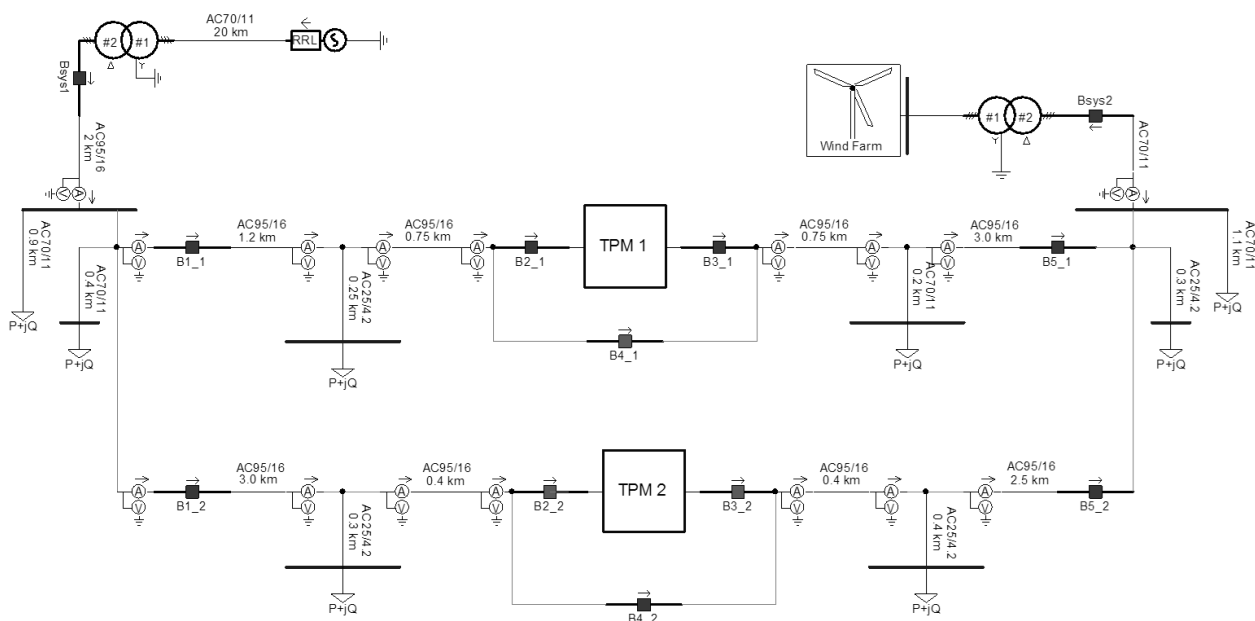


Рис. 4. Имитационная модель электрической сети с источником традиционной генерации, ВИЭ и TPM

Модель тиристорного регулятора включает блоки встречно-параллельно включенных тиристоров. Система управления тиристорами включает блоки:

- *Signal Generator* – генератор импульсов, подающий сигнал на открытие тиристора;
- *Binary Delay* – блок для установления времени задержки включения и времени выключения.

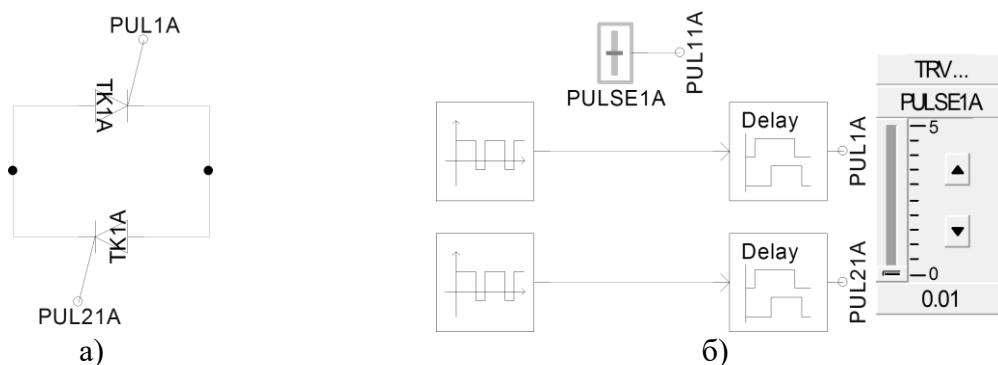


Рис. 5. Блок тиристорного регулятора в PSCAD:

- а) встречно-параллельное включение тиристоров; б) блок системы управления, содержащий генератор импульсов для подачи сигнала

Основными элементами модели ВЭУ (блок *Wind Farm*) являются:

1) компонент источника ветра (*Wind Source*) – моделирует скорость ветра, поступающую на турбину;

2) компонент ветровой турбины (*Wind Turbine*) – моделирует простую механическую физику ветровой турбины, учитывая конфигурацию лопастей (2 или 3 лопасти), отношение скорости вращения наконечника, коэффициент мощности, площадь и радиус поворота лопасти.

3) компонент регулятора ветровой турбины (*Wind Turbine Governor*) – этот компонент моделирует регулятор угла наклона ветровой турбины. Входными в модель являются механическая скорость машины Wm и выходная мощность машины Pg . Выходной сигнал представляет собой угол наклона турбины.

4) синхронный генератор (*Synchronous Machine*) – данный компонент имеет возможность моделировать две демферные обмотки на оси Q и, следовательно, его можно использовать либо как неявнополусную, либо как явнополусную машину. Скорость машины можно контролировать напрямую, путем ввода положительного значения на W вход, или путем ввода механического крутящего момента на вход Tm .

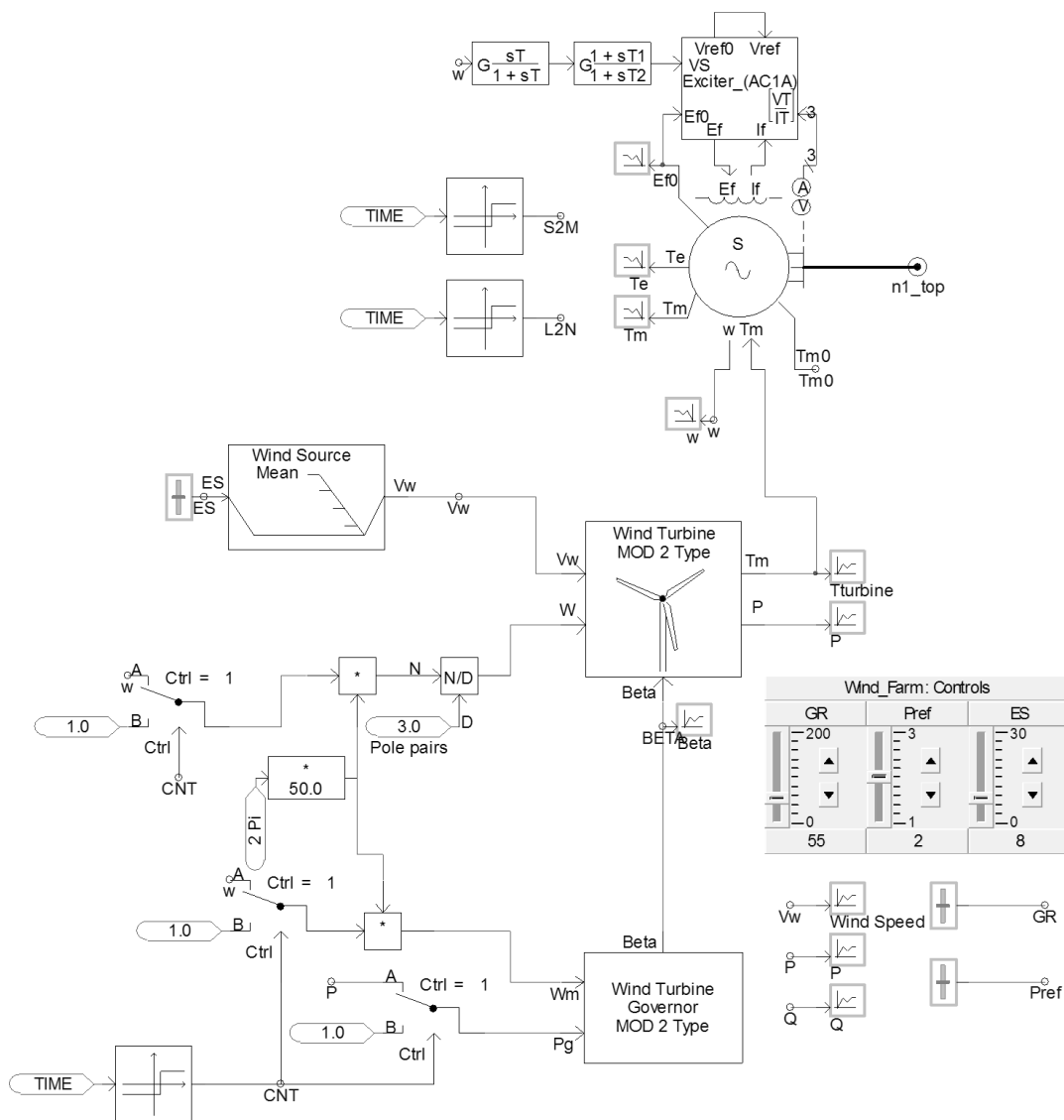


Рис. 6. Модель ветроэнергетической установки

Имитационная модель сети с ВИЭ и ТРМ позволяет:

1) исследовать работу ТРМ в сети с ВИЭ в нормальных и аварийных режимах электрической сети;

2) исследовать влияние разнотипных ВИЭ на показатели качества электроэнергии;

3) апробировать алгоритмы управления потоками мощности при использовании ТРМ.

Дальнейшая работа, связанная с оптимизацией имитационной модели, направлена на настройку параметров ВЭУ с учетом ее системы управления, а также применение алгоритма двухзонного поочередного управления тиристорами ТРМ [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых – кандидатов наук МК-270.2022.4 (соглашение №075-15-2022-734 от 12 мая 2022 г.).

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
2. **Kralin, A.**, Kryukov, E., Eremenko V. Thyristor Voltage Regulator Application in Radial Electrical Networks for Power Flow Control / *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 81-85, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877680.
3. **Кралин, А.А.**, Асабин А.А., Бедретдинов Р.Ш. и др. Исследование влияния тиристорного регулятора напряжения на изменение потоков мощности в распределительных электрических сетях / Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. С. 199-205.
4. **Лоскутов, А.А.** Исследование электромагнитных переходных процессов в программном комплексе PSCAD на примере простейшей системы электроснабжения. – Н. Новгород: НГТК им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 56 с.
5. **Асабин, А.А.** Исследование тиристорного регулятора напряжения в режиме поперечного регулирования / А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков, Р.Ш. Бедретдинов / Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы XI Международной научно-технической конференции. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. С. 183-186. – EDN ODTSOI.
6. **Асабин, А.А.** Система управления тиристорного регулятора напряжения / А.А. Асабин, И.В. Белянин, Е.Н. Соснина [и др.] // Интеллектуальная электротехника. – 2020. – № 1(9). – С. 25-39. – DOI 10.46960/2658-6754_2020_1_25. – EDN WZOIPS.

R.S. Bedretdinov, D.A. Gusev, E.V. Kryukov

**SIMULATION MODEL OF AN ELECTRICAL NETWORK WITH
A THYRISTOR POWER REGULATOR AND RENEWABLE ENERGY
SOURCES**

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the issue of control of power flows in an electrical network with a distributed generation using a thyristor power regulator (TPR). A simulation model of an electric network with a traditional generation source, a renewable energy source (RES) and TPR is developed in the PSCAD software package. The developed model and its main elements is given. The simulation model allows to develop optimal power flows control algorithms using TPR.

Key words: thyristor power controller, distributed generation, longitudinal and transverse regulation, simulation model.

References

- [1] Decree of the Government of the Russian Federation No. 1523-r dated 09.06.2020 "On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035" (in Russian)
- [2] A. Kralin, E. Kryukov and V. Eremenko, "Thyristor Voltage Regulator Application in Radial Electrical Networks for Power Flow Control," 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 81-85, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877680.
- [3] Kralin A.A., Asabin A.A. Bedretdinov R.S. et. al. Research of the effect of a thyristor voltage regulator on the power flows changing in distribution electrical networks // Actual problems of the electric power engineering: A collection of scientific and technical articles of the conference. – NNSTU n.a. R. E. Alekseev, N. Novgorod, 2021. – p. 199-205.
- [4] Loskutov A.A. Investigation of electromagnetic transients in the PSCAD software package on the example of the simplest power supply system // NNSTU n.a. R. E. Alekseev, N. Novgorod, 2020. – 56 p.
- [5] Asabin A.A., Kralin A.A., Kryukov E.V., Bedretdinov R.S. Investigation of a thyristor voltage regulator in the mode of transverse regulation / A.A. Asabin, A.A. Kralin, E.V. Kryukov, R. S. Bedretdinov // Electric power industry through the eyes of youth: Materials of the XI International Scientific and Technical Conference. – Stavropol: North Caucasus Federal University, 2020. – pp. 183-186. – EDN ODTSOI.
- [6] Asabin A.A., Belyanin I.V., Sosnina E.N. Control system of thyristor voltage regulator / A. A. Asabin, I.V. Belyanin, E.N. Sosnina [et al.] // Intelligent electrical engineering. – 2020. – № 1(9). – Pp. 25-39. – DOI 10.46960/2658-6754_2020_1_25. – EDN WZOIPS.

УДК 621.352.6

DOI: 10.46960/apeen_2023_350

И.А. Благушин, А.В. Шалухо

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Работа посвящена проблеме повышения энергетической безопасности очистных сооружений за счет применения локальных источников энергии, работающих на топливе из продуктов очистки. В качестве локальных источников рассматриваются твердооксидные топливные элементы, которые отличаются высокой эффективностью и отсутствием отрицательного влияния на окружающую среду. В статье приведена классификация очистных сооружений, показаны примеры использования локальных источников в их системах электроснабжения. Представлена методика расчета количества произведенного биогаза из очистных отходов при анаэробном сбраживании. Выполнено обоснование возможности применения твердооксидных топливных элементов.

Ключевые слова: очистные сооружения, твердооксидные топливные элементы, биогаз, анаэробное сбраживание.

На территории России расположено большое количество небольших населенных пунктов, удаленных от централизованных систем электроснабжения и водоотведения. В жизнеобеспечении таких поселений особо важная роль отводится очистным сооружениям, которые можно отнести к объектам критически важной инфраструктуры. В современных условиях актуальной задачей является повышение энергетической безопасности данных объектов.

Решение задачи основано на применении собственных (локальных) источников электроэнергии, способных работать на местном топливе [1]. Применительно к очистным сооружениям перспективным является получения биогаза путем анаэробного сбраживания продуктов очистки, которое считается одним из наиболее экономичных и эффективных методов обработки осадка.

При этом актуальным является разработка научно-технических решений, обеспечивающих эффективное применение локальных источников энергии, использующих в качестве топлива биогаз. Цель работы заключается в исследовании эффективности применения твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), работающих на биогазе, в системах электроснабжения очистных сооружений. В данной статье отражены вопросы, связанные с обоснованием и оценкой возможности производства на очистных сооружениях, требуемого для работы ТОТЭ объемов биогаза.

Классификация очистных сооружений

Очистные сооружения – это комплекс специальных сооружений, предназначенный для очистки сточных вод от содержащихся в них загрязнений. На рис. 1 представлены основные блоки, которые могут входить в состав очистных сооружений.

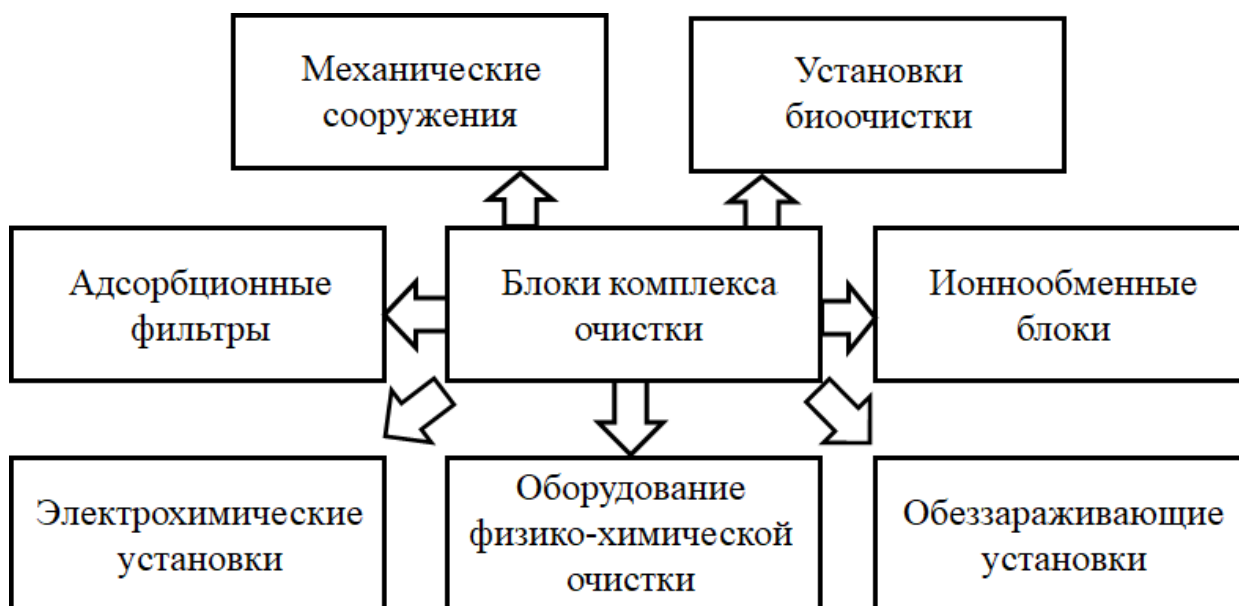


Рис. 1. Составляющие блоки очистных сооружений

Можно выделить два основных типа очистных сооружений – водопроводные и канализационные. Каждый из типов имеет свои разновидности, а также специфические особенности как по составу и устройству отдельных сооружений, так и по технологическим процессам, происходящим в них.

Также очистные сооружения классифицируются по производительности в зависимости от объема сброса сточных вод (табл. 1).

Таблица 1

Классификация очистных сооружений в зависимости от объема сброса сточных вод, м³/сут.

| | |
|--------------|-------------------|
| Сверхкрупные | Свыше 600 000 |
| Крупнейшие | 200 001 - 600 000 |
| Крупные | 40 001-200 000 |
| Большие | 10 001-40 000 |
| Средние | 4 001-10 000 |
| Небольшие*) | 1 001-4 000 |
| Малые*) | 101-1 000 |
| Сверхмалые*) | 10-100 |

Для дальнейшей работы в качестве объекта исследования выбраны канализационные очистные сооружения.

Производство биогаза на очистных сооружениях

Биогаз – это смесь газов, основными компонентами которого являются метан (СН₄) – 55–70 % и углекислый газ (СО₂) – 24–43 %. На очистных сооружениях эффективным методом производства биогаза является анаэробное сбраживание. Анаэробное сбраживание – это процесс разложения органической части осадка до простых соединений, происходящий в метантенках, в результате чего происходит образование биогаза.

Анаэробный распад органических веществ на очистных сооружениях проходит в три стадии:

Стадия 1 - переход высокомолекулярных органических веществ под воздействием экстрацеллюлярных ферментов в субстрат, потребляемый микроорганизмами.

Стадия 2 - кислое сбраживание органических веществ с образованием низкомолекулярных кислот, двуокиси углерода, аммиака, сероводорода и воды.

Стадия 3 - метановое брожение органических веществ с образованием аммиака, метана, свободного азота, сероводорода и воды.

Примером внедрения технологии получения биогаза для дальнейшего производства электроэнергии являются очистные сооружения города Слонима. Производство биогаза составляет 845,3 тыс. м³, а выработка электроэнергии – 2010 тыс. кВтч в год [2]. Это составляет 70 % от энергопотребления очистных сооружений водоканала за год.

Методика расчета производства биогаза на очистных сооружениях

Для определения возможности применения твердооксидных топливных элементов в системах электроснабжения очистных сооружений требуется оценить объемы производства биогаза для выбранного объекта исследований.

В метантенк для обезвреживания поступают три вида осадков:

- 1) отбросы с решеток, которые сначала измельчают на дробилках;
- 2) осадок из первичных отстойников;
- 3) избыточный активный ил, который предварительно обрабатывают в илоуплотнителях.

1. Количество сухого вещества осадков (т/сут.) вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{сух}} = \frac{M(100-W)\rho}{100}, \quad (1)$$

где M — количество осадка, м³/сут.; W — влажность сырого осадка, %; ρ — плотность осадка, равная 1 т/м³

2. Расход осадка и ила по беззольному веществу (т/сут.) вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{без}} = \frac{Q_{\text{сух}}(100-B_{\Gamma})(100-S_{\text{OC}})}{100 \cdot 100}, \quad (2)$$

где B_{Γ} — гигроскопическая влажность осадка, равная 5 %; S_{OC} — зольность сухого вещества осадка (для отбросов с решеток и осадка из первичных отстойников $S_{\text{OC}} = 30$ %; для активного ила $S_{\text{OC}} = 25$ %).

3. Среднее значение влажности смеси (%) вычисляется по формуле:

$$V_{см} = 100 \left(1 - \frac{M_{сух}}{M_{общ}} \right). \quad (3)$$

4. Объем метантенка (м³) рассчитывается по формуле:

$$V = M_{общ} \frac{100}{D}, \quad (4)$$

где $M_{общ}$ — суточный расход осадков, м³/сут.; D — суточная доза загрузки осадка в метантенк, %.

5. Предел распада смеси (%) рассчитывается по формуле:

$$a_{см} = \frac{a_0 Q_{без} + a_{и} U_{без}}{M_{без}}, \quad (5)$$

где a_0 , $a_{и}$ — пределы распада осадка и ила: $a_0 = 53$ %, $a_{и} = 44$ %; $M_{без}$ — общее количество беззольного вещества смеси осадка и ила, т/сут.; $Q_{без}$ — суммарное количество беззольного вещества отбросов с решеток и беззольного вещества осадка и первичных отстойников, т/сут.; $U_{без}$ — количество беззольного вещества уплотненного избыточного ила из илоуплотнителей, т/сут.

7. Выход газа на 1 кг загруженного беззольного вещества (м³) рассчитывается по формуле:

$$\gamma' = \frac{a_{см} - n D^1}{100}, \quad (6)$$

где n — коэффициент, зависящий от влажности осадка и температурного режима сбраживания, принимаемый согласно табл. 2.

Таблица 2

Значений коэффициента n

| Режим сбраживания | Значение коэффициента n при влажности загружаемого осадка, %, не более | | | | |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 |
| Мезофильный | 1,05 | 0,89 | 0,72 | 0,56 | 0,40 |
| Термофильный | 0,455 | 0,385 | 0,310 | 0,240 | 0,170 |

8. Суммарный выход газа (м³/сут.), равен [3]:

$$\Gamma = \gamma' \cdot M_{без} \cdot 1000. \quad (7)$$

Выводы

Применение локальных источников энергии, работающих на биогазе из продуктов очистки, является перспективным решением для повышения энергетической безопасности очистных сооружений. Представлена классификация очистных сооружений и методика расчета производства биогаза.

Дальнейшая работа будет посвящена выбору объекта исследования и исследованию эффективности применения в системе электроснабжения твердооксидных топливных элементов, работающих на биогазе.

Библиографический список

1. **Loskutov, A.**, Kurkin, A., Shalukho, A., Lipuzhin, I. New Trends and Prospects for Developing Local Power Sources Based on Fuel Cells and Power Storage Units for Critical Infrastructure Customers // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 197. – DOI 10.3390/en16010197.
2. Слонимский водоканал [Электронный ресурс]. URL: <http://www.slonimvodokanal.by/index.php/ru/mezhdunarodnoe-sotrudnichestvo/>.
3. **Благодарумова, А.М.** Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод. – М.: «Лань», 2020. – 204 с.

I.A. Blagushin, A.V. Shalukho

APPLICATION OF LOCAL ENERGY SOURCES IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF PURIFICATION FACILITIES (BY THE EXAMPLE OF SOLID OXIDE FUEL CELLS)

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The paper is devoted to the problem of improving the energy security of treatment facilities through the use of local energy sources operating on fuel from the treatment products. Solid oxide fuel cells are considered as local sources, which are distinguished by high efficiency and no negative impact on the environment. The article provides a classification of treatment facilities, shows examples of the use of local sources in their power supply systems. A method for calculating the amount of biogas produced from sewage treatment waste during anaerobic digestion is presented. The possibility of using solid oxide fuel cells is justified.

Keywords: treatment facilities, solid oxide fuel cells, biogas, anaerobic digestion

References

1. Loskutov, A., Kurkin, A., Shalukho, A., Lipuzhin, I. New Trends and Prospects for Developing Local Power Sources Based on Fuel Cells and Power Storage Units for Critical Infrastructure Customers // *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 197. – DOI 10.3390/en16010197.
2. Slonim Vodokanal [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.slonimvodokanal.by/index.php/ru/mezhdunarodnoe-sotrudnichestvo/>.
3. Blagorazumova, A.M. Treatment and dehydration of urban sewage sludge. Lan publishing house. 2020. 204 p.

И.Д. Георгиевский

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ ЗА СЧЕТ СОЗДАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Аннотация. Поскольку ветроэнергетика – это одна из динамично развивающихся отраслей электроэнергетики, то вопрос повышения эффективности функционирования ветровых электростанций (ВЭС) в составе энергосистем является актуальным. Одним из возможных вариантов решения поставленной задачи является объединение ВЭС в ветроэнергетический комплекс (ВЭК), использующий асинхронность поступления ветрового ресурса на разные площадки ВЭС, рассредоточенные по территории региона. В статье проведены результаты анализа топливно-энергетического комплекса Республики Адыгея, выбраны перспективные площадки для размещения ВЭС, разработана модель вертикального профиля ветра (ВПВ) для первоочередной площадки, а также выбрана расчетная модель ветроэнергетической установки (ВЭУ) и определен оптимальный состав ВЭК.

Ключевые слова: энергия ветра, ветроэнергетическая установка, ветровая электростанция, ветроэнергетический комплекс, энергосистема

В последние годы одной из динамично развивающихся в мире отраслей энергетики является ветроэнергетика. По итогам 2022 г. суммарная установленная мощность ВЭС в мире составила 836 ГВт, увеличившись по сравнению с 2021 г. на 66 ГВт (примерно на 8,5%) [1]. Толчком к развитию ветроэнергетики в России послужила программа поддержки возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – ДПМ ВИЭ-1 в соответствии с Постановлением Правительства РФ №449 от 28 мая 2013 г. По состоянию на июль 2022 г. в рамках ДПМ ВИЭ на оптовом рынке электроэнергии и мощности введены в эксплуатацию 95 объектов ВИЭ-генерации совокупной мощностью 3,74 ГВт, в том числе 22 ВЭС – 1,93 ГВт [2].

В рамках реализации программы ДПМ ВИЭ в Республике Адыгея в 2020 г. введена в эксплуатацию Адыгейская ВЭС установленной мощностью 150 МВт. Ввод новых ВЭС в состав энергосистемы может оказать отрицательное влияние на управление и надежность энергосистемы, по причине стохастического характера выработки электроэнергии и, как следствие, мгновенных небалансов мощности, которые влекут за собой отключение генераторов электростанций и потребителей электроэнергии [3, 4]. Таким образом, интеграция новых ВЭС требует оценки их влияния на режимы работы энергосистемы с целью сохранения устойчивости ее функционирования.

Одним из способов повышения эффективности работы ВЭС в энергосистеме является их объединение в ветроэнергетические комплексы (ВЭК) с помощью создания энергетических, инфраструктурных и информационных связей. Объединение ВЭС в ВЭК может способствовать, в силу наличия асинхронности

поступления ветрового ресурса к отдельным ВЭС комплекса, снижению колебания мощности, вырабатываемой оперативно-диспетчерским комплексом ВЭС и к появлению гарантированной мощности от комплекса ВЭС в целом [5].

Выбор площадок под размещение ВЭС

Республика Адыгея находится в зоне диспетчерского управления энергосистемы Краснодарского края и Республики Адыгея. Долевое участие Республики Адыгея в общем потреблении мощности энергосистемы Краснодарского края и Республики Адыгея составляет незначительную долю (примерно 5,5%). На данный момент из-за развития обрабатывающих производств, увеличения добычи полезных ископаемых, продолжающегося развития сельскохозяйственного производства и спроса на туристические услуги, Республика Адыгея является энергодефицитным регионом [6].

По общеизвестным формулам [7] по данным 10-ти наземных метеостанций (МС) с сайта «Расписание погоды» были рассчитаны основные среднегодовые энергетические характеристики ветра на высоте 10 м. В результате проведенных расчетов была выявлена слабая ветровая активность на высоте 10 м на площадках, всех рассмотренных МС, поскольку среднегодовые скорости не превышают 2,9 м/с (МС Усть-Лабинск).

При выборе площадки в рассматриваемом регионе в первую очередь рассматривались площадки с наибольшей ветровой активностью, а также учитывались транспортная доступность площадки, возможность технического присоединения ВЭС к существующим подстанциям (ПС) и отсутствие социальных и экологических ограничений. В результате были выбраны 4-е перспективных варианта местоположения площадки ВЭС, близкие к: МС Дондуковская (площадка №1), МС Круглик (площадка №2), МС Лабинск (площадка №3), МС Усть-Лабинск (площадка №4) (рис. 1).

В качестве первоочередной была выбрана площадка №1. После этого был проведен расчет основных энергетических характеристик ветра на 4-х перспективных площадках ВЭС, в результате чего в качестве расчетного был выбран 2017 г. для условий четырех площадок ВЭС.

Разработка модели вертикального профиля ветра (ВПВ)

Для разработки модели ВПВ для условий площадки №1 рассматривались данные:

- ветроизмерительного комплекса (ВИК), удаленного от площадки ВЭС (МС Дондуковская) на 13 км;
- ближайших к МС Дондуковская аэрологических метеостанций (АМС): АМС Минеральные воды, АМС Ростов-на-Дону и АМС Туапсе.

В результате были разработаны три модели ВПВ и в качестве применимой выбрана комбинированная модель ВПВ по данным ВИК и АМС Минеральные воды: $m_i = 0,5768 \cdot V_i^{-0,662}$, где m_i , о.е. – показатель степени, V_i , м/с – скорость ветра.

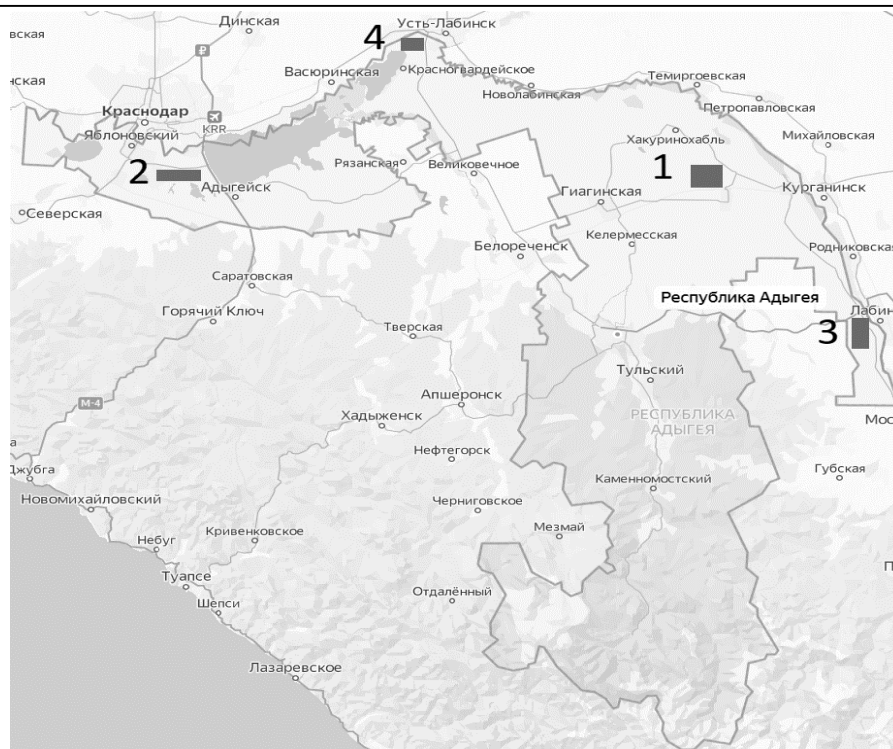


Рис. 1. Расположение перспективных площадок под размещение ВЭС на территории Республики Адыгея

Выбор расчетной модели ветроэнергетической установки и оценка выработки ВЭС

Выбор конкретной модели ветроэнергетической установки (ВЭУ) для размещения в составе ВЭС производился среди вариантов установок, подходящих по: единичной номинальной мощности ВЭУ с учетом возможности транспортировки и монтажа; требованиям по локализации в соответствии с ДПМ ВИЭ-1; классу безопасности ВЭУ в соответствии с ГОСТ Р54435-2011; климатическому исполнению в соответствии с ГОСТ Р51991-2002.

В соответствии с заданными критериями выбрано три варианта ВЭУ, а окончательный выбор расчетной модели ВЭУ производился на основе технико-экономического расчета (табл. 1). Для всех вариантов расчет производился на высоте башни ВЭУ ($H_{вэу}$) 149 м.

Таблица 1

Технико-экономические показатели 3-х моделей ВЭУ в условиях площадки №1 (МС Дондуковская)

| Показатель | Lagerwey L100-2,5 АО «НоваВинд» | Vestas V126-4,2 ООО | SiemensGamesa SG132-3,4 ООО «Сименс» |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Номинальная мощность, МВт | 2,52 | 4,2 | 3,465 |
| Диаметр ротора, м | 100 | 126 | 132 |

Окончание табл. 1

| | | | |
|---|-----------|-----------|-------|
| Высота оси ветроколеса, м | 100 | 87 | 84 |
| Класс ВЭУ | ША | ПВ | ПА |
| Предельные температуры, °С | -20...+50 | -40...+50 | - |
| Рабочий диапазон температур, °С | -10...+40 | -20...+45 | - |
| Годовая выработка $\mathcal{E}_{\text{год}}$, млн.кВт·ч | 8,98 | 14,35 | 12,79 |
| Коэффициент использования установленной мощности ($K_{\text{иум}}$) | 0,41 | 0,39 | 0,42 |
| Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн.руб/год | 85,7 | 176,6 | 171,0 |
| Срок окупаемости $T_{\text{ок}}$, год | 11,9 | 8,7 | 8,3 |

На основе технико-экономического обоснования для условий четырех площадок ВЭС в качестве расчетной модели была выбрана ВЭУ марки SG132-3,4 производителя Siemens-Gamesa мощностью 3,465 МВт.

После этого была определена схема размещения ВЭУ на площадке №1 (МС Дондуковская) с учетом преобладающего направления ветра, при размещении ВЭУ на расстоянии 10 диаметров ветроколеса ($D_{\text{вк}}$). С учетом площади первоочередной площадки определено количество ВЭУ на площадке ВЭС – 16 ($N_{\text{уст}} = 55,4$ МВт). Годовая выработка ВЭС составила 174,65 ГВт·ч/год.

Оптимизация ветроэнергетического комплекса

В качестве критериев эффективности для оптимизации конфигурации и состава ВЭК были выбраны: максимальное значение выработки электроэнергии ВЭК за расчетный период; показатели отдаваемой мощности при заданной обеспеченности 75% и 90%; минимальное значение коэффициента вариации отдаваемой мощности ВЭК за расчетный период C_N .

Оптимальный состав ВЭК определялся методом ранжирования критериев эффективности и вариант, при котором достигалось наименьшее значение интегрального критерия, считался наилучшим.

Для 18-и вариантов состава ВЭК были рассчитаны выбранные критерии эффективности (табл. 2), проведено их ранжирование и определен средний ранг по интегральному критерию (табл. 3).

Таблица 2

Критерии, учитываемые при выборе оптимального состава ВЭК

| № вар. ВЭК | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Э _{ВЭК} , ГВт·ч/год | 212 | 107 | 178 | 138 | 186 | 204 | 194 | 134 | 187 | 157 | 177 | 168 | 185 | 151 | 141 | 177 | 169 | 167 |
| C _N , о.е. | 0,77 | 1,27 | 0,95 | 1,15 | 0,78 | 0,74 | 0,73 | 0,98 | 0,82 | 0,89 | 0,76 | 0,75 | 0,73 | 0,85 | 0,85 | 0,79 | 0,81 | 0,80 |
| N _{p=75%} , МВт | 4,17 | 0,44 | 3,37 | 0,81 | 4,78 | 7,38 | 6,78 | 4,70 | 6,00 | 5,25 | 6,69 | 7,06 | 7,88 | 5,77 | 5,75 | 6,38 | 5,97 | 5,50 |
| N _{p=75%} , в % от N _{ВЭК} | 7,7 | 0,8 | 6,2 | 1,5 | 8,8 | 13,6 | 12,5 | 8,6 | 11,0 | 9,7 | 12,3 | 13,0 | 14,5 | 10,6 | 10,6 | 11,7 | 11,0 | 10,1 |
| N _{p=90%} , МВт | 4,17 | 0 | 0 | 0 | 3,13 | 3,43 | 3,22 | 1,04 | 1,95 | 1,32 | 3,74 | 3,30 | 3,49 | 2,69 | 2,44 | 1,40 | 2,69 | 2,38 |
| N _{p=90%} , в % от N _{ВЭК} | 7,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,8 | 6,3 | 5,9 | 1,9 | 3,6 | 2,4 | 6,9 | 6,1 | 6,4 | 4,9 | 4,5 | 2,6 | 4,9 | 4,4 |

Таблица 3

Результаты определения среднего ранга по интегральному критерию

| № вар. ВЭК | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|-----------------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------|
| Сумма критериев | 5,4 | 25,0 | 15,2 | 23,0 | 7,8 | 2,6 | 3,4 | 20,6 | 8,0 | 15,4 | 5,6 | 7,2 | 3,6 | 13,4 | 15,6 | 9,6 | 9,6 | 10,8 |

В результате проведенных расчетов было выявлено, что оптимальным вариантом состава ВЭК является вариант № 6, в составе 12-ти ВЭУ на площадке №1 и 4-х ВЭУ на площадке №3. При такой компоновке выработка ВЭК составляет 204 ГВт·ч/год, мощность при обеспеченности 75 % равна 7,38 МВт (13,6 % от установленной мощности ВЭК), а при обеспеченности 90 % – 6,3 МВт (6,3 % от установленной мощности ВЭК).

Выводы

За счет асинхронности поступления ветра к ВЭС возможно увеличение суммарной выработки от комплекса ВЭС. Иными словами, ВЭС на площадках которых наблюдается высокая ветровая активность, дополняют выработку ВЭС, на которых, в этот же момент времени, ветровая активность низкая.

Исследование асинхронности ветра в Республике Адыгея показало, что наиболее оптимальный состав ВЭК (вариант № 6) позволяет получить мощность при обеспеченности 90% около 6,3 % от установленной мощности ВЭК, что немного меньше по сравнению с наилучшим вариантом при размещении ВЭК на одной площадке (вариант №1) – 7,7 % от установленной мощности ВЭК. Однако, при обеспеченности 75% оптимальный вариант №6 показывает мощность около 13,6% от установленной мощности ВЭК, что почти в 2 раза больше чем в варианте №1.

Окончательный вывод о показателях эффективности ВЭК на территории Республики Адыгея может быть сделан после рассмотрения всех возможных вариантов компоновки ВЭК с учетом возможного расположения площадок в соседних регионах. Интеграция же новых ВЭС в энергосистему требует оценки их влияния на режимы работы энергосистемы, поскольку стохастического характер выработки электроэнергии ВЭС могут оказать негативное влияние на устойчивость и функционирование энергосистемы.

Библиографический список

1. IRENA. Renewable capacity statistics 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023> (дата обращения: 25.05.2023)
2. Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://rreda.ru/information-bulletin-july2022> (дата обращения: 10.02.2023).
3. **Илюши, П.В.** Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единую энергетическую систему России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // Вестник МЭИ. – 2022. – № 4. – С. 98-107.
4. **Илюшин, П.В.**, Георгиевский, И.Д. Обзор возможностей для увеличения доли ветровых и солнечных электростанций в структуре генерирующих мощностей энергосистем // Энергетик. – 2023. – № 5. – С. 13-18.
5. **Ernst, B.**, Wan, Y-H., Kirby, B., Short-Term Power fluctuations of Wind Turbines: Analyzing Data from the German 250-MW Measurement Program from the Ancillary Services Viewpoint // National Renewable Energy Laboratory. 1999
6. Распоряжение об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Республики Адыгея на 2022 - 2026 годы, 2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.adygheya.ru/ministers/departments/ministerstvo-ekonomicheskogo-razvitiya-i-torgovli/toplivno-energeticheskiiy-kompleks/skhemy/> (дата обращения: 25.05.2023)
7. **Васьков А.Г.**, Дерюгина, Г.В., Малинин, Н.К., Пугачев, Р.В. Ветроэнергетика. – М.: МЭИ, 2016. – 384 с.

I.D. Georgievskiy

IMPROVING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING WIND POWER PLANTS AS PART OF POWER SYSTEMS DUE TO THE CREATION OF A WIND ENERGY COMPLEX

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Abstract. Since wind power is one of the dynamically developing branches of electric power, the issue of increasing the effective functioning of wind power plants (WPP) as part of power systems is relevant. One of the possible solutions to this problem is the unification of the WPP into a wind energy complex (VEC), using the asynchrony of the wind resource flow to different wind power plant sites dispersed throughout the region. In the article, the results of the analysis of the fuel and energy complex of the Republic of Adygea are carried out, the prospective sites for the placement of WPP are selected, a wind speed profile model for the priority site is developed, and a design model of a wind power turbine is selected and the optimal composition of the VEC is determined.

Keywords: wind energy, wind power plant, wind power turbine, wind power complex, power system.

References

- [1] IRENA. Renewable capacity statistics 2023 [Online]. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023> (Accessed: 25.05.2023).
- [2] Rynok vobnovlyajemoj energetiki rossii: tekushchij status i perspektivy razvitiya [Renewable energy market of Russia: current status and development prospects]. 2022. [Online]. Available at: <https://rreda.ru/information-bulletin-july2022> (Accessed: 10.02.2023).
- [3] Ilyushin P.V. Integraciya elektrostancij na osnove vobnovlyajemyh istochnikov energii v Edinuyu energeticheskuyu sistemu Rossii: obzor problemnyh voprosov i podhodov k ih resheniyu [Integration of RES-based Power Plants into the Unified Energy System of Russia: Problematic Issues and Approaches to Solving Them] // Vestnik MEI [Bulletin of MPEI], 2022, №4, pp. 98-107. (in Russian)
- [4] Ilyushin P.V., Georgievskiy I.D. Obzor vozmozhnostej dlya uvelicheniya doli vetrovyh i solnechnyh elektrostancij v strukture generiruyushchih moshchnostej energosistem [Overview of opportunities for increasing the share of wind and solar power plants in the structure of generating capacities of power systems] // Energetik [Power engineer], 2023, №5, pp. 13-18 (in Russian)
- [5] Ernst, B., Wan, Y-H., Kirby, B., Short-Term Power fluctuations of Wind Turbines: Analyzing Data from the German 250-MW Measurement Program from the Ancillary Services Viewpoint // National Renewable Energy Laboratory. 1999
- [6] Rasporyazhenie ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergetiki Respubliki Adygeya na 2022 - 2026 gody [Order on approval of the scheme and program for the development of the electric power industry of the Republic of Adygea for 2022-2026]. 2021. [Online]. Available at: <http://www.adygheya.ru/ministers/departments/ministerstvo-ekonomicheskogo-razvitiya-i-torgovli/toplivno-energeticheskij-kompleks/skhemy/> (Accessed: 25.05.2023)
- [7] A. G. Vas'kov, G. V. Deryugina, N. K. Malinin i R. V. Pugachev, Vetroenergetika [Wind power]. Moscow: Publishing House of MPEI, 2016, pp. 384 (in Russian)

С.В. Голобоков¹, В.А. Агеев², К.С. Ушаков¹, И.К. Стеняев¹

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ПОВОЛЖЬЕ

Пензенский государственный университет¹

Мордовский национальный исследовательский университет им. Н.П. Огарева²

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы применения солнечной электростанции в климатических условиях Пензенской области, в Поволжье. Проведен анализ гелиопотенциала. Выполнено моделирование режимов работы солнечной панели в течение светового дня, выбрана марка фотоэлектрического преобразователя. Исследовано влияние состояния атмосферы на выходную мощность модуля солнечной электростанции. Рассмотрены варианты схем подключения панелей к инвертору, обеспечивающие выработку максимальной мощности. Выданы рекомендации по проектированию солнечной электростанции и выдачи мощности в районные сети.

Ключевые слова: солнечная инсоляция, солнечная панель, расчетная мощность модуля, потери электроэнергии, главная схема солнечной электростанции, инвертор.

Проектирование солнечной электростанции (СЭС) выполняется с целью эффективного использования солнечного излучения в конкретной местности. Необходимо обеспечить оптимальную расстановку солнечных панелей и вспомогательного оборудования на территории СЭС, снизить мощность и расстояние транзита по внутристанционным ЛЭП. Для солнечных панелей необходимо задавать угол наклона плоскости панелей, уменьшить длину прокладки кабелей, упростить эксплуатацию и обслуживание [1,2].

Мощность СЭС зависит от числа солнечных панелей. Для расчета требуемой площади земельного участка применяют удельную мощность. Площадь, которую занимают солнечные панели, составляет примерно половину площади СЭС. В качестве базового элемента приняты современные солнечные панели «Silasolar-400vt», производства компании «Solar-e» (КНР) [3]. Пиковая удельная мощность солнечных панелей равна 280 Вт/м².

На модели исследовано влияние погодных условий на мощность солнечной панели в течение светового дня. Солнечная панель «Silasolar-400 vt» площадью 2 м² установлена под углом 45° к горизонту с ориентацией на юг. В номинальном режиме при мощности излучения 1000 Вт/м² панель выдает ток 11 А при напряжении 44 В. В условиях Поволжья пиковая мощность излучения солнца составляет 800 Вт/м² мощность панели не превышает 400 Вт.

Появление облачности снижает мощность и инсоляции и генерации СЭС примерно на 25 %. В пасмурную погоду мощность падает наполовину, а во время

дождя и снега составляет не более 20 % от пиковой. В зимние месяцы (декабрь) мощность генерации составляет 40 % от летнего пика. Снегопад, облачность, метели уменьшают мощность СЭС почти до нуля.

График зависимости мощности солнечной панели в течение светового дня представлен на рис. 1.

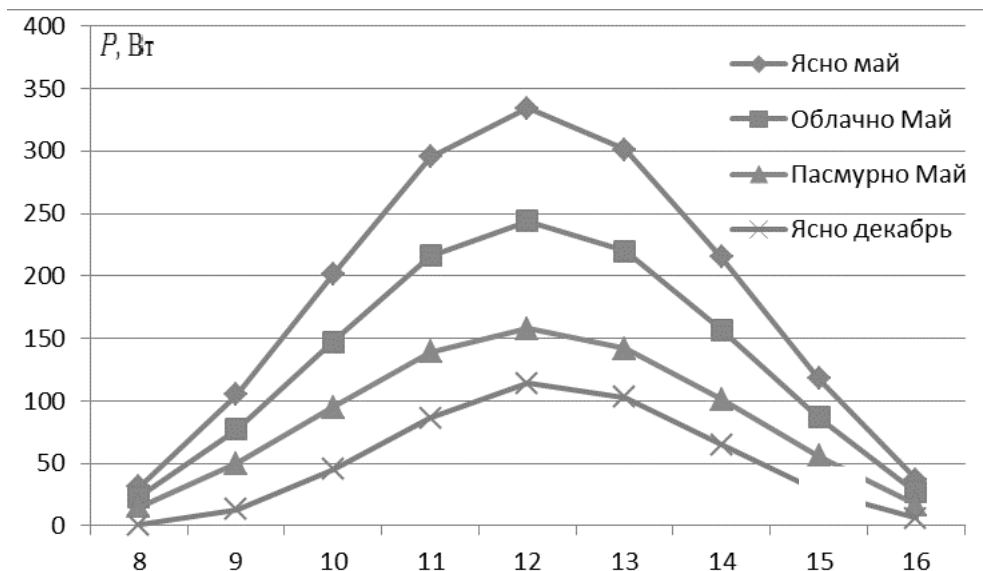


Рис. 1. График зависимости мощности солнечной панели от погоды

График показывает изменение мощности инсоляции зимой и летом. Зимой величина пика мощности снижается в 2,5 раза, время работы СЭС уменьшается с 14 часов летом до 8 часов зимой [4]. Объем генерации зимой в ясную погоду примерно в 4 раза меньше, чем летом.

Один модуль состоит из 10 параллельных ветвей, в каждую ветвь последовательно включено 8 панелей. Номинальный ток в ЛЭП, соединяющей модуль из 10 ветвей с инвертором, согласно паспорту, равен 100 А. Однако в условиях Поволжья солнечные панели в номинальном режиме не работают никогда. По данным ГИС-Метео в течение мая месяца в 2020 г. зафиксировано 5 ясных дней, 15 облачных, 10 пасмурных и 1 день шел дождь.

В табл. 2. представлены результаты расчетов режима работы одного модуля за май месяц 2020 г. Анализ данных показывает, что в наилучших условиях, в мае месяце время протекания тока 60 А по ЛЭП составляет 8 ч, а тока 70 А всего 6 ч. В относительных единицах это составляет 3 и 2 % общего времени. Диаграмма суммарного времени работы ЛЭП с заданным током в течение мая представлена на рис. 2.

Сечение токоведущих жил выбирается по предельно допустимому длительному току по условию нагрева. В соответствии с табл. 1 ПУЭ выбираем медный кабель сечением 35 мм² с допустимым током 125 А.

Комплексным показателем эффективности ВИЭ служит коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) [5]. Для солнечной панели в мае месяце в наилучших условиях КИУМ равен 0,135, в облачную погоду - 0,1, в пасмурную - не превышает 0,07.

Таблица 1

Результаты расчетов тока, мощности и объема выработки в мае 2020

| Время ч | Ясно (5 дней) | | | Облачно (15 дней) | | | Пасмурно (10 дней) | | |
|------------|---------------|--------------|----------------|-------------------|--------------|----------------|--------------------|--------------|----------------|
| | I_1 А | P_1 кВт | W_1 кВт-ч | I_2 А | P_2 кВт | W_2 кВт-ч | I_3 А | P_3 кВт | W_3 кВт-ч |
| 8 | 7,05 | 2,54 | 12,69 | 5,23 | 1,88 | 28,24 | 3,41 | 1,23 | 12,28 |
| 9 | 23,86 | 8,59 | 42,95 | 17,5 | 6,30 | 94,50 | 11,36 | 4,09 | 40,90 |
| 10 | 45,68 | 16,44 | 82,22 | 33,41 | 12,03 | 180,41 | 21,59 | 7,77 | 77,72 |
| 11 | 67,05 | 24,14 | 120,69 | 49,09 | 17,67 | 265,09 | 31,59 | 11,37 | 113,72 |
| 12 | 75,91 | 27,33 | 136,64 | 55,45 | 19,96 | 299,43 | 35,91 | 12,93 | 129,28 |
| 13 | 68,41 | 24,63 | 123,14 | 50,06 | 18,00 | 270,00 | 32,27 | 11,62 | 116,17 |
| 14 | 48,86 | 17,59 | 87,95 | 35,68 | 12,84 | 192,67 | 22,95 | 8,26 | 82,62 |
| 15 | 26,82 | 9,66 | 48,28 | 19,77 | 7,12 | 106,76 | 12,73 | 4,58 | 45,83 |
| 16 | 8,41 | 3,03 | 15,14 | 6,14 | 2,21 | 33,16 | 3,86 | 1,39 | 13,90 |
| Итого | | | 669 | | | 1470 | | | 632 |
| КИУМ | | | 0,135 | | | 0,099 | | | 0,064 |

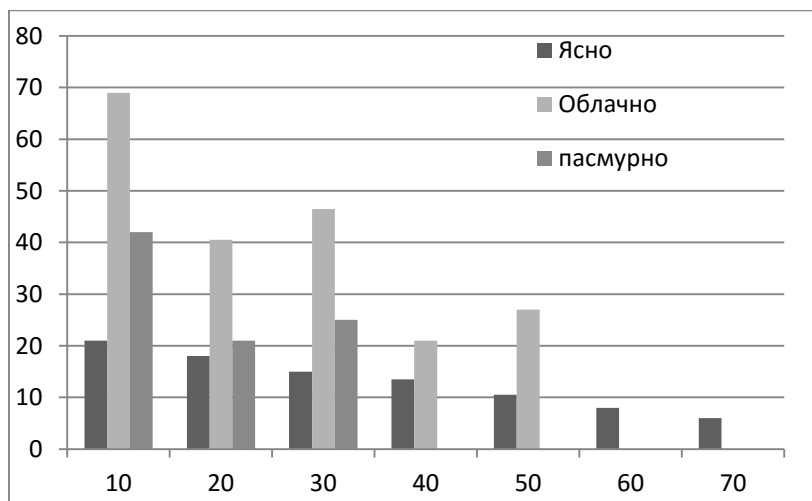


Рис. 2. Диаграмма зависимости времени работы ЛЭП с током за май месяц

Всего за месяц панель вырабатывает 2,77 тыс кВтч электроэнергии. В Поволжье в среднем за май месяц КИУМ равен 0,093, а за год – 0,074. Эти показатели слишком малы, применение СЭС в Поволжье и в средней полосе России крайне неэффективно.

Весной и осенью модуль из 80 солнечных панелей ток 100 А не выдает никогда. Зимой в ясную погоду модуль выдает ток 10 А в течение 66 ч в месяц. Ток 20 А протекает в течение 70 ч. В пасмурную погоду модуль не работает. Время протекания в ЛЭП тока 70 А за год составляет 11 ч, а тока 60 А – 26 ч. Время работы ЛЭП с током более 60 А всего 1 %.

Применение кабеля сечением 35 мм² с током 125 А технически неоправдано, кабель 16 ч в сутки не работает, а в рабочую смену недогружен, цветной металл расходуется нерационально. 83 % времени ток в ЛЭП не превышает 30 А, можно применить кабель уменьшенного сечения. Кабели не могут пропускать

максимальный ток более 2 ч, но в режиме частичных нагрузок работают длительное время без перегрева. В режиме пиковой мощности время работы ЛЭП и рабочий ток можно ограничить средствами автоматики.

Такой подход к проектированию распределительных сетей с ВИЭ вполне оправдан, поскольку режимы максимальной мощности встречаются нечасто. Расчетным режимом будет среднесменная мощность [5].

Проведем моделирование режимов работы ЛЭП с кабелями уменьшенного сечения. На модели выполнены расчеты объема вырабатываемой энергии при ограничении тока средствами РЗА для кабелей уменьшенного сечения токоведущих жил. Для проводов сечением 16 мм² допустимый длительный ток 80 А, для провода сечением 10 – 55А, для провода сечением 8 – 48 А. В пиковом режиме ток в ЛЭП ограничивается средствами РЗА. Расчетные показатели эффективности модулей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Величина тока в ЛЭП в течение светового дня

| Сечение | Ясно | | | Облачно | | | Пасмурно | | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 16 | 10 | 8 | 16 | 10 | 8 | 16 | 10 | 8 |
| Время | I_{10} | I_{11} | I_{12} | I_{20} | I_{21} | I_{21} | I_{30} | I_{31} | I_{32} |
| ч | А | А | А | А | А | А | А | А | А |
| 8 | 7,05 | 7,05 | 7,05 | 5,23 | 5,23 | 5,23 | 3,41 | 3,41 | 3,41 |
| 9 | 23,86 | 23,86 | 23,86 | 17,5 | 17,5 | 17,5 | 11,36 | 11,36 | 11,36 |
| 10 | 45,68 | 45,68 | 45,68 | 33,41 | 33,41 | 33,41 | 21,59 | 21,59 | 21,59 |
| 11 | 67,05 | 55 | 48 | 49,09 | 49,09 | 48 | 31,59 | 31,59 | 31,59 |
| 12 | 75,91 | 55 | 48 | 55,45 | 55,45 | 48 | 35,91 | 35,91 | 35,91 |
| 13 | 68,41 | 55 | 48 | 50,06 | 50 | 48 | 32,27 | 32,27 | 32,27 |
| 14 | 48,86 | 48,86 | 48,86 | 35,68 | 35,68 | 35,68 | 22,95 | 22,95 | 22,95 |
| 15 | 26,82 | 26,82 | 26,82 | 19,77 | 19,77 | 19,77 | 12,73 | 12,73 | 12,73 |
| 16 | 8,41 | 8,41 | 8,41 | 6,14 | 6,14 | 6,14 | 3,86 | 3,86 | 3,86 |

Анализ таблицы показывает, что для кабеля сечением 10 мм² ограничение тока в 55 А требуется только в ясную погоду. Для кабеля сечением 8 мм² ограничение тока в 48 А требуется в облачную погоду. В пасмурную погоду величина тока, выдаваемого модулем менее 48 А, ограничения тока нет.

Результаты расчетов для кабелей уменьшенного сечения представлены в табл. 4. Замена кабеля сечением 35 на 16 мм² не приводит к уменьшению годового объема выработки электроэнергии.Metalлоемкость кабеля при этом снижается в 2 раза. Переход с кабеля 16 на кабель 10 мм² приводит к снижению объема на 1,3 %, но металлоемкость кабеля падает на 37 %. Применение кабеля 8 мм² за счет ограничения тока в пиковом режиме дает снижение мощности на 2,1 %, металлоемкость кабеля падает еще на 18 %.

Переход с кабеля сечением 16 на кабель сечением 8 мм² приводит к падению объема выработки электроэнергии на 3 %. При этом темпы снижения металлоемкости замедляются в 2 раза – с 37 до 18 %.

Таблица 4

Результаты расчета эффективности модуля с разным кабелем

| Показатели | Обозн | Раз-ть | Сечение кабеля S мм ² | | | | | |
|------------------------------|------------|----------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 35 | 25 | 16 | 10 | 8 | 6 |
| Допустимый ток | I | А | 125 | 100 | 80 | 55 | 48 | 40 |
| Масса меди | m | кг | 124,6 | 89 | 57 | 35,6 | 28,5 | 21,4 |
| Годовой объем электроэнергии | W | Тыс кВтч | 19,21 | 19,21 | 19,21 | 18,9 | 18,5 | 17,7 |
| Снижение | ΔW | % | | 0 | 0,0 | 1,30 | 2,10 | 4,61 |
| Удельный расход меди | q | кг/МВтч | 6,485 | 4,632 | 2,965 | 1,877 | 1,534 | 1,206 |
| Снижение | Δq | % | | 28,57 | 36,00 | 36,67 | 18,28 | 21,37 |

Оптимальным для выбранного модуля будет применение кабеля сечением 10 мм². Применение уменьшенного сечения снижает стоимость кабеля и затраты на его монтаж.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что применение СЭС в Поволжье неэффективно, среднесменная мощность не превышает 43 % от установленной. Среднегодовое значение КИУМ равно 0,074. Случайный характер погоды не позволяет обеспечивать бесперебойное электроснабжение потребителей. СЭС развивает высокую мощность только 4 часа в сутки, применение СЭС без аккумулялирования энергии неэффективно. Для снижения стоимости можно применять кабели с уменьшенным сечением жил.

Библиографический список

1. **Алферов, Ж. И.** Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38 – № 8. – С. 937-948.
2. **Сибикин, Ю.Д.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: КноРус, 2022. – 228 с.
3. Климат Пензы. Под ред док-ра геогр. наук Ц.А. Швер, В.С. Никулиной, И.А. Поповой. – Л: Гидрометеиздат. 1988. – 182 с.
4. Каталог продукции фирмы «Silasolar» [Электронный ресурс] – URL: <https://e-solar-power.ru/solar/solar-panels/mono-panel/solnechnaya-batareya-silasolar-400vt-perc-5bb/> - (дата обращения 20.03.2023).
5. **Goryachev, V.** The Complex Optimization of the Solar Power Plant / V. Goryachev, S. Golobokov, A. Michaylov // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future» (EAF 2021).- 24 March 2022.- URL: <https://dx.doi.org/10.2991/aer.k.220308.011>.

S.V. Golobokov¹, V.A. Ageev², K.S. Ushakov¹, I.K. Stenyaev¹

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF A SOLAR POWER PLANT IN THE VOLGA REGION

Penza State University¹

Mordovia National Research University from N.P. Ogarev²

Annotation. The paper deals with the use of a solar power plant in the climatic conditions of the Volga region. The analysis of the solar potential is carried out. The simulation of the operating modes of the solar panel during daylight hours was carried out, the brand of the photovoltaic converter was selected. The influence of the state of the atmosphere on the output power of the solar power plant module is investigated. Variants of schemes for connecting panels to the inverter, ensuring the production of maximum power, are considered. Recommendations on the design of a solar power plant and power distribution to regional networks are issued.

Keywords: solar insolation, solar panel, module design power, electricity loss, main circuit of a solar power plant, inverter.

References

- [1] Alferov, Zh. I. Tendencies and prospects for the development of solar photoenergy / Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, V. D. Rumyantsev // Physics and technology of semiconductors. - 2004. - T. 38, № 8. - С. 937-948.
- [2] Sibikin Yu.D., Sibikin M.Y. Non-traditional and renewable energy sources: Textbook. – Moscow: KnoRus. -2022, 228 с.
- [3] Climate of Penza. Under the editorship of Dr. Geogr. Sci. Ts.A.Shver. L: Gidrometeoizdat.- 1988 – URL : http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-125132333.pdf (Retrieved 12.11.2022). - Text : electronic.
- [4] Products catalogue of the «Silasolar» company's. – URL : <https://e-solarpower.ru/solar/solar-panels/mono-panel/solnechnaya-batareya-silasolar-400vt-perc-5bb/> - Text : electronic.
- [5] Goryachev V. The Complex Optimization of the Solar Power Plant V.Goryachev, S.Golobokov, A. Michaylov Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021).- 24 March 2022.- URL: <https://dx.doi.org/10.2991/aer.k.220308.011>

УДК 621.311.24

DOI: 10.46960/apeen_2023_369

С.В. Голобоков¹, К.А. Душутин², Д.А. Буйнов¹, А.В. Клейменов¹

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Пензенский государственный университет¹Мордовский национальный исследовательский университет им. Н.П.Огарева²

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы применения ветрогенераторов в климатических условиях Пензенской области. Проведен анализ ветропотенциала. Выполнено моделирование режимов работы ветрогенераторов различной мощности и выбрана марки генератора, обеспечивающая выработку максимального объема электроэнергии. Рассмотрены вопросы проектирования ветровой электростанции.

Ключевые слова: ветропотенциал, расчетная мощность ветрогенератора, электроэнергия, главная схема ветровой электростанции.

Проектирование ветровой электростанции (ВЭС) включает выбор площадки ветропарка, марки и числа ветрогенераторов, схем подключения к сетям [1]. Мощность ВЭС зависит от единичной мощности и числа ВГ, ветропотенциала района, времени года. Ветропотенциал в Поволжском регионе невысокий, среднегодовая скорость ветра в Пензенской области равна 4,7 м/с, генерация значительной мощности невозможна.

Выдаваемая ВЭС мощность зависит от суточного графика нагрузки энергосистемы, категории надежности электроснабжения потребителей, схем резервирования. Для повышения эффективности ВЭС в условиях Поволжья и выбора марки ветрогенераторов (ВГ) выполнено моделирование режимов работы ВГ трех марок. Характеристики ВГ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики ветрогенераторов

| Марка ВГ | Мощность | Диаметр D | Высота h | Скорость мин, $v_{\text{мин}}$ | Скорость ном, $v_{\text{ном}}$ | Скорость max, v_{max} | КИ-ЭВП |
|--------------------|----------|-----------|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| | МВт | м | м | м/с | м/с | м/с | |
| Acciona AW82-1500 | 1,5 | 82 | 80 | 3 | 10,5 | 20 | 0,45 |
| Acciona AW100-3000 | 3 | 100 | 96 | 4 | 11 | 25 | 0,47 |
| ADVEN 5-135 | 5 | 135 | 120 | 4,5 | 12 | 22 | 0,5 |

Эффективность работы ВГ определяется климатическими условиями района и техническими характеристиками. Важнейшими характеристиками ВГ является минимальная скорость ветра, с которой начинается генерация и номинальная

скорость, при которой ВГ развивает номинальную мощность [2]. Важным показателем с точки зрения безопасности является максимальная скорость ветра, при которой работа ВГ еще возможна. На Рис. 1 представлена диаграмма зависимости выдаваемой мощности и времени работы генераторов от скорости ветра за январь 2020 г.

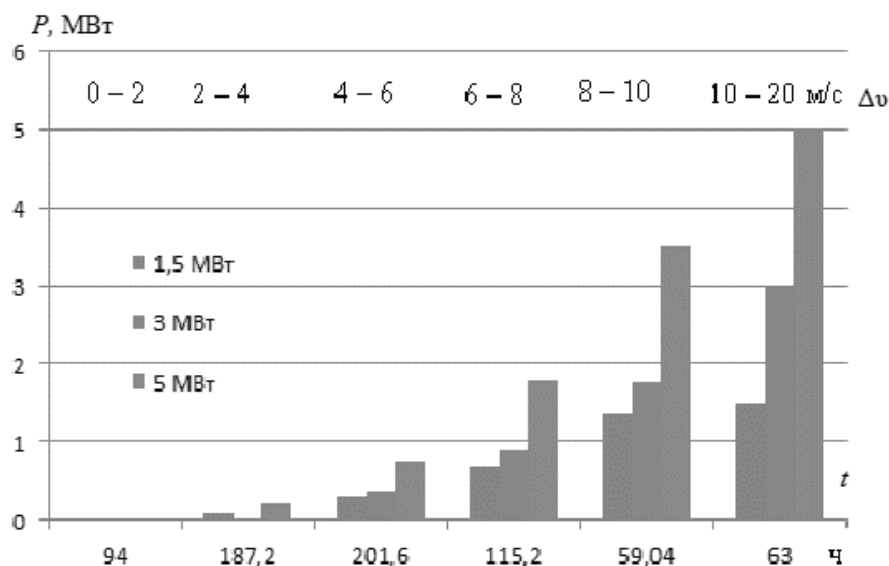


Рис. 1. Мощность и время работы ветрогенераторов за январь 2020 г.

ВГ марки Acciona AW82-1500 развивает среднемесячную мощность 467 кВт или 32 % от номинальной. ВГ Acciona AW 100-3000 выдает 740 кВт или 21 %, ВГ ADVEN 5-135 развивает среднемесячную мощность 1290 кВт, что составляет 26 % от номинальной мощности 5000 кВт. ВГ Acciona AW82-1500 наиболее эффективный в зоне малых скоростей. Время работы в режиме расчетной мощности 467 кВт составит 439 ч или 61%. ВГ развивают мощность более 780 кВт 137 ч в месяц или 33% [3]. Для ВЭС мощностью 20 МВА минимальное число ВГ составит 24 шт, при этом третью часть времени ВЭС выдает номинальную мощность. Время простоя составит 280 ч или 39%.

Расчеты показывают, что в условиях Поволжья максимальный объем электроэнергии вырабатывается в диапазоне скоростей 8 – 10 м/с. В режиме номинальной мощности время работы мало и объем генерации ниже. В зоне малых скоростей напротив, время работы самое большое, но мощность ВГ мала, и объемы генерации также ниже. Выдача мощности ведется по внутростанционным ЛЭП. Ток в ЛЭП будет определяться мощностью транзита.

Ветропотенциал в Пензенской области изменяется в течение года. Максимальная средняя скорость ветра за месяц равна 5,5 м/с, наблюдается весной и осенью, минимальная – 3,7 м/с, наблюдается летом [4]. Максимальная средняя за месяц мощность генерации составила 467 кВт, минимальная – 200 кВт. В среднем за год мощность ВГ Acciona AW82-1500 равна 370 кВт. Максимальная выработка в месяц составила 336 тыс кВт-ч электроэнергии, минимальная – 144 тыс кВт-ч. Суммарная выработка за год составляет 3254 МВт-ч. Примерно 2043 часа в год ветра нет, генерация равна нулю.

На рис. 2 представлена электрическая схема ВЭС установленной мощностью 20 МВА. Выдача мощности ВЭС выполняется на рабочем напряжении 110 кВ. Главная повышающая подстанция (ГПП) построена по схеме двухтрансформаторной подстанции с двумя трансформаторами 10/110 кВ мощностью по 10 МВА. К выводам низкого напряжения трансформатора подключены шины 10 кВ. На каждую секцию шин работают 12 ВЭУ. Для Пензенской области ВГ марки Acciona AW82-1500 мощностью 1,5 МВА дают полную загрузку ГПП только 18 % времени за год.

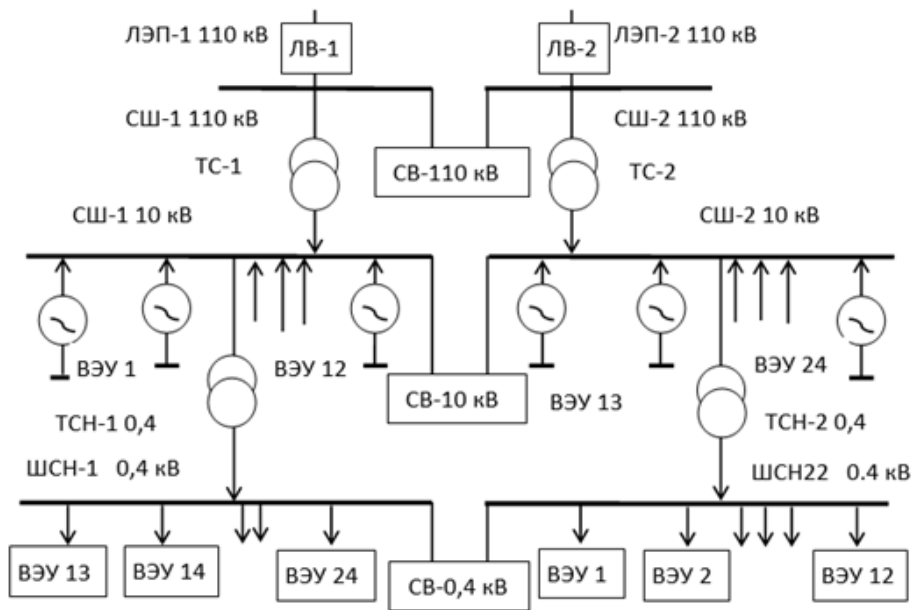


Рис. 2. Схема ВЭС однолинейная радиальная

ВГ мощностью более 1 МВА имеют встроенные инверторы и шкафы автоматики, обеспечивающие синхронную работу ВЭС с сетью. Для устойчивой работы ВГ по телеметрии выполняет синхронизацию напряжения всех фаз с районными сетями. Номинальный ток каждой фазы ВГ не превышает 100 А. Номинальное выходное напряжение ВГ равно 11 кВ, подключение к шинам 10 кВ выполняется напрямую [5].

Установленная мощность всех ВГ в три раза превышает мощность повышающих трансформаторов на ГПП. При снижении скорости ветра с 10 до 8 м/с ветропотенциал падает наполовину, но мощность генерации ВГ не уменьшается. При дальнейшем снижении скорости ветра мощность, выдаваемая ВЭС в сети, также будет уменьшаться. Такой подбор оборудования позволит снизить капитальные затраты на трансформаторы, кабели и коммутационные аппараты, и увеличить загрузку трансформаторов.

Увеличение мощности ВЭС возможно за счет роста мощности или числа ВГ. Соблюдение минимально допустимых интервалов между ВГ требует увеличивать площадь территории. Схема подключения группы 1-6 ВГ аналогична схемам подключения других групп. Расстояние от удаленных ВГ до ГПП также растет. Это приводит к увеличению общей длины ЛЭП и росту их сопротивления.

Увеличение полного сопротивления ЛЭП приводит к увеличению падения напряжения на ЛЭП-10 кВ. Падение напряжения на ЛЭП ограничивается входным напряжением повышающего трансформатора ГПП.

Для повышения надежности ВГ подключены к ГПП по радиальной схеме [6]. Расчет сети выполнен методом узловых потенциалов. Индекс «л» обозначает линию, «н» - нагрузку, «ген» - параметры генератора. Результаты расчетов в режиме номинальной мощности представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры ВГ, подключенных по радиальной схеме с кабелем сечением 35 мм²
в номинальном режиме

| № | L | $R_{л}$ | $R_{ветвь}$ | g | Eg | $U_{н}$ | I | $U_{л}$ | $U_{ген}$ | $P_{ген}$ |
|-------|------|---------|-------------|-------|------|---------|-----|---------|-----------|-----------|
| | м | Ом | Ом | См | В*См | В | А | В | В | кВт |
| 1 | 640 | 0,570 | 7,570 | 0,132 | 1585 | 10371 | 83 | 47 | 10418 | 1495 |
| 2 | 880 | 0,783 | 7,783 | 0,128 | 1542 | 10371 | 81 | 63 | 10434 | 1462 |
| 3 | 1120 | 0,997 | 7,997 | 0,125 | 1501 | 10371 | 79 | 78 | 10449 | 1428 |
| 4 | 1360 | 1,210 | 8,210 | 0,122 | 1462 | 10371 | 77 | 93 | 10464 | 1393 |
| 5 | 1600 | 1,424 | 8,424 | 0,119 | 1425 | 10371 | 75 | 106 | 10477 | 1359 |
| 6 | 1840 | 1,638 | 8,638 | 0,116 | 1389 | 10371 | 73 | 119 | 10490 | 1324 |
| итого | 7840 | | | 0,783 | 8903 | 10371 | 467 | | | 8464 |

При скорости ветра 10 м/с и более ВГ выходит в режим номинальной мощности, 6 из 12 ВГ, подключенных к шине 10 кВ, отключают. Максимальная мощность генерации при условии равномерного распределения тока по ВГ 1-6 составит 9 МВт. Мощность, отдаваемая в нагрузку, равна 8,46 МВт. Суммарная мощность 6-ти ВГ меньше максимальной на 540 кВт. Эксплуатация ВЭС с такой схемой подключения ВГ к ГПП возможна.

С учетом значительной длины ЛЭП ограничением сечения будет не длительный ток, а допустимое падение напряжения на ЛЭП и неравномерная загрузка ВГ. Для подключения ВГ принят кабель ААБв 3х35, сечением жил 35 мм². Для выбранного кабеля падение напряжения на ЛЭП первой и шестой ВЭУ в номинальном режиме изменяется от 47 до 120 В.

Режим номинальной мощности для ВГ в Поволжье не является характерным. В январе 2020 г в режиме номинальной мощности ВГ работали всего 64 часа в месяц или 9 % времени, а в течение года не более 6 %. Более распространенными режимами является режим среднесменной мощности, ВГ работает 202 час или 29 %. Его принимаем в качестве расчетной мощности.

Анализ данных показывает, что напряжение на нагрузке в режиме среднесменной мощности равно 10,8 кВ, соответствует номинальному для трансформатора. ВГ в режиме среднесменной мощности также нагружены неравномерно. Разница мощностей первого и шестого ВГ равна 64 кВт или составляет 14 %. Суммарная мощность ВЭС примерно 12 МВА. Коэффициент загрузки трансформаторов равен 0,6. В случае отключения одного трансформатора второй способен некоторое время работать с перегрузкой.

Оптимизация ЛЭП заключалась в подборе сечения кабелей, при котором снижается неравномерность загрузки ВГ и повышается суммарная мощность

ВЭС. В качестве критерия оптимизации принимаем удельный расход металла проводов на мощность транзита. Для сравнения выбраны кабели сечением 50, 70 и 95 мм². Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение параметров ВЭС с кабелями разного сечения
в номинальном режиме работы

| № | Сечение кабеля | мм ² | 35 | 50 | 70 | 95 |
|---|---------------------------|-----------------|------|------|-------|------|
| 1 | Разница напряжения | В | 70 | 50 | 30 | 18 |
| 2 | Разница тока | А | 10 | 8 | 5 | 3 |
| 3 | Разница мощности 1 и 6 ВГ | кВт | 170 | 104 | 76 | 17 |
| 4 | Масса кабеля | т | 6,12 | 9,45 | 13,24 | 18,1 |
| 5 | Удельный расход | кг/кВт | 1,16 | 1,26 | 1,42 | 1,93 |

Темпы роста металлоемкости с ростом сечения кабеля опережают темпы роста мощности, выдаваемой в нагрузку. На основе анализа тенденции можно сделать вывод, что увеличение сечения кабелей с 35 до 95 мм² позволяет увеличить длительный ток от 100 до 500 А. Это дает прирост мощности ВЭС 800 кВт или 9 %, но приводит к перерасходу металла более чем в два раза. В качестве рабочего принимаем вариант, где первые три ВГ подключаем кабелем 35 мм², а четвертый, пятый и шестой – кабелем сечением 50 мм².

На основе исследований на модели можно сделать выводы. Применение кабелей завышенного сечения повышает мощность ВЭС, но приводит к росту капиталовложений. Эффективность ВЭС при этом увеличивается незначительно ввиду малого времени генерации номинальной мощности. В режиме малых и средних нагрузок влияние разной длины ЛЭП снижается, но кабели меньшего сечения будут работать в номинальном режиме.

Библиографический список

1. **Сибикин, Ю.Д.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.; КноРус, 2022. – 228 с.
2. Каталог продукции компании Energy Wind. – URL: <https://energywind.ru/vetryanyie-elektrostantsii/promyshlennye-vetrogeneratory-dlya-biznesa> (дата обращения 18.10.2022).
3. **Агеев, В.А.** Повышение эффективности применения ветрогенераторов в поволжском регионе / Агеев В.А., Голобоков С.В., Александрин А.А. / Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов. – Тюмень, 2020. С. 162-165.
4. Климат Пензы. Под ред док-ра геогр. наук Ц.А. Швер, В.С. Никулиной, И.А. Поповой. – Л: Гидрометеиздат. 1988. – 182 с.
5. **Горячев, В.Я.** Расчет и регулирование выходных напряжений подстанций радиальной системы электроснабжения / Горячев В.Я., Голобоков С.В. и др. / Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 22–25 ноября 2019 г. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2019. С 203-211.

S.V. Golobokov¹, K.A. Dushutin², D.A. Buynov¹, A.V. Kleymenov¹

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A WIND FARM IN THE PENZA REGION

Penza State University¹

Mordovia National Research University from N.P. Ogarev²

Abstract. The paper deals with the use of wind turbines in the climatic conditions of the Penza region. The analysis of wind potential is carried out. The simulation of the operating modes of wind turbines of various capacities was carried out and the brand of the generator was selected, which ensures the generation of the maximum amount of electricity. The design of a wind power plant is considered.

Keywords: wind potential, design capacity of the wind generator, electricity, the main scheme of the wind farm.

References

- [1] Sibikin Yu.D., Sibikin M.Y. Non-traditional and renewable energy sources: Textbook. – Moscow: KnoRus. -2019, 228 с.
- [2] Catalogue of the company's products Energy Wind. – URL: <https://energywind.ru/vetryanyie-elektrostantsii/promyshlennye-vetrogeneratory-dlya-biznesa> (Retrieved 18.10.2022). - Text : electronic.
- [3] Ageev V.A. Improving the efficiency of the use of wind turbines in the Volga region Ageev V.A., Golobokov S.V., Alexandrin A.A. In the collection: "Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex" Materials of the National Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Scientists and Specialists with International Participation. Tyumen, 2020. C. 162-165.
- [4] Climate of Penza. Under the editorship of Dr. Geogr. Sci. Ts.A.Shver. L: Gidrometeoizdat.-1988 – URL : http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-125132333.pdf (Retrieved 12.11.2022). - Text : electronic.
- [5] Calculation and regulation of output voltages of substations of radial power supply system / Goryachev V.Ya., Golobokov S.V., Dospekhov A.A., Dushutin K.A. // Energy efficient and resource-saving technologies and systems: materials of the International. scientific-practical conference, November 22–25, 2019 [Electronic resource] / red.: P. V. Senin [and others]; Comp. S. E. Fedorov; Holes. for issue. V. F. Kupryashkin. - Saransk: Mordov Publishing House. University, 2019. – pp. 203-211.

Ал.А. Кралин, Е.В. Крюков, Я.И. Петухов, Ан.А. Кралин

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОВЫШАЮЩЕГО DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОГО ГИБРИДНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Статья посвящена разработке модели повышающего DC-DC преобразователя в структуре автономного гибридного энергетического комплекса. Авторами рассчитаны основные параметры и создана имитационная модель в программном комплексе *Matlab Simulink*. В результате компьютерного моделирования были получены временные зависимости электромагнитных величин повышающего преобразователя. Для подтверждения результатов моделирования в *Matlab Simulink* авторами был произведен сопоставительный расчет дифференциальных уравнений в системе компьютерной алгебры *Mathcad*.

Ключевые слова: DC-DC преобразователь, силовые полупроводниковые приборы, *Matlab Simulink*.

Авторами статьи разработана автономная двухканальная гибридная энергоустановка (АДГЭУ), в состав которой входят дизель-генератор переменной частоты вращения и водородный топливный элемент. Неотъемлемой частью разработки системы электрогенерации энергетических комплексов является имитационное моделирование, которое позволяет определить электромагнитную совместимость основных компонентов.

Одним из элементов АДГЭУ является повышающий DC-DC преобразователь. Он служит для повышения выходного напряжения водородного топливного элемента от 45 В до стабильного значения в 257 В при мощности нагрузки 1 кВт.

Модель повышающего импульсного DC-DC преобразователя должна соответствовать параметрам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Требования к повышающему DC-DC преобразователю

| Тип преобразователя | $f_{п}$, кГц | КПД | $U_{п}$, В | $\Delta U_{п}$, % | $U_{н}$, В | $\Delta U_{н}$, % | $I_{нmax}$, А | $I_{нmin}$, А |
|---------------------|---------------|------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|----------------|----------------|
| Повышающий | 10 | 0,92 | 45 | 5 | 257,4 | 10 | 4,5 | 3,88 |

Основное отличие импульсных стабилизаторов напряжения от стабилизаторов непрерывного действия заключается в том, что работа транзистора осуществляется в ключевом режиме. Большую часть периода коммутации рабочая точка транзистора находится в области отсечки или насыщения, и только в моменты переключения она проходит зону активной области с высокой скоростью.

При этом, намного более низким будет значение средней мощности, рассеиваемой на регулирующем транзисторе за период коммутации, по сравнению с непрерывным режимом его работы. Это и обуславливает более высокий КПД по сравнению с непрерывными стабилизаторами напряжениями, а также лучшие массогабаритные показатели в отдельных случаях.

На рис. 1 представлена схема $DC-DC$ преобразователя повышающего типа. Составные элементы: источник постоянной ЭДС E , катушка индуктивности L_d , транзистор $IGBT VT$, диод VD , конденсатор C , система управления CY .

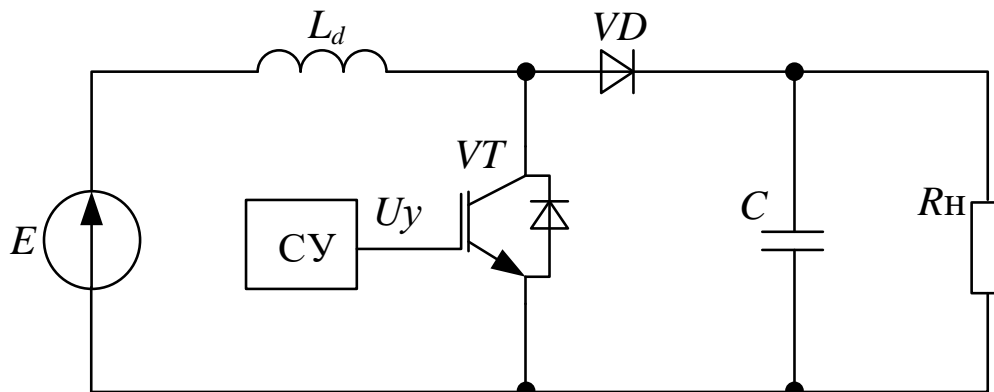


Рис. 1. Схема повышающего импульсного $DC-DC$ преобразователя

Были рассчитаны основные параметры модели. Выбрана частота преобразования $f_{II} = 10000$ Гц и принят КПД не ниже $\eta_{CT} = 0,92$. Определено минимальное, номинальное и максимальные значения относительной длительности открытого состояния транзистора [1]:

$$\gamma \frac{1}{\eta_{CT}} \frac{U_n + \Delta U_n}{U_n - \Delta U_{nmin}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{45 + 2,25} \quad (2)$$

$$\gamma \frac{1}{0,92} \frac{257,4 - 25,74_{min}}{257,4 - 25,74_{min}} \quad (3)$$

$$\gamma_{nom} = \frac{1}{\eta_{CT}} \left(1 - \frac{U_n}{U_n}\right); \quad (4)$$

$$\gamma_{nom} = \frac{1}{0,92} \left(1 - \frac{45}{257,4}\right) = 0,897; \quad (5)$$

$$\gamma \frac{1}{\eta_{CT}} \frac{U_n - \Delta U_n}{U_n + \Delta U_{nmax}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{45 - 2,25} \quad (7)$$

$$\gamma \frac{1}{0,92} \frac{257,4 + 25,74_{max}}{257,4 + 25,74_{max}} \quad (8)$$

Из условия обеспечения режима непрерывности токов определена минимальная индуктивность дросселя:

$$L_{min} \geq \frac{(U_n - \Delta U_n) \gamma_{max} (1 - \gamma_{max})}{2 I_{nmin} f_{II}}; \quad (9)$$

$$L \frac{(45 - 2,25) \cdot 0,923 \cdot (1 - 0,923)^{-5}}{2 \cdot 3,497 \cdot 10000} \Gamma_{H,min} \quad (10)$$

$$L - 5 \Gamma_{H,min} \quad (11)$$

Средний, минимальный и максимальный токи дросселя:

$$I_{L_{cp}} = \frac{I_{H_{max}}}{(1 - \gamma_{max})} \quad (10)$$

$$I_{L_{cp}} = \frac{3,885}{(1 - 0,923)} = 50,351 \text{ А}; \quad (11)$$

$$I_{L_{min}} = I_{L_{cp}} - \frac{U_{H_{min}} \gamma_{max}}{2L_{min} f_{H}}; \quad (12)$$

$$I_{L_{min}} = \frac{42,75 \cdot 0,923}{2 \cdot 2,176 \cdot 10^{-5} \cdot 20000} \text{ А}; \quad (13)$$

$$I_{L_{cp} L_{min} L_{max}} \quad (14)$$

$$I_{A \cdot L_{max}} \quad (15)$$

Емкость конденсатора:

$$L_{min} \geq \frac{(U_{H} - \Delta U_{H}) \gamma_{max} (1 - \gamma_{max})}{2I_{H_{min}} f_{H}}; \quad (16)$$

$$C = \frac{U_{H} - \Delta U_{H} \cdot \gamma_{nom} \cdot (1 - \gamma_{nom})}{(U_{H} + \Delta U_{H}) \cdot 0,01 \cdot f_{H}^2 \cdot L_{min}} \quad (17)$$

$$C = \frac{45 - 2,25 \cdot 0,897 \cdot (1 - 0,897)}{(45 + 2,25) \cdot 0,01 \cdot 10000^2 \cdot 4,35 \cdot 10^{-5}} = 0,0022 \text{ Ф}. \quad (18)$$

Сопротивление нагрузки:

$$R_{H} = \frac{U_{H}}{I_{H}}; \quad (19)$$

$$R_{H} = \frac{257,4}{3,885} = 66,2 \text{ Ом}. \quad (20)$$

Модель повышающего импульсного *DC-DC* преобразователя с рассчитанными ранее параметрами разработана в среде *Matlab Simulink* и приведена на рис. 2.

В качестве примера на рис. 3-4 приведены временные диаграммы, полученные в результате компьютерного моделирования.

На рис. 3 показаны управляющее импульсное напряжение, ток коллектора, напряжение коллектор-эмиттер, ток катушки.

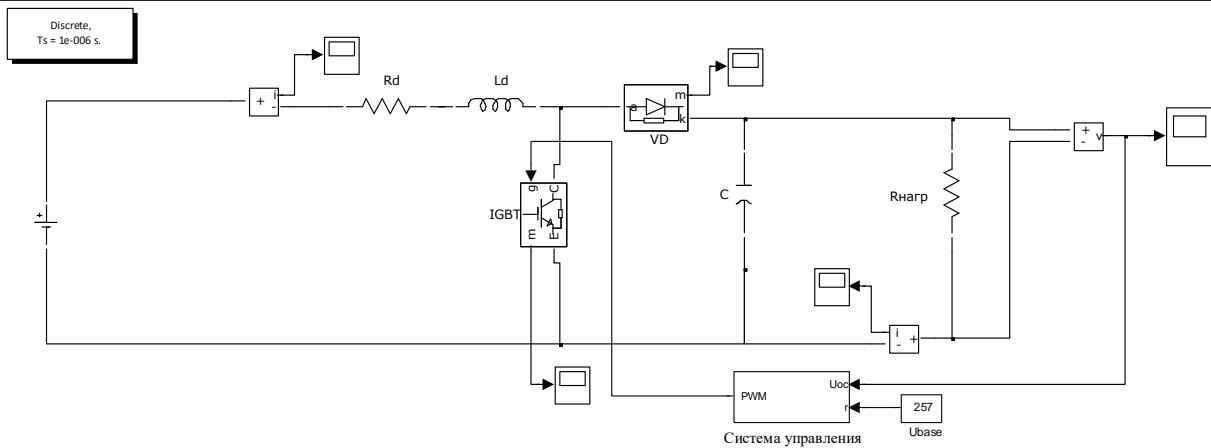


Рис. 2. Модель повышающего импульсного *DC-DC* преобразователя

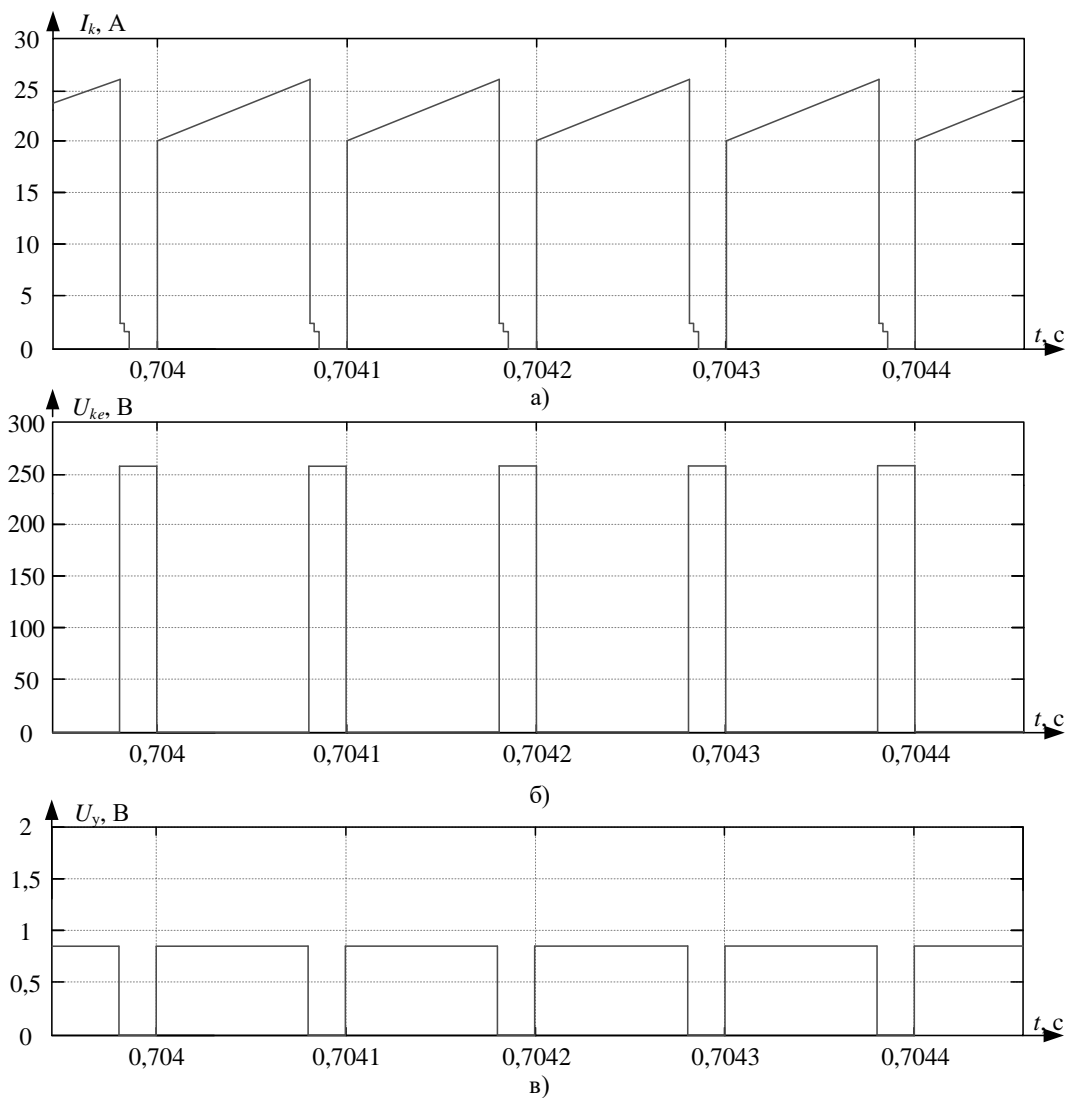


Рис. 3. Ток коллектора (а), напряжение коллектор-эмиттер (б), управляющий сигнал (в)

На рис. 4 изображены осциллограммы тока и напряжения на диоде.

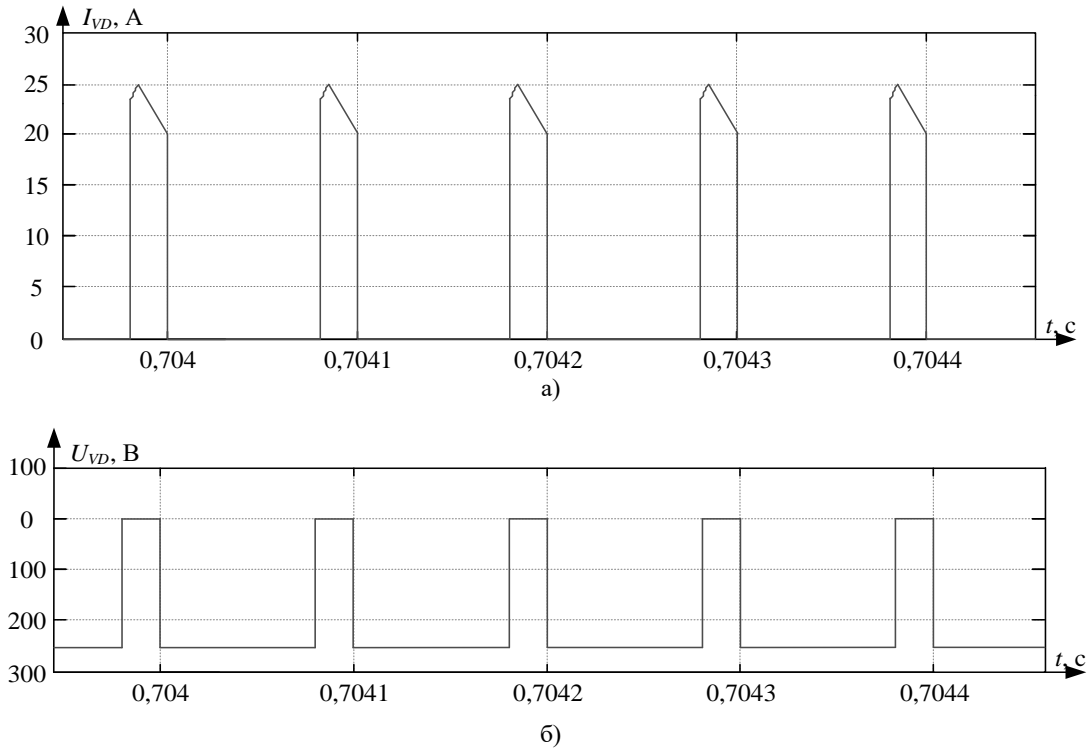


Рис. 4. Ток (а) и напряжение (б) диода

Модель системы управления (СУ) с ПИ-регулятором приведена на рис. 5. На вход системы управления подаются два сигнала. Один из сигналов задает величину напряжения стабилизации, а второй – пропорционален выходному напряжению. С выхода СУ импульсы управления с частотой 10 кГц и определенной скважности подаются на затвор *IGBT*. В результате моделирования установлено, что СУ позволяет стабилизировать выходное напряжение на заданном уровне с точностью $\pm 1\%$.

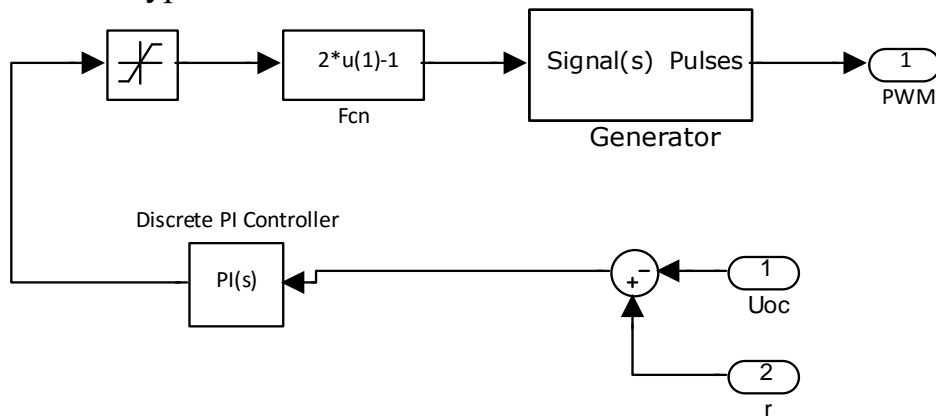


Рис. 5. Модель системы управления импульсного *DC-DC* преобразователя с ПИ-регулятором

Для верификации компьютерного моделирования в пакете *Matlab Simulink* был произведен расчет численным методом системы дифференциальных уравнений, описывающих работу повышающего *DC-DC* преобразователя.

Исходные данные: частота переключений $f = 10000$, прямое напряжение на диоде $E_{vd} = 0,8$ В, прямое напряжение на транзисторе $E_{vt} = 0,8$ В, входное напряжение $U_{вх} = 45$ В, сопротивление нагрузки $R_{н} = 66,2$ Ом, емкость фильтра $C = 0,00122$ Ф, величина индуктивности $L = 5,353 \cdot 10^{-5}$ Гн, сопротивление транзистора $R_{т} = 0,1$ Ом, активное сопротивление индуктивности $R_{к} = 0,3$ Ом, коэффициент заполнения $k_z = 0,9$, сопротивление диода в прямом направлении $R_d = 0,1$ Ом.

Расчетная схема, необходимая для численного интегрирования на этапе насыщенного состояния транзистора, представлена на рис. 6. Система уравнений, матрица формул $D1(t, x)$, а также матрица решения показаны на рис. 7.

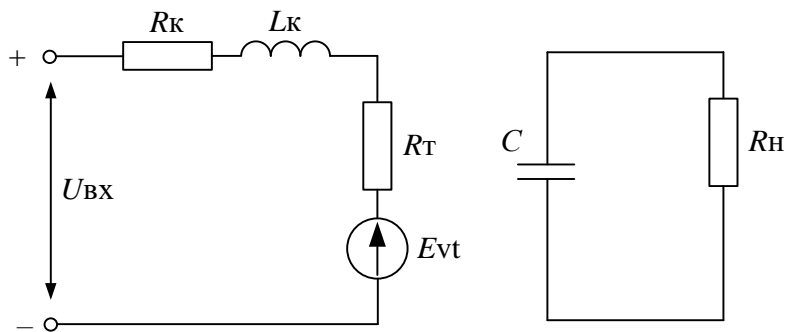


Рис. 6. Расчетная схема насыщенного состояния транзистора

```

Given
iL·(Rт + Rк) + L·diL/dt = Uвх - Evt
Rн·C·duC/dt = -uC
Find(diL/dt, duC/dt) → ( 826168.22429906542056 - 5626.1682242990654206·iL
                        -12.381754246941706701·uC )
D1(t,x) := ( 826168.22429906542056 - 5626.1682242990654206·x₀
            -12.381754246941706701·x₁ )
N := 100
Z1 := Bulstoer(x,0,kz·T,N,D1)

```

Рис. 7. Система уравнений $DC-DC$ преобразователя в режиме насыщенного состояния транзистора

Расчетная схема, необходимая для численного интегрирования на этапе состояния транзистора в режиме отсечки, представлена на рис. 8. Матрица формул $D2(t, x)$ и матрица решения представлены на рис. 9.

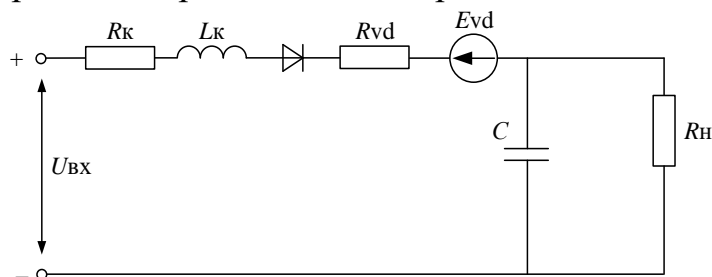


Рис. 8. Расчетная схема транзистора в режиме отсечки

Given

$$iL - C \cdot duC - iH = 0$$

$$iL \cdot (Rk + Rd) + L \cdot diL + uC = U_{Bk} - E_{vd}$$

$$iH \cdot R_H + uC = 0$$

$$\text{Find}(iH, diL, duC) \rightarrow \begin{pmatrix} -0.015105740181268882175 \cdot uC \\ 826168.22429906542056 - 18691.588785046728972 \cdot uC - 5626.1682242990654206 \cdot iL \\ 819.67213114754098361 \cdot iL + 12.381754246941706701 \cdot uC \end{pmatrix}$$

$$D2(t, x) := \begin{pmatrix} 826168.22429906542056 - 18691.588785046728972 \cdot x_1 - 5626.1682242990654206 \cdot x_0 \\ 819.67213114754098361 \cdot x_0 - -12.381754246941706701 \cdot x_1 \end{pmatrix}$$

$$Z2 := \text{Bulstoer}(x, kz \cdot T, T, N, D2)$$

Рис. 9. Система уравнений DC-DC преобразователя в режиме отсечки транзистора

На рис. 10 представлена цикличная программа для расчета 2000 циклов.

```

Z := | Z ← (0 iL uC)
      x ← (0)
          (0)
      for i ∈ 1..2000
          | Z1 ← Bulstoer[x, T·(i - 1), T·(i - 1) + kz·T, N, D1]
            x ← (Z1N,1)
                  (Z1N,2)
            Z2 ← Bulstoer[x, T·(i - 1) + kz·T, T·i, N, D2]
            x ← (Z2N,1)
                  (Z2N,2)
            Z1 ← stack(Z1, Z2)
            Z ← stack(Z, Z2)
      Z
    
```

Рис. 10. Цикличная программа в *Mathcad*

На рис. 11 представлена зависимость напряжения на выходе преобразователя от времени, полученная при расчете в *Mathcad*. Величина выходного напряжения в установившемся режиме при нагрузке 1 кВт составляет 255 В. Результаты расчета в системе *Mathcad* и результаты имитационного моделирования совпадают с точностью ±2%. Это говорит о правильном расчете элементов силовой части и корректной настройке параметров системы управления.

На рис. 12 приведена осциллограмма тока катушки для режима непрерывного тока. Режим непрерывных токов катушки наблюдается при относительно небольшом сопротивлении нагрузки.

Разработанная модель и результаты компьютерного моделирования позволят в дальнейшем выбрать полупроводниковые приборы и построить систему управления с требуемыми характеристиками.

Произведен расчет параметров преобразователя, катушки индуктивности, минимальное, номинальное и максимальное значения относительной длительности открытого состояния транзистора.

Для верификации результатов имитационного моделирования программного комплекса *Matlab Simulink* был произведен расчет в пакете *Mathcad*.

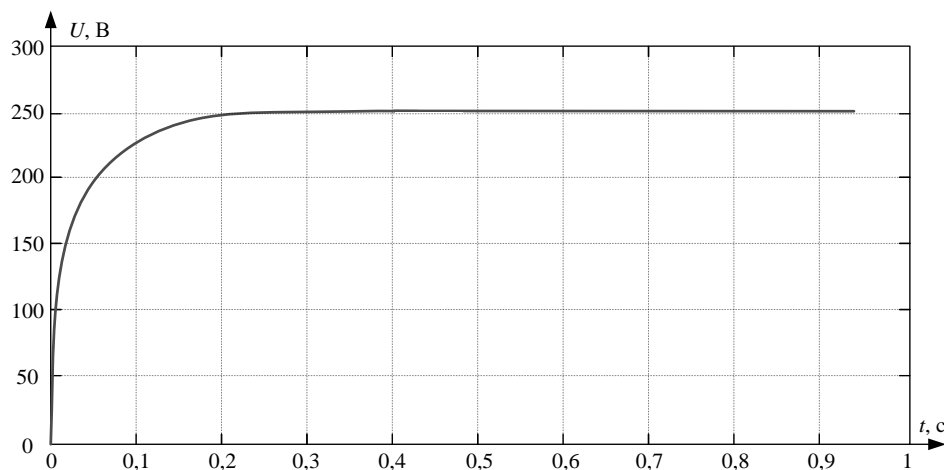
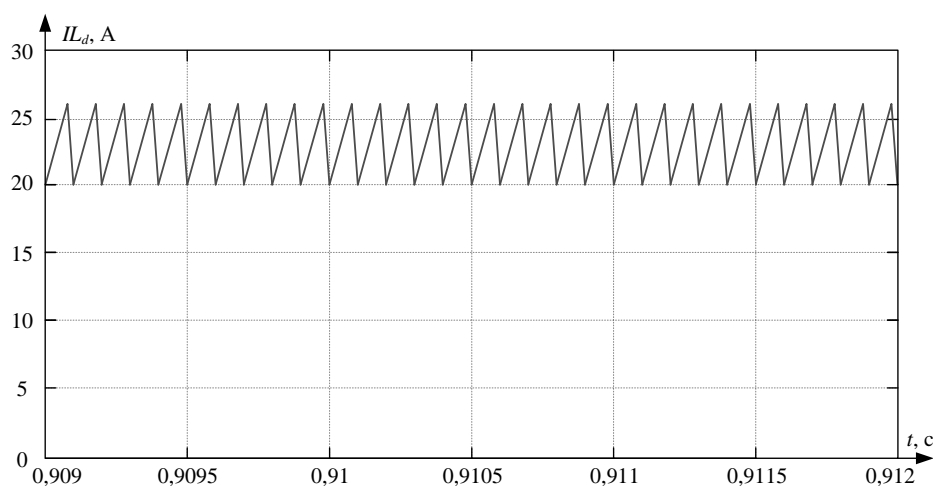


Рис. 11. Напряжение на выходе преобразователя

Рис. 12. Ток на катушке L_d

По полученным значениям произведена настройка элементов имитационной модели. Разработана система управления с ПИ-регулятором, которая позволяет при изменении входного напряжения и нагрузки сохранять выходные характеристики в необходимых границах.

Программа, созданная в *Mathcad*, может быть использована при расчете повышающих *DC-DC* преобразователей при широком изменении параметров нагрузки и величины входного напряжения.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Библиографический список

1. Браун, М. Источники питания. Расчет и конструирование.: Пер. с англ. – К.: МК-Пресс, 2007. – 38 с.
2. Иванушкин, Ф.Н. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов: Монография / Ф.Н. Иванушкин, В.А. Сарапулов, П. Шимчак. – Щецин: ЩТУ, 2000. – 310 с.
3. Семенов, В. Ю. Силовая электроника – М.: СОЛОН-Р, 2001.

4. **Гельман, М.В.** Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
5. **Чивенков, А.И.** Универсальный преобразователь как основа для согласования параметров источников распределенной сети с ВИЭ / А.И. Чивенков, И.Г. Крахмалин // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 112-125.

Al.A. Kralin, E.V. Kryukov, Y.I. Petukhov, An.A. Kralin

SIMULATION MODEL OF A STEP-UP DC-DC CONVERTER MATLAB SIMULINK

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the development of a model of a step-up DC-DC converter in the structure of an autonomous hybrid energy complex. The authors calculated the main parameters and created a simulation model in the Matlab Simulink software package. As a result of computer modeling, time dependences of various variables of the step-up converter were obtained.

Key words: DC-DC converter, power semiconductor devices, Matlab Simulink.

References

- [1] M. Braun, “Istochniki pitaniya. Raschet i konstruirovaniye” [Power sources. Calculation and design] – K.: MK-Press. 2007. – 38 s.
- [2] F.N. Ivanushkin, “Strukturnoye modelirovaniye elektromekhanicheskikh sistem i ikh elementov: Monografiya” [Structural modeling of electromechanical systems and their elements: Monograph] / F.N. Ivanushkin, V.A. Sarapulov, P. Shimchak. – Shchetsin: SHCHTU, 2000. – 310 p.
- [3] V. Yu. Semenov, “Silovaya elektronika” [Power Electronics] – M.: SOLON-R. 2001.
- [4] M.V. Gel'man, “Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoye posobiye [Converter technics: textbook]”. Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, pp. 425, 2009 (in Russian).
- [5] A.I. Chivenkov, “Universalnyy preobrazovatel kak osnova dlya soglasovaniya parametrov istochnikov raspredelennoy seti s VIE” [Universal converter as a basis for matching the parameters of distributed network sources with RES] / A.I. Chivenkov. I.G. Krakhmalin. // Intellektualnaya elektrotekhnika. – 2018. – № 1. – S. 112-125

И.Н. Погодаева¹, В.А. Шакиров²

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ГИБРИДНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ДЛЯ УДАЛЕННЫХ РАЙОНОВ

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»¹
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН²

Аннотация. Предложен подход к многокритериальному выбору состава оборудования гибридных энергокомплексов на основе метода TOPSIS. Формирование конфигураций гибридных энергокомплексов выполняется с использованием программного обеспечения HOMER PRO. Конфигурации сравниваются по критериям экономической эффективности, выбросам диоксида углерода, эксплуатационной эффективности. Подход апробирован на примере села Единка Приморского края. В качестве источников электроэнергии рассматриваются дизельные генераторы, ветроэнергетические установки, фотоэлектрические преобразователи, микрогидравлические электростанции.

Ключевые слова: гибридные энергокомплексы, моделирование, возобновляемые источники энергии, многокритериальный выбор, метод TOPSIS

Электроснабжение потребителей изолированных и труднодоступных районов России осуществляется преимущественно дизельными электростанциями. Высокая стоимость доставки топлива оказывает существенное влияние на себестоимость производства электроэнергии. В целях компенсации разницы между экономически обоснованным и устанавливаемым тарифом производителям электроэнергии в удаленных районах предоставляются субсидии на компенсацию выпадающих доходов. Общий размер субсидий на компенсацию выпадающих доходов по всем изолированным и труднодоступным территориям Российской Федерации в 2018 году составил 20 млрд руб [1].

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года повышение эффективности энергоснабжения удаленных и изолированных территорий может быть достигнуто на основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Комплекс мер, обеспечивающих повышение эффективности энергоснабжения удаленных и изолированных территорий на основе использования ВИЭ, включает поддержку по оказанию услуг в сфере проектирования, строительства, эксплуатации и сервисного обслуживания генерирующих объектов на базе ВИЭ [2]. Показателем эффективности энергоснабжения на основе использования ВИЭ является снижение экономически обоснованных затрат на производство 1 кВт·ч электрической энергии на территориях децентрализованного электроснабжения, процент к уровню базового года: к 2024 году – 6 %; к 2035 году – 17 % [2].

В этой связи актуальной является разработка подходов к выбору состава оборудования гибридных энергокомплексов в удаленных районах.

Одной из важных задач такого выбора является определение набора компонентов гибридного энергокомплекса, позволяющего обеспечить покрытие нагрузки населенного пункта с минимальными капитальными вложениями, нормированной стоимостью электроэнергии (LCOE) и эмиссией CO₂. Последний из перечисленных показателей важен с позиций принятой Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов.

К настоящему времени выполнены многочисленные исследования по разработке методического и программного обеспечения для выбора состава оборудования гибридных энергокомплексов [3,4]. Также много работ посвящено разработке гибридных энергокомплексов с использованием программного обеспечения HOMER Pro, Hybrid2, iHOGA и других [5,6]. Большинство таких исследований проводится с использованием только критерия экономической эффективности, например, LCOE.

В данной работе рассматривается использование многокритериального метода TOPSIS для выбора конфигурации гибридного энергокомплекса. Для моделирования конфигураций и разработки альтернативных вариантов использовалось программное обеспечение HOMER Pro. Данный программный продукт позволяет смоделировать комплексную работу гибридного энергокомплекса с учетом ресурсной обеспеченности исследуемого района, технико-экономических показателей оборудования и графика электрических нагрузок. Процедура оптимизации HOMER Pro основана на экономическом критерии чистых приведенных затрат за расчетный период, который составляет 25 лет (так как этот период позволяет отследить жизненный цикл оборудования и учесть несколько замен аккумуляторных батарей).

Авторы работы при моделировании использовали данные часовой детализации по потреблению электроэнергии населением с. Единка, а также данные о солнечной радиации, скорости ветра и температуре. Данные о скорости ветра и температуры были получены с сайта «Расписание погоды» [7], оценки солнечной радиации были получены из базы реанализа ERA-5 [8]. Кроме того, учитывались возможности использования гидроэнергетических ресурсов – рядом с селом протекает река Единка.

В качестве источников энергии рассматривались: дизельный генератор (ДГ), фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), ветроэнергетические установки (ВЭУ), микрогидроэлектростанции (мГЭС). В состав гибридного энергокомплекса входят аккумуляторные батареи (АКБ) и инвертор.

Каталог оборудования программы HOMER Pro позволяет подобрать такие модели генерирующих установок гибридного энергокомплекса, которые удовлетворяют требованиям исследуемого района. Авторами работы была задана стоимость оборудования с учетом актуальных цен.

Отличия в компонентах состава оборудования позволили выбрать оптимальные конфигурации гибридных энергосистем, которые были смоделированы программой HOMER Pro. Ведущими критериями отбора были минимальные капитальные вложения, минимальное значение LCOE. Кроме того, для многокритериального выбора конфигурации были приняты во внимание такие параметры

как: эмиссия CO₂, количество запусков генератора, количество замен аккумулятора. Последние два показателя отражают техническую эффективность конфигурации, удобство эксплуатации.

Для рассмотрения наиболее полного состава альтернатив при моделировании гибридных энергокомплексов авторами также были приняты конфигурации, включающие только дизельный генератор, а также только возобновляемые источники энергии. Всего для многокритериального сравнения было отобрано 17 конфигураций. В качестве метода сравнения был выбран TOPSIS (метод упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением).

Метод TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) был впервые предложена С.Л. Hwang и К. Yoon в 1981 г. [9]. Данный метод позволяет осуществить комплексную оценку рассматриваемых альтернатив, основанную на расчете дистанции от альтернатив до вариантов с лучшими и худшими достижимыми оценками [10].

Лучшая альтернатива, согласно концепции TOPSIS, должна иметь самое короткое геометрическое расстояние от положительного идеального решения (PIS) и самое длинное геометрическое расстояние от отрицательного идеального решения (NIS) [11,12]. Метод предполагает назначение весов критериев.

Для расчета весовых коэффициентов может использоваться метод парных сравнений критериев или прямое оценивание экспертами.

Основные этапы метода TOPSIS состоят в следующем. Формируются матрицы x_{ij} с оценками альтернатив по критериям. Далее применяется стандартная процедура нормализации данных одним из методов масштабирования для приведения значений критериев к единым единицам измерения (безразмерным величинам). На следующем этапе для каждого значения критерия проводится процедура стандартизации относительно суммы значений по количеству объектов исследования (конфигурации состава гибридных энергосистем) [13, 14]:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где r_{ij} - нормализованное значение показателя (индикатора устойчивости) для конкретного объекта исследования (конфигурации); m – количество альтернатив, n – количество критериев.

Полученные нормализованные оценки альтернатив по критериям умножаются на веса соответствующих критериев. Далее формируется 2 искусственных альтернативы – лучшая и худшая. Лучшая альтернатива включает все лучшие оценки по всем критериям, а худшая – наоборот.

Далее рассчитывается расстояние d_{iw} между значением оценки показателя (с учетом его нормализации и взвешивания) и наихудшим (идеальным отрицательным) значением и расстояние d_{ib} – между значением оценки и наилучшим (идеальным положительным) значением:

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}, i = 1, 2, \dots, m,$$

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Для сопоставления расстояния между оценочным значением показателей и двумя идеальными решениями (положительным и отрицательным) рассчитывается относительный уровень показателя s_j :

$$s_{iw} = \frac{d_{iw}}{(d_{iw} + d_{ib})}. \quad (3)$$

Весовые коэффициенты, принятые в исследовании, представлены в табл. 1. При определении весов критериев учитывались диапазоны изменения оценок по критериям.

Таблица 1

Весовые коэффициенты, используемые в исследовании

| Критерий | Капитальные вложения | LCOE | Выбросы CO ₂ | Количество запусков генератора | Количество замен аккумулятора |
|----------|----------------------|------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Вес | 0,25 | 0,3 | 0,05 | 0,2 | 0,2 |

В табл. 2 представлены результаты многокритериального сравнения.

Таблица 2

Результаты расчетов метода TOPSIS по выбору конфигурации

| Конфигурация | d_{ib} | d_{iw} | s_{iw} |
|--------------|----------|----------|----------|
| 1 | 0,0583 | 0,2980 | 0,8364 |
| 2 | 0,0572 | 0,2987 | 0,8394 |
| 3 | 0,0967 | 0,2847 | 0,7464 |
| 4 | 0,1215 | 0,2790 | 0,6967 |
| 5 | 0,0968 | 0,3069 | 0,7603 |
| 6 | 0,1186 | 0,2914 | 0,7107 |
| 7 | 0,1630 | 0,2885 | 0,6389 |
| 8 | 0,0493 | 0,3023 | 0,8598 |
| 9 | 0,0613 | 0,2875 | 0,8244 |
| 10 | 0,0484 | 0,3020 | 0,8620 |
| 11 | 0,0572 | 0,2987 | 0,8394 |
| 12 | 0,0664 | 0,2849 | 0,8111 |
| 13 | 0,2053 | 0,2155 | 0,5120 |
| 14 | 0,0866 | 0,3003 | 0,7762 |
| 15 | 0,0965 | 0,2974 | 0,7550 |
| 16 | 0,0343 | 0,3141 | 0,9016 |

Окончание табл. 2

| | | | |
|----|--------|--------|--------|
| 17 | 0,0346 | 0,3141 | 0,9009 |
| 18 | 0,0936 | 0,2746 | 0,7458 |

Полученные результаты указывают, что конфигурация 16 является лучшей и наиболее соответствует назначенным весам критериев. Состав конфигурации представлен в табл. 3.

Таблица 3

Состав конфигурации 16

| ФЭП, кВт | АКБ, кВт·ч | ВЭУ, кВт | Инвертор, кВт | ДГ, кВт | МГЭС, кВт | Капитальные затраты, долл. | LCOE, долл./кВт·ч | Выбросы CO ₂ , кг/год | Кол-во запусков генератора в год | Кол-во замен АКБ в год |
|----------|------------|----------|---------------|---------|-----------|----------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| 85,8 | 324 | - | 62,6 | 25 | 11 | 241 498 | 0,182 | 26 209 | 133 | 2 |

Таким образом, в ходе выполненного исследования, был осуществлен многокритериальный выбор конфигурации гибридного энергокомплекса для удаленного района.

Выбранный для исследования метод многокритериального анализа TOPSIS позволяет выбрать такое решение, при котором наиболее предпочтительная альтернатива должна иметь не только наибольшую близость к идеальному решению, но и быть дальше всех остальных альтернатив от неприемлемого решения. Преимуществами метода является математическая обоснованность и простота расчетов, отсутствие необходимости составления нечетких правил, отсутствие ограничений на количество критериев и альтернатив.

Из 17 альтернатив, смоделированных программным комплексом HOMER Pro, методом TOPSIS была отобрана конфигурация 16, которая в свой состав оборудования включала как оборудование на базе ВИЭ, так и традиционные источники энергии.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13. ЦКП.21.0038).

Библиографический список

1. Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России / Аналитический доклад. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. Март 2020. [Электронный ресурс] – URL: <https://ac.gov.ru> (Дата обращения 14.05.2023)
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года
3. Gbadosi, Saheed & Nwulu, Nnamdi. (2022). Optimal Configuration of Hybrid Energy System for Rural Electrification of Community Healthcare Facilities. Applied Sciences. 12. 4262. - DOI: <https://doi.org/10.3390/app12094262>.
4. Agajie, Takele & Ali, Ahmed & Fopah Lele, Armand & Amoussou, Isaac & Khan, Baseem & Carmen, Velasco & Emmanuel, Tanyi. (2023). A Comprehensive Review on Techno-Economic

- Analysis and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage. *Energies*. 16. 642. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020642>.
5. Gbadamosi, Saheed & Nwulu, Nnamdi. (2020). Optimal Power Dispatch and Reliability Analysis of Hybrid CHP-PV-Wind Systems in Farming Applications. *Sustainability*. 12. 8199. - DOI: <https://doi.org/10.3390/su12198199>.
 6. Kumar, S., Sethuraman, C., Gopi, C. (2021). Design of optimum sizing for hybrid renewable energy system using HOMER Pro to Meet the identical load demand at selected Indian cities. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 14(1): 1589-1607. – [Электронный ресурс] – URL: https://www.researchgate.net/publication/355056670_Design_of_Optimum_Sizing_for_Hybrid_Renewable_Energy_System_using_HOMER_Pro_to_Meet_the_Identical_Load_Demand_at_Selected_Indian_Cities (Дата обращения 11.05.2023)
 7. Расписание погоды – [Электронный ресурс] – URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 11.05.2023)
 8. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)-[Электронный ресурс] – URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (дата обращения 11.05.2023)
 9. **Петровский, А.Б.** Теория принятия решений. – М.: Академия, 2009. Академия 400 с
 10. Agajie, Takele & Ali, Ahmed & Fopah Lele, Armand & Amoussou, Isaac & Khan, Baseem & Carmen, Velasco & Emmanuel, Tanyi. (2023). A Comprehensive Review on Techno-Economic Analysis and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage. *Energies*. 16. 642. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020642>.
 11. **Лобкова, Е.В.** Применение метода TOPSIS при решении задачи оценки устойчивости развития территорий / Е.В. Лобкова // *Экономические науки*. – 2019. – № 172. – С. 47-51. – DOI: <https://doi.org/10.14451/1.172.47>
 12. **Мамедова, М.Г., Джабраилова З.Г.** Многокритериальная оптимизация задач управления человеческими ресурсами на базе модифицированного метода TOPSIS // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 2/4 (74). – С. 48–61.
 13. **Shakirov, V., Kozlov, A.** (2023), Multicriteria assessment of biomass gasification-based hybrid energy systems in remote areas. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 17: 380-388. – DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.2377>
 14. **Salabun, W.** Normalization of attribute values in TOPSIS method // *Nowe TrendyW Naukach In_zynieryjnych, CREATIVETIME*, and 2019 n.d. – [Электронный ресурс] – URL: https://www.researchgate.net/publication/257270622_Normalization_of_attribute_values_in_TOPSIS_method (Дата обращения 10.02.2023)
 15. **Шакиров, В.А., Яковкина Т.Н., Курбацкий В.Г.** Методика оценки выработки электроэнергии солнечными электростанциями с использованием данных многолетних наблюдений метеостанций // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24. – № 4 (153). – С. 858-875.

I.N. Pogodaeva¹, V.A. Shakirov²

MULTI-CRITERIA SELECTION OF HYBRID POWER COMPLEX EQUIPMENT COMPOSITION FOR REMOTE AREAS

Bratsk State University¹
Melentiev Energy Systems Institute²

Abstract. An approach to the multi-criteria choice of the composition of the equipment of hybrid energy complexes based on the TOPSIS method is proposed. Formation of configurations of hybrid energy complexes is carried out using the HOMER PRO software. Configurations are compared in terms of economic efficiency, carbon dioxide emissions, operational efficiency. The approach was tested on the example of the village of Edinka in Primorsky Krai. Diesel generators, wind power plants, photovoltaic converters, microhydraulic power plants are considered as sources of electricity.

Key words: hybrid energy complexes, modeling, renewable energy sources, multi-criteria choice, TOPSIS method.

References

- [1] Generation facilities in isolated and hard-to-reach areas in Russia / Analytical report. Analytical Center under the Government of the Russian Federation. March 2020.- [Online] – Available at: <https://ac.gov.ru> (Accessed: May 14, 2023)
- [2] Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035 (in Russian)
- [3] Gbadamosi, Saheed & Nwulu, Nnamdi. (2022). Optimal Configuration of Hybrid Energy System for Rural Electrification of Community Healthcare Facilities. *Applied Sciences*. 12. 4262. - DOI: <https://doi.org/10.3390/app12094262>.
- [4] Agajie, Takele & Ali, Ahmed & Fopah Lele, Armand & Amoussou, Isaac & Khan, Baseem & Carmen, Velasco & Emmanuel, Tanyi. (2023). A Comprehensive Review on Techno-Economic Analysis and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage. *Energies*. 16. 642. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020642>.
- [5] Gbadamosi, Saheed & Nwulu, Nnamdi. (2020). Optimal Power Dispatch and Reliability Analysis of Hybrid CHP-PV-Wind Systems in Farming Applications. *Sustainability*. 12. 8199. - DOI: <https://doi.org/10.3390/su12198199>.
- [6] Kumar, S., Sethuraman, C., Gopi, C. (2021). Design of optimum sizing for hybrid renewable energy system using HOMER Pro to Meet the identical load demand at selected Indian cities. *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 14(1): 1589-1607. – [Online] – Available at: https://www.researchgate.net/publication/355056670_Design_of_Optimum_Sizing_for_Hybrid_Renewable_Energy_System_using_HOMER_Pro_to_Meet_the_Identical_Load_Demand_at_Selected_Indian_Cities (Accessed: May 11, 2023)
- [7] Weather schedule – [Online] – Available at: <https://rp5.ru> (дата обращения (Accessed: May 11, 2023)
- [8] ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) - [Online] – Available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (Accessed: May 14, 2023)
- [9] Petrovsky A.B. Theory of decision making; Academy - Moscow, 2009. - 400 p. (in Russian)
- [10] Agajie, Takele & Ali, Ahmed & Fopah Lele, Armand & Amoussou, Isaac & Khan, Baseem & Carmen, Velasco & Emmanuel, Tanyi. (2023). A Comprehensive Review on Techno-Economic

Analysis and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage. *Energies*. 16. 642. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020642>.

- [11] Lobkova, E.V. Application of the TOPSIS method in solving the problem of assessing the sustainability of the development of territories / E.V. Lobkova //.– 2019. – № 172. – С. 47-51. – DOI: <https://doi.org/10.14451/1.172.47> (in Russian)
- [12] Mamedova M.G., Dzhabrailova Z.G. Multicriteria optimization of human resource management tasks based on the modified TOPSIS method // *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2015. 2/4 (74). С. 48–61. (in Russian)
- [13] Shakirov, V. and Kozlov, A. (2023), Multicriteria assessment of biomass gasification-based hybrid energy systems in remote areas. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 17: 380-388. – DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.2377>
- [14] W. Sałabun, Normalization of attribute values in TOPSIS method, in: *Nowe Trendy W Naukach In_zynieryjnych, CREATIVETIME*, and 2019 n.d. – [Online] – Available at: https://www.researchgate.net/publication/257270622_Normalization_of_attribute_values_in_TOPSIS_method (Accessed: May 13, 2023)
- [15] Shakirov V.A., Yakovkina T.N., Kurbatsky V.G. Methodology for assessing the generation of electricity by solar power plants using data from long-term observations of weather stations // *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2020. T. 24. № 4 (153). С. 858-875.

М.М. Попов, Б.В. Лукутин

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Аннотация. В статье рассмотрена возможность сокращения капитальных затрат на инверторную микроГЭС с помощью выбора оптимального уровня генерации для потребителей с различными графиками электропотребления и интеллектуальных подходов к алгоритму функционирования инверторных микроГЭС с накопителями электроэнергии. Разработанные авторами рекомендации по стабилизации уровня генерации, достаточного для баланса обменной мощности аккумуляторов электрической энергии, позволяют увеличить коэффициент использования установленной мощности гидроагрегата, сокращают энергетические характеристики напорного трубопровода, позволяют экономить расход воды из природного водотока.

Ключевые слова: деривационная микроГЭС, эффективность, накопители электроэнергии, инвертор, график нагрузки, оптимизация.

Современные микрогидроэлектростанции (микроГЭС) для регулирования параметров электроэнергии используют системы стабилизации балластного и инверторного типов. Подробное описание представлено в литературе [1], где рассмотрены вопросы качества электроэнергии. Для большинства микроГЭС применяется деривационная схема, которая не требует строительства плотины, что сокращает сроки и затраты на сооружение электростанции и уменьшает негативное воздействие на окружающую среду. Стабилизация генерируемого напряжения осуществляется автобалластной системой, которая обеспечивает стабильность электромеханического баланса гидрогенератора при постоянной энергии рабочего потока воды в напорном трубопроводе [2]. Графики нагрузки в сельских населенных пунктах характеризуются большой неравномерностью и колебаниями в течение суток и сезонов года. В зимнее время наблюдается увеличение нагрузки, связанное с увеличением коммунально-бытового и производственного потребления. В летний период, наоборот, нагрузка снижается. [3] Эти колебания нагрузки в значительной мере зависят от размеров населенного пункта и его экономического развития. Целью данной работы является оптимизация уровня генерации гидрогенератора для характерных суточных графиков нагрузки потребителей различного сельскохозяйственного профиля, [4] достаточного для обеспечения энергетического баланса аккумуляторного накопителя электроэнергии инверторной микроГЭС, позволяющего компенсировать пиковые нагрузки с помощью энергии, запасенной в аккумуляторах, в периоды времени с нагрузкой меньшей стабилизируемого уровня генерации. Существующие типовые графики

автономной нагрузки в зависимости от уровня электропотребления, можно разделить на три группы: бытовая нагрузка малочисленных поселков с отсутствием потребления электроэнергии в рабочие часы представлена на рис. 1, а, группа имеющая незначительное (1-3 часа) отсутствие потребления электроэнергии на всем протяжении характерных суток, представлена на рис. 1, б и группа с непрерывным потреблением электроэнергии на всем протяжении характерных суток, с незначительным снижением нагрузки, представлена на рис. 1 в.

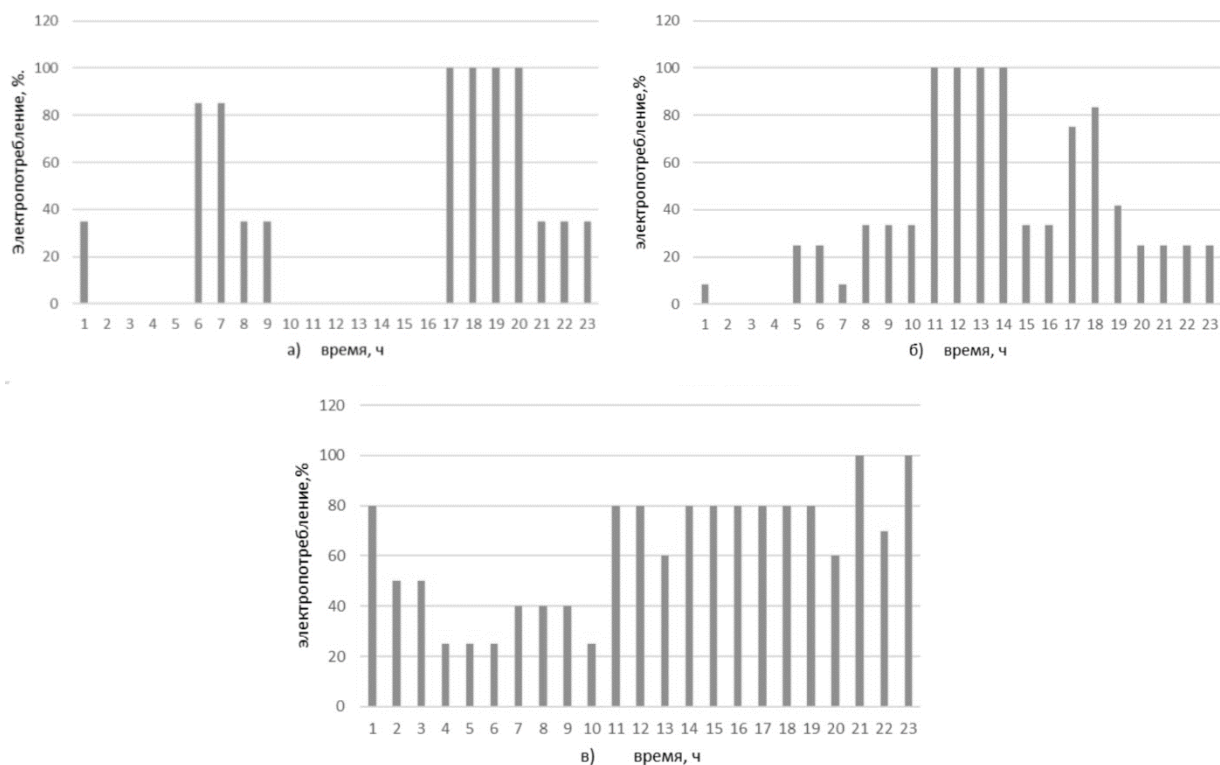


Рис. 1. Группы нагрузок

Инверторная микроГЭС с накопителями электроэнергии позволяет значительно снизить мощность, вырабатываемую гидрогенератором для производства электроэнергии в периоды пикового потребления, что в свою очередь может привести к уменьшению затрат на строительство станции. Так же, инверторная микроГЭС обеспечивает производство более качественной электроэнергии, что особенно важно для автономных энергетических систем, работающих в условиях нестабильных погодных условий и неравномерного графика потребления [5].

Формирование интеллектуальной технологии генерирования и стабилизации электроэнергии микроГЭС основывается на уравнении баланса мощностей:

$$P_n = P_{гг} - P_b - P_z + P_p,$$

где P_n , $P_{гг}$, P_b , P_z , P_p – это, соответственно, мощность нагрузки, мощность гидротурбины микроГЭС, мощность балластной нагрузки, мощности заряда и разряда аккумуляторной батареи.

Интеллектуальное управление энергетическим балансом инверторной микроГЭС основано на выборе уровня стабилизации мощности гидрогенератора в

зависимости от графика электропотребления и обеспечении оптимальных условий функционирования системы аккумулирования электроэнергии в соответствии с типом используемых аккумуляторов.

Для приведенных типовых графиков сельских потребителей электроэнергии, оптимальные уровни мощности генерации гидрогенератора в процентах относительно пиковой нагрузки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Среднесуточная мощность генерации по категориям

| категория потребления | нагрузка гидрогенератора, % |
|---------------------------|--------------------------------|
| Группа нагрузки 1а | 33 |
| Группа нагрузки 1б | 39 |
| Группа нагрузки 1в | 60 |

Оптимальные уровни мощности генерации гидрогенератора, выбраны на основе статистических данных электропотребления сельских территорий и рассчитаны по среднему значению характерных суток. Эти данные позволяют выбрать мощность генерации для характерных графиков электропотребления, обеспечивающую необходимый обменный запас электроэнергии аккумуляторов, что обеспечивает возможность снижения затрат на строительство микроГЭС, за счет увеличения коэффициента использования установленной мощности гидрогенератора.

Библиографический список

1. Малая и микрогидроэнергетика [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.microhydro.ru/> (дата обращения 10.05.2023).
2. **Borkowski, D.**, Wegiel T., Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed// IEEE Transactions on Energy Conversion. 2013. Vol. 28. №2. P. 452-459.
3. **Лукутин Б.В.**, Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: STT, 2001. – 120 с.
4. **Лукутин Б.В.**, Киушкина В.Р. Ветроэлектростанции в автономной энергетике Якутии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 202 с.
5. **Лукутин Б.В.**, Обухов С.Г. Регулятор балластной нагрузки автономной микроГЭС // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 307. – № 3. – С.121-126

M.M. Popov, B.V. Lukutin

INTELLIGENT TECHNOLOGIES FOR GENERATION AND STABILIZATION OF ELECTRICITY IN MICRO-HYDROPOWER PLANTS

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. The article considers the possibility of reducing capital costs for an inverter micro-hydropower plant by choosing the optimal generation level for consumers with different power consumption schedules and intelligent approaches to the algorithm for the operation of inverter micro HPPs with electricity storage devices. The recommendations developed by the authors for stabilizing the generation level sufficient to balance the exchange capacity of electric energy accumulators allow increasing the utilization factor of the installed capacity of the hydraulic unit, reducing the energy characteristics of the pressure pipeline, and saving water consumption from a natural watercourse.

Key words: Derivation micro-hydropower plant, efficiency, energy storage, inverter, load graph, category of electricity consumption.

References

- [1] Malaya i mikrogidroenergetika [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.microhydro.ru/> (data obrashcheniya 20.01.2022).
- [2] Borkowski D., Wegiel T., Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed// IEEE Transactions on Energy Conversion. 2013. Vol. 28. №2. P. 452-459.
- [3] Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsiy. – Tomsk: STT, 2001. – 120 s.
- [4] Lukutin B.V., Kiushkina V.R. Vetroelektrostantsii v avtonomnoj energetike YAkutii. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2006. – 202 s.
- [5] Lukutin B.V., Obukhov S.G. Regulyator ballastnoy nagruzki avtonomnoy mikroGES. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2014. T. 307. № 3. – P. 121-126.

УДК 621.3

DOI: 10.46960/apeen_2023_397

В.В. Ростовский, А.В. Серебряков, Н.А. Серебряков**АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрены разработанные авторами научно-технические решения по созданию автономного источника питания на основе ветроэнергетической установки для питания электроприемников с отсутствующим централизованным электроснабжением. Разработаны и предложены алгоритмы работы. Выполнено сравнение эффективности предложенных схемных решений.

Ключевые слова: преобразование электроэнергии, альтернативная энергия, ветровые энергетические ресурсы, автономные источники энергии, автономное электроснабжение, дифференцирование нагрузок.

Удаленные территории и их энергообеспечение

Обеспечение энергодефицитных потребителей на сегодняшний день осуществляется либо за счет централизованного электроснабжения, либо созданием децентрализованных зон. Вместе с тем, эксплуатация существующих ЛЭП, при малых передаваемых мощностях и работающих в режиме близком к холостому ходу, нецелесообразна из-за низкого коэффициента загрузки по мощности и больших затрат на их содержание и обслуживание. Износ многих из них достигает 100%, а в ряде регионов, ранее имевшиеся сети прекратили свое существование, и данные негативные тенденции нарастают. В условиях развивающегося экономического кризиса строительство новых линий электропередач становится экономически невыгодным. Таким образом, в настоящий момент электрообеспечение малонаселенных и удаленных поселений осуществляется в основном стационарными и передвижными дизельными электростанциями (ДЭС), которых по России насчитывается более 5 тыс. штук [1].

Вышеперечисленные причины возникновения проблем электроснабжения проявляются в существенном изменении параметров сетевого напряжения: нестабильности его величины, формы и частоты, недостаточной мощности по току, ненадежности, т.е. его полном пропадании [2].

Анализ функциональных схем

Для питания какого-либо электроприемника необходимо чтобы на выходе электростанции были стабильные параметры напряжения и частоты (380 В, 50 Гц), но ввиду того, что ветрогенератор крутится с постоянно изменяющейся скоростью, его выходные параметры нестабильны [3].

Чтобы привести их к стабильному виду, нужно выполнить ряд преобразований.

1. Выпрямить переменное напряжение при помощи полупроводникового выпрямителя и сгладить пульсации при помощи LC-фильтра.



Рис. 1. Типовые проблемы электроснабжения

2. При помощи ШИП (широотно-импульсного преобразователя) постоянного напряжения преобразовать постоянное напряжение в регулируемое среднее (за период) среднее напряжение на выходе (это необходимо из-за того, что напряжение на выходе будет постоянно варьироваться от U_{\min} до U_{\max} ;

3. Установить АИН (автономный инвертор напряжения) для формирования синусоидального напряжения на нагрузке с постоянным напряжением и частотой (380 В, 50 Гц) [4].

В процессе работы были предложены две функциональные схемы реализации ветровой электростанции:

- Ветрогенератор с резервными АКБ и аварийным дизельным генератором на полную мощность нагрузки (рис.2) [5].
- Ветрогенератор с резервными АКБ, аварийным бензиновым генератором на малую мощность и дифференцированной нагрузкой (рис. 3) [6].

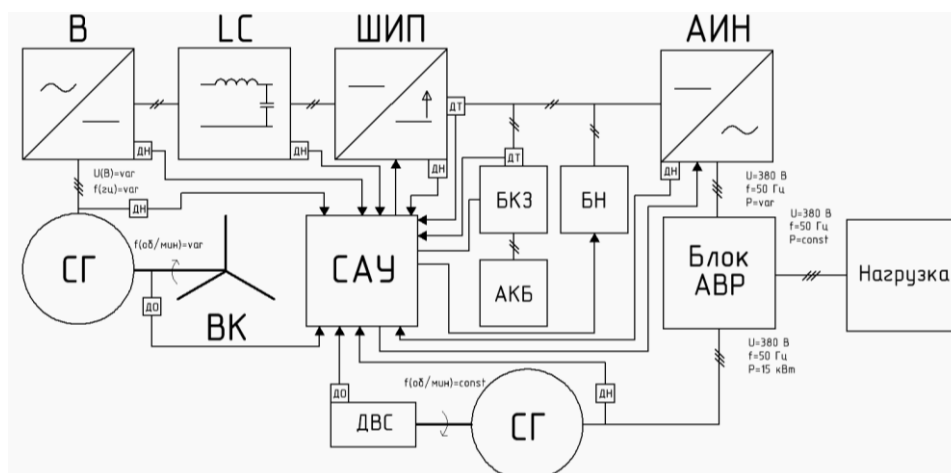


Рис. 2. Функциональная схема ветрогенератора с резервными АКБ и аварийным дизельным генератором на полную мощность нагрузки

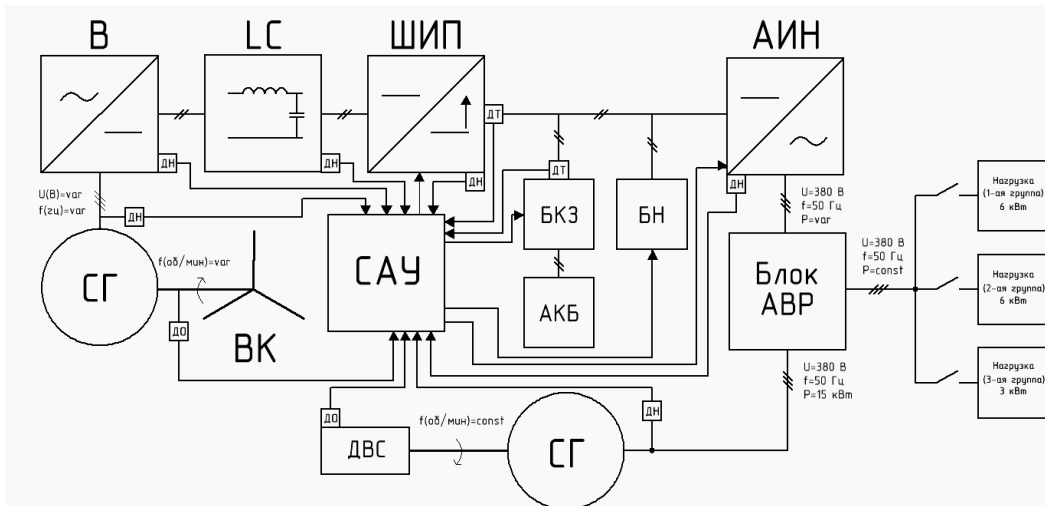


Рис. 3. Функциональная схема ветрогенератора с резервными АКБ, аварийным бензиновым генератором на малую мощность и дифференцированной нагрузкой

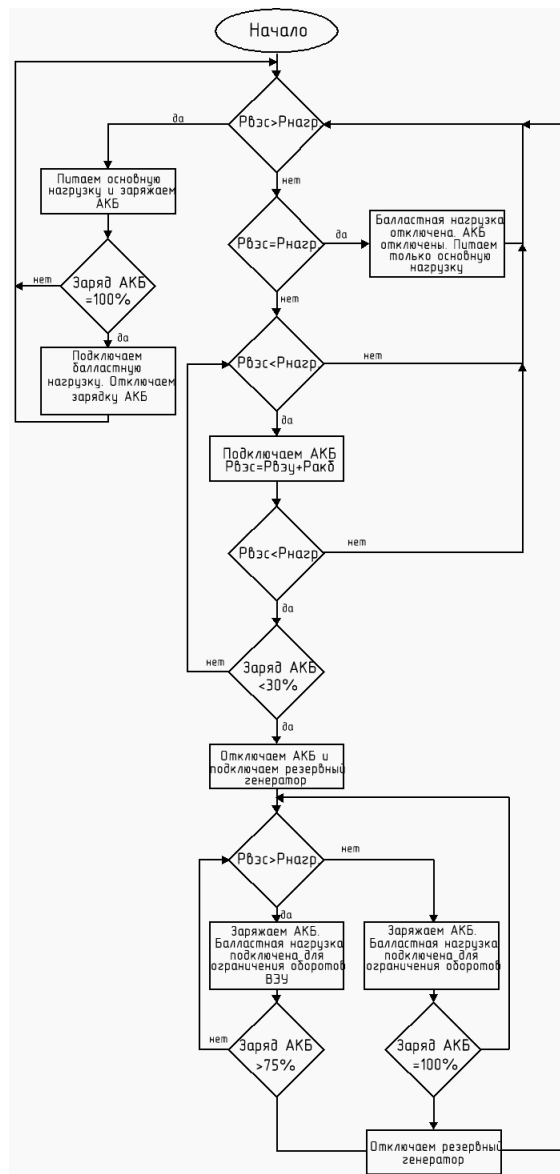


Рис. 4. Алгоритм работы ВЭУ + АКБ + БГ

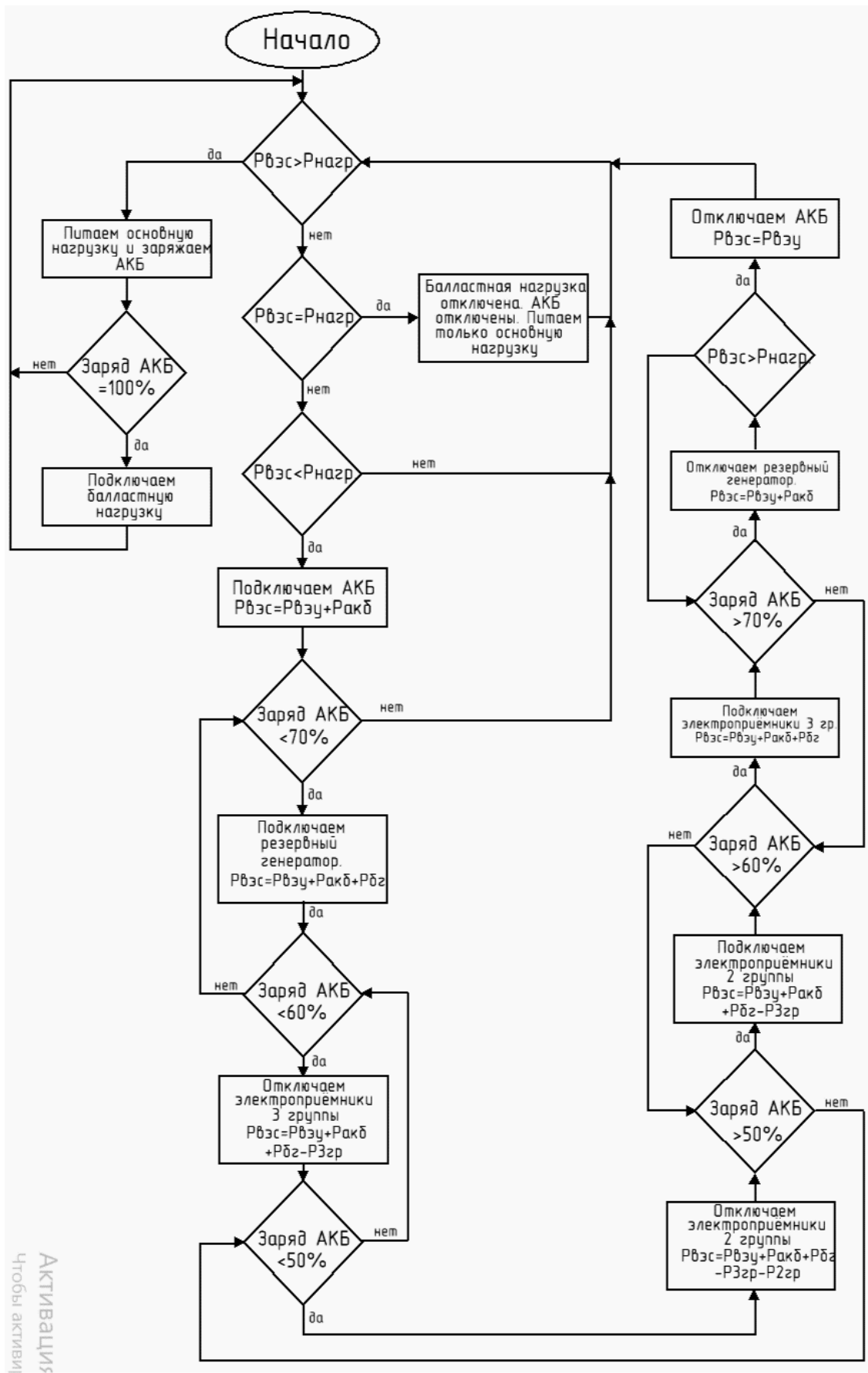


Рис. 5. Алгоритм работы ВЭС с дифференцированной нагрузкой

Алгоритм работы

Для каждой из предложенных схем разработаны алгоритмы работы, позволяющие реализовать всю последовательность действий при работе автономного источника питания.

В данной работе предложены функциональные схемы для реализации электроснабжения удаленного объекта от автономного источника питания на базе ветроэнергетической установки. Разработаны алгоритмы работы, учитывающие все возможные режимы и обеспечивающие бесперебойное электроснабжение удаленного потребителя. На наш взгляд, наиболее предпочтительным выглядит вариант использования ветрогенератора с резервными АКБ, аварийным бензиновым генератором на малую мощность и дифференцированной нагрузкой, позволяющий обеспечить бесперебойное электроснабжение для электроприемников мощностью до 3 кВт за счет наличия бензогенератора, дифференцирование нагрузки и питание электроприемников мощностью до 15 кВт при наличии требуемого ветрового потока. Стоит отметить, что данная схема обладает более сложным алгоритмом работы и более сложной САУ, но имеет лучшие технико-экономические характеристики.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Библиографический список

1. **Серебряков, А.В.** Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков, В.Г.Титов, Е.А.Чернов, А.В. Шахо // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 4. – С. 203-209.
2. **Риммер, А.А.** Анализ и решение проблем энергетики в России с помощью Ветряных электростанций / А.А. Риммер, Р.З. Кунгуров, Д.В. Камене и др. // Сборник научных статей региональной научно-практической конференции. – Ставрополь, 2022. С. 107-112.
3. **Черный, А.П.** Локальные автономные источники энергоснабжения для условий чрезвычайных ситуаций / А.П. Черный, Ю.В. Зачепа, Л.И. Мазуренко и др.// Техническая электродинамика. – 2020. – № 5. – С. 45-48.
4. **Петухова, Е.П.,** Ефимов Д.Н. Аналитический обзор использования ветровых электростанций / Проблемы управления производственными и инновационными системами. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. – 2022. С. 64-72.
5. **Бакулин, И.Н.,** Ефимова, И.А. Применение автономных источников питания для электроснабжения потребителей транспорта газа / Новые технологии в газовой промышленности. – ПАО «ВНИПИгаздобыча», 2016. С. 106-114.
6. **Максимова, М.В.,** Афанасьев А.С. Разработка структурной схемы регулируемого источника питания / Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы III Международной научно-технической конференции. – 2019. С. 348-351.

V.V. Rostovsky, A.V. Serebryakov, N.A. Serebryakov

ANALYSIS OF FUNCTIONAL CIRCUITS AND DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLIES

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The article discusses the scientific and technical solutions developed by the authors to create an autonomous power source based on a wind power plant for powering electric receivers with no centralized power supply. Algorithms of operation have been developed and proposed. The efficiency of the proposed circuit solutions is compared.

Key words: electricity conversion, alternative energy, wind energy resources, autonomous energy sources, autonomous power supply, load differentiation.

References

- [1] A.V. Serebryakov, V.G. Titov, E.A.Chernov, A.V. Shakhov. Load differentiation in power supply systems of autonomous consumers // Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev. Nizhny Novgorod, 2015, Collection No. 4. pp. 203-209.
- [2] Rimmer A.A., Kungurov R.Z., Kamenev D.V., Gorbunov I.A. Analysis and solution of energy problems in Russia with the help of wind power plants // Collection of scientific articles of the regional scientific and practical conference. Stavropol, 2022. pp. 107-112.
- [3] Cherny A.P., Zachepa Yu.V., Mazurenko L.I., Buryakovsky S.G., Chenchevoy V.V., Zachepa N.V. Local autonomous power supply sources for emergency situations // Technical Electrodynamics. 2020. No. 5. pp. 45-48.
- [4] Petukhova E.P., Efimov D.N. Analytical review of the use of wind power plants // Problems of management of production and innovative systems. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. 2022. pp. 64-72.
- [5] Bakulin I.N., Efimova I.A. Application of autonomous power sources for power supply of consumers of gas transport // New technologies in the gas industry. PJSC VNIPIgazdobycha. 2016. pp. 106-114.
- [6] Maksimova M.V., Afanasyev A.S. Development of a block diagram of a regulated power supply // Problems and prospects of development of power engineering, electrical engineering and energy efficiency. Materials of the III International Scientific and Technical Conference. 2019. pp. 348-351.

А.В. Шалухо, И.А. Липужин, Р.Ш. Бедретдинов, Ю.Н. Шувалова

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИСТЕКОВОМ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ВОДОРОДЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Работа посвящена повышению эффективности использования топливных элементов, работающих на водороде, в системах электроснабжения стационарных потребителей. Объектом исследования является энергоустановка, состоящая из трех топливных элементов, работающих на единую нагрузку (мультистек). Цель работы заключается в разработке и исследовании системы управления, обеспечивающей высокую энергетическую эффективность работы мультистека. Разработана математическая модель рассматриваемого мультистека, с помощью которой проведено моделирование его работы при различной мощности нагрузки и различных уровнях загрузки топливных элементов. На основе полученных результатов разработан алгоритм управления мультистекком, обеспечивающий оптимальное распределение мощности нагрузки между топливными элементами. Представлена Simulink-модель системы электроснабжения с мультистекком, предназначенная для проведения исследований и отработки алгоритма управления.

Ключевые слова: алгоритм управления, мультистек, топливный элемент, водород, энергетическая эффективность.

Одно из направлений развития современной электроэнергетики связано с расширением использования водорода для производства электроэнергии [1]. Согласно [2], в России развитие данного направления должно ориентироваться на создание отечественных технологий водородной энергетики. Топливные элементы (ТЭ) считаются наиболее перспективными установками для производства электроэнергии из водорода и, благодаря своей экологичности и высокой эффективности, могут найти широкое применение в системах электроснабжения объектов различной мощности и назначения.

Вместе с тем, в качестве недостатков ТЭ можно выделить недостаточно большой срок службы и низкую эффективность при малых нагрузках. Повысить эффективность, срок службы и надежность системы с ТЭ возможно путем совместного использования нескольких ТЭ в одной энергоустановке. Такие системы получили название «мультистеки» [3]. Однако для достижения указанных результатов требуется создание интеллектуальных систем управления мультистеками, учитывающих особенности ТЭ [3-5].

Объектом исследования является мультистек, состоящий из трех одинаковых ТЭ с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ) номинальной мощностью 1 кВт каждый. Цель работы заключается в разработке и исследова-

нии системы управления, обеспечивающей высокую энергетическую эффективность работы мультистека. Для достижения поставленной цели разработана математическая модель мультистека и исследованы различные сценарии его работы. Полученные результаты положены в основу алгоритма управления, для отработки которого разработана Simulink-модель системы электроснабжения с ТЭ.

Математическая модель мультистека

Для определения принципов построения алгоритма управления разработана математическая модель мультистека и проведено моделирование его работы при питании нагрузки мощностью 0,3; 0,6; 1; 2 и 3 кВт. Цель моделирования - определение КПД мультистека при различных вариантах соотношения между мощностью нагрузки, количеством работающих ТЭ и их загрузкой. В основу математической модели положены следующие формулы.

КПД мультистека определялся как отношение суммарной электроэнергии, выработанной всеми входящими в его состав стеками ТЭ, к энергии, которая была запасена в использованном водороде:

$$\eta_c = W / Q, \quad (1)$$

где W – выработанная мультистеком электроэнергия (кДж); Q – энергия, которая была запасена в водороде, поступившем на вход мультистека (кДж).

Значение электроэнергии W , выработанное мультистеком выражено в кДж (1 кВт·ч = 3600 кДж) с помощью выражения:

$$W = \sum_{i=1}^k (P_{iTЭ} \cdot \Delta t \cdot 3600) / 60 = \sum_{i=1}^k (U_{iTЭ} \cdot I_{iTЭ} \cdot \Delta t \cdot 3600) / 60, \quad (2)$$

где $P_{iTЭ} = U_{iTЭ} \cdot I_{iTЭ}$ – мощность на выходе ТЭ (кВт); Δt – интервал времени, за который определялась выработка электроэнергии (мин); k – количество работающих ТЭ (шт).

Значение Q определялось на основе данных о расходе водорода, который переведен в количество вещества:

$$Q = \sum_{i=1}^k (n_i \cdot 286), \quad (3)$$

где n_i – количество вещества (моль) определено с учетом рабочих параметров ТЭ (давление водорода и температура), используя уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$n_i = (p \cdot V) / (R \cdot T), \quad (4)$$

где p – давление (атм); V – объем использованного водорода (л); $R = 0,821$ л·атм / моль·К – газовая постоянная; T – температура (К).

Было проведено моделирование 39 сценариев работы мультистека. Результаты моделирования (выборочно) приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при значениях нагрузки более 2 кВт наиболее эффективным является равномерное распределение мощности между тремя ТЭ. Установлено, что, начиная с мощности нагрузки 2 кВт и меньше, наибольшая эффективность достигается при нулевой загрузке одного или нескольких ТЭ. При этом

существует два варианта нулевой загрузки ТЭ – работа на холостом ходу (водород и воздух продолжают подаваться) или полное отключение ТЭ.

Одной из особенностей работы ТЭ являются неизбежные деградационные процессы, скорость протекания которых зависит от многих параметров работы системы, в том числе от частых включений/отключений ТЭ. Данный фактор учтен при разработке алгоритма управления мультистеков.

Таблица 1

Результаты математического моделирования

| Загрузка стека ТЭ, % | | | η, % | Суммарный расход водорода, л/мин |
|------------------------------|-----|----|-------|----------------------------------|
| №1 | №2 | №3 | | |
| $P_{нагр} = 2 \text{ кВт}$ | | | | |
| 100 | 100 | 0 | 41,84 | 33,87 |
| 90 | 90 | 20 | 45,36 | 35,09 |
| 80 | 80 | 40 | 49,85 | 34,66 |
| $P_{нагр} = 1 \text{ кВт}$ | | | | |
| 100 | 0 | 0 | 41,84 | 16,93 |
| 90 | 10 | 0 | 43,60 | 18,46 |
| 80 | 20 | 0 | 48,63 | 18,19 |
| $P_{нагр} = 0,6 \text{ кВт}$ | | | | |
| 60 | 0 | 0 | 54,23 | 10,45 |
| 50 | 10 | 0 | 51,11 | 12,13 |
| 40 | 20 | 0 | 53,50 | 12,01 |
| $P_{нагр} = 0,3 \text{ кВт}$ | | | | |
| 30 | 0 | 0 | 54,17 | 5,99 |
| 20 | 10 | 0 | 45,10 | 7,79 |
| 10 | 10 | 10 | 38,40 | 9,62 |

Алгоритм управления мультистеком

На основе результатов математического моделирования и с учетом особенностей ТЭ для рассматриваемого мультистека разработан алгоритм управления, определяющий оптимальное распределение нагрузки между входящими в его состав ТЭ (рис. 1).

На начальном этапе поступает исходная информация ($P_{нагр}$, $P_{ТЭ}$ и n).

В Блоке определения оптимальных параметров задается минимальная загрузка ТЭ (P_{min}), при которой эффективно оставлять стек в работе (для рассматриваемого мультистека $P_{min} = 2 \text{ кВт}$), и T_{min} . Для каждого конкретного мультистека данные параметры подбираются в начале работы (T_{min} определяется с учетом информации о деградации выбранных ТЭ, входящих в установку).

В Блоке прогнозирования длительности нагрузки определяется $T_{нагр}$. Предполагается, что в дальнейшей работе данная функция будет реализована на основе нейросетевых технологий, которые на сегодняшний день считаются наиболее эффективными инструментами краткосрочного прогнозирования нагрузки [4].

В Блоке выбора оптимального режима с учетом $T_{\text{нагр}}$ рассчитывается количество работающих ТЭ и их загрузка для достижения наибольшего КПД мультистека. Если равномерная загрузка ТЭ будет меньше минимально целесообразной загрузки P_{min} , то происходит последовательное отключение ТЭ. Если загрузка ТЭ больше P_{min} , то нагрузка распределяется равномерно между включенными ТЭ.

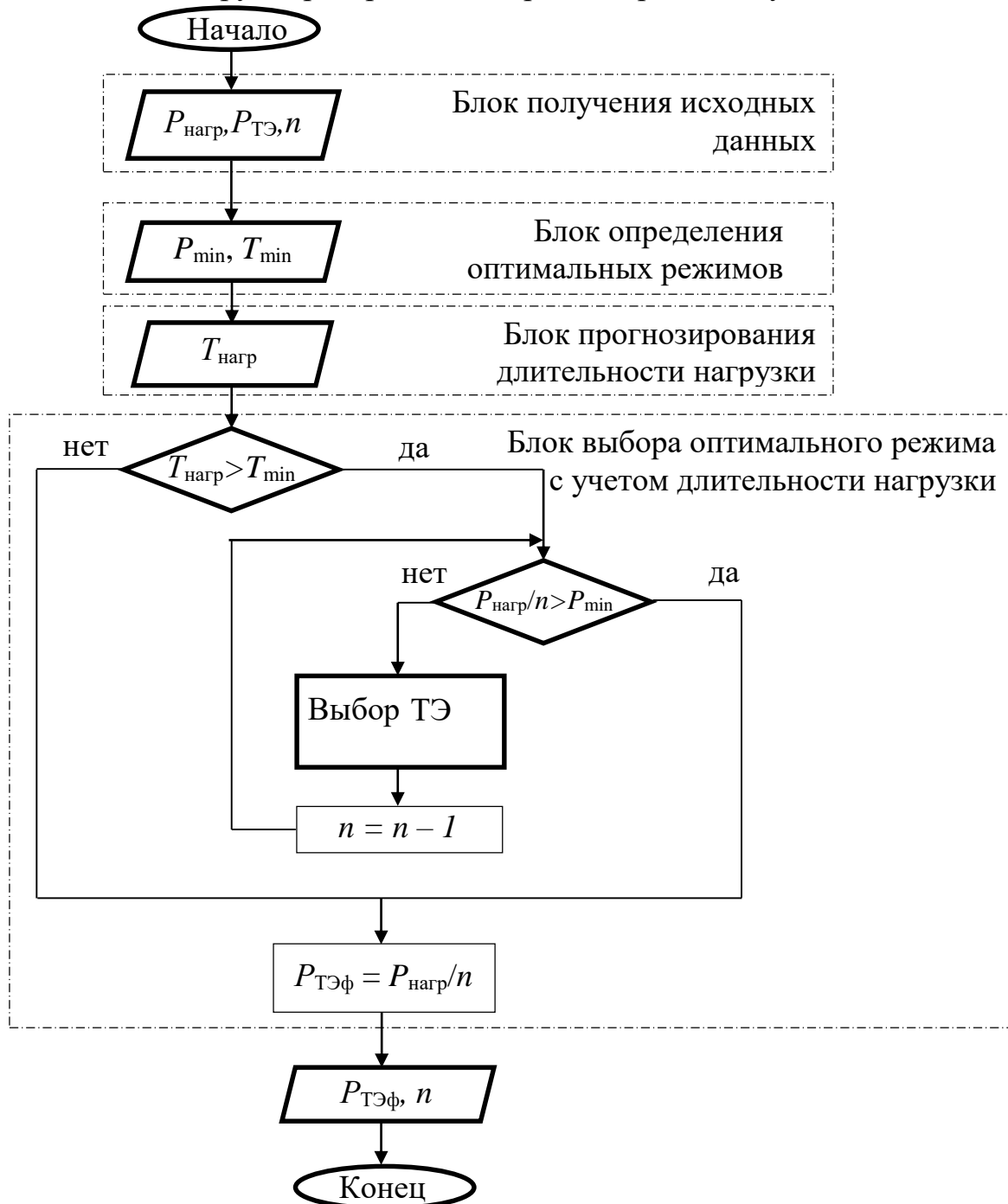


Рис. 1. Алгоритм распределения мощности нагрузки между ТЭ в составе мультистека:

$P_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки потребителя, кВт; $P_{\text{ТЭ}}$ – мощность одного ТЭ, кВт;

n – количество ТЭ, шт.; P_{min} – минимально целесообразная загрузка ТЭ, кВт;

T_{min} – минимально целесообразное время отключения ТЭ, ч;

$T_{\text{нагр}}$ – прогнозируемая длительность работы потребителя с одинаковой нагрузкой, ч;

$P_{\text{ТЭф}}$ – фактическая загрузка ТЭ, кВт

Блок выбора ТЭ для отключения предполагает проведение анализа для определения тех ТЭ, которые в данный момент наиболее целесообразно отключить. В дальнейшей работе предполагается доработка алгоритма для определения ТЭ, рекомендованных к отключению, с учетом уровня деградации (на основе сравнения динамики отклонения их фактической вольт-амперной характеристики от паспортной).

На выходе формируются данные о фактической загрузке каждого ТЭ $P_{ТЭф}$ и количестве работающих ТЭ n , работа алгоритма повторяется.

Имитационная модель системы электроснабжения с мультистеком

Для отработки алгоритма управления разрабатывается имитационная компьютерная модель системы электроснабжения с рассматриваемым мультистеком в программе Matlab R2020b/Simulink. На рис. 2 представлена часть разрабатываемой Simulink-модели с одним ПОМТЭ.

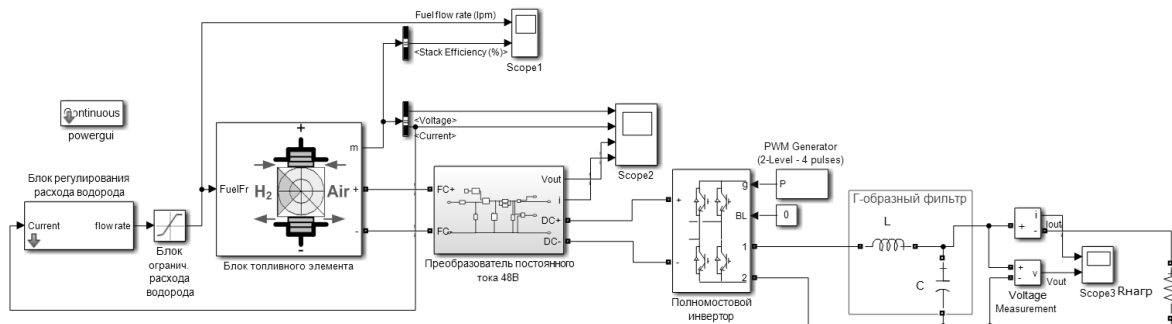


Рис. 2. Simulink-модель системы электроснабжения с ПОМТЭ

Для моделирования стека ТЭ использован блок Fuel Cell Stack. Регулирование подачи водорода на вход ТЭ осуществляется с помощью обратной связи по току.

На выходе ТЭ установлен понижающий преобразователь постоянного тока (DC/DC Buck converter), который понижает и стабилизирует выходное напряжение ТЭ до 48 В. После преобразователя установлен полномостовой инвертор и Г-образный фильтр, которые используются для преобразования постоянного тока в переменный и получения чистой синусоиды. Нагрузка моделируется активным сопротивлением.

Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование работы мультистека в различных режимах и отработку разработанного алгоритма управления.

Выводы

На основе проведенных исследований разработан общий алгоритм управления мультистеком с тремя водородными ТЭ, обеспечивающий наибольший КПД производства электроэнергии.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку и исследование Simulink-модели мультистека, разработку алгоритмов работы отдельных блоков и обработку полученных результатов на лабораторном стенде.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Библиографический список

1. **Бедретдинов, Р.Ш.** Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 4. – С. 47-58. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_47
2. **Холкин, Д.В.,** Чаусов, И.С., Ковалев, А.В. Водород: отдаляющиеся перспективы? – М., 2023. – 93 с.
3. **Ma, R.** et al. Recent progress and challenges of multi-stack fuel cell systems: Fault detection and reconfiguration, energy management strategies, and applications // Energy Conversion and Management. – 2023. – Vol. 285. – No. 117015. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117015
4. **Garcia, J.E.,** Herrera, D.F., Boulon, L., Sicard, P., Hernandez, A. Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system // proc. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014, pp. 218-223. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864614
5. **Wang, T.** et al. Adaptive current distribution method for parallel-connected PEMFC generation system considering performance consistency // Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 196. P. 866-877. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.06.048

A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, R.S. Bedretdinov, Yu.N. Shuvalova

DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM FOR MULTI-STACK BASED ON HYDROGEN FUEL CELLS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. The study is devoted to improving the efficiency of using fuel cells powered by hydrogen in power supply systems of stationary consumers. The object of the study is a power plant consisting of three fuel cells operating on a single load (multi-stack). The purpose of the work is to develop and study a control system that ensures high energy efficiency of the multi-stack. A mathematical model of the considered multi-stack has been developed, with the help of which its operation has been simulated at different load capacities and different levels of fuel cell loading. Based on the results obtained, a multi-stack control algorithm has been developed to ensure optimal distribution of load power between fuel cells. A Simulink model of a power supply system with a multi-stack is presented, designed for research and development of a control algorithm.

Keywords: control algorithm, multi-stack, fuel cell, hydrogen, energy efficiency.

References

- [1.] R.Sh. Bedretdinov, “Application effectiveness economic assessment of hybrid energy complex based on hydrogen”, Smart Electrical Engineering, no. 4, pp. 47-58, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_472.
- [2.] D.V. Kholkin, I.S. Chausov, A.V. Kovalev, Hydrogen: distant prospects? [Vodorod: otdalyayushchiesya perspektivy?]. Moscow, 2023. – 93 p. (in Russian).
- [3.] R. Ma et al., “Recent progress and challenges of multi-stack fuel cell systems: Fault detection and reconfiguration, energy management strategies, and applications”, Energy Conversion and Management, vol. 285, no. 117015, 2023. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117015.
- [4.] J.E. Garcia, D.F. Herrera, L. Boulon, P. Sicard, A. Hernandez, “Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system”, in proc. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014, pp. 218-223. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864614.
- [5.] T. Wang et al. “Adaptive current distribution method for parallel-connected PEMFC generation system considering performance consistency”, Energy Conversion and Management, vol. 196, pp. 866-877, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.06.048

**ПРОГРАММА СТРАТЕГИЧЕСКОГО АКАДЕМИЧЕСКОГО
ЛИДЕРСТВА «ПРИОРИТЕТ 2030»**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

Редактор **О.В. Пугина**
Компьютерный набор и верстка **В.Г. Петухова**

Подписано в печать 15.09.2023. Формат 60 x 84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 25, 75.
Тираж 100 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.
Адрес университета и полиграфического предприятия:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24