

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 2024

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, 2024. –
292 с.

Изложены проблемные вопросы современных преобразователей параметров электрической энергии, элементов электрооборудования промышленных установок и систем автоматизированного электропривода. Сборник содержит научно-технические результаты и разработки в области интеллектуальных электрических сетей и систем электроснабжения, распределенной энергетики, возобновляемых источников энергии и систем накопления энергии. Предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

В сборник включены материалы X Всероссийской (XLIII 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 978-5-502-01846-3

**© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2024**

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	5
Варламов Н.С., Сугаков В.Г., Малышев Ю.С. Вольтодобавочный корректор напряжения на основе многоуровневого инвертора.....	5
Мишенева Д.Р., Вихорев Н.Н., Ширшин К.А. Электромагнитная система активного выравнивания напряжений многоэлементной аккумуляторной батареи.....	12
Серов А.В., Титов В.Г., Бобылев И.В., Андрухин М.В. Формирование гальванически развязанного сигнала с аналоговых датчиков.....	18
Ширшин К.А., Вихорев Н.Н., Мишенева Д.Р. Анализ качества выходного напряжения регулируемого квазирезонансного преобразователя постоянного напряжения	26
Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	32
Бычков Е.В., Мельников В.Л. Апробация алгоритмов водоотведения в режиме симуляции Owenlogic.....	32
Дарьенков А.Б., Храмов А.Е. Адаптивный наблюдатель состояния асинхронного двигателя	42
Ермолаев А.И., Ерофеев В.И., Плехов А.С., Тишин И.В. Исследование магнитного шума в асинхронном двигателе со статическим эксцентриситетом ротора.....	53
Крылов Ю.М., Агапов А.А., Литвиненко А.М. Математическое моделирование высокодинамичных следящих цифровых электроприводов.....	67
Смирнова А.В., Дарьенков А.Б., Соколов В.В. Имитационная модель трехфазного преобразователя «Виенна».....	75
Старостина Я.К., Сиразетдинов Д.И. Производительность транзисторного электропривода при различных режимах работы грузоподъемного механизма	83
Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором в COMSOL Multiphysics для стационарного режима.....	91
Ульянов Д.А., Смирнов А.Ю. Исследование пуска индукторного двигателя в составе привода аварийной защиты.....	99
Секция 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	103
Алешин П.А., Севостьянов А.А., Серебряков Н.А. Применение обобщенного показателя при анализе качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий.....	103
Ахметбаев А.Д. Центры обработки данных как энергообъект электроэнергетической системы.....	110
Власов А.Б., Буев С.А. Повышение достоверности тепловизионной диагностики электрооборудования.....	116
Воронина Е.В., Крюков А.В. Учет металлических опор порталного типа при моделировании электромагнитных полей тяговых сетей 25 кВ в аварийных режимах....	122
Губская Е.И., Колобов В.В., Карпов А.С., Ярошевич В.В. Компенсация влияния дуговых сталеплавильных печей на электрические сети.....	128
Каретников М.С., Шишков Е.М. Влияние материала стен многоквартирных домов на электропотребление в квартирах.....	139
Кокорев А.А., Соснина Е.Н. Системы диагностики силовых трансформаторов.....	147

Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Моделирование системы тягового электроснабжения с целью обоснования мероприятий по снятию ограничений в пропускной способности.....	162
Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен К.Х. Моделирование режимов плавки гололеда в тяговых сетях постоянного тока.....	168
Лахлах М.Х., Монаков Ю.В. Трехмерная визуализация коммутационных перенапряжений вдоль высоковольтной кабельной линии.....	174
Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Халтурин В.А. Анализ электрических нагрузок дошкольных и общеобразовательных учреждений с последующей разработкой нормативных требований.....	179
Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Внедрение актуализированных нормативных требований для расчета потребной мощности многоквартирных жилых домов.....	186
Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Расчет электрических нагрузок многоквартирных домов и общественных зданий с учетом зарядной инфраструктуры для электромобилей.....	191
Шарыгин М.В., Альшахери А.М., Джериу А.С. Общий принцип построения алгоритма адаптивной токовой защиты распределительных сетей 6-35 кВ.....	199
Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ	205
Аккад А.Ф., Соснина Е.Н. Исследование эффективности D-STATCOM на нечеткой логике в электрической сети с ВИЭ.....	205
Алешин П.А., Серебряков А.В., Серебряков Н.А. Прогнозирование технического состояния дизель-генераторной установки переменной скорости вращения на основе многообмоточного синхронного генератора.....	215
Георгиевский И.Д. О роли систем прогнозирования выработки электроэнергии ветровых и солнечных электростанций при росте их доли в структуре генерирующих мощностей.....	224
Кралин Ал.А., Крюков Е.В., Титов Д.Ю., Петухов Я.И., Кралин Ан.А. Моделирование цилиндрического линейного генератора в COMSOL Multiphysics.....	231
Кугучева Д.К., Харитонов М.С. Влияние объектов микрогенерации на некоторые показатели качества электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения.....	237
Лоскутов А.А., Симанов А.С. Применение симплекс метода для оптимального использования автономного гибридного электроэнергетического комплекса.....	243
Романов Л.Р., Шарыгин М.В. Использование аварийных параметров режима для улучшения эффективности токовых защит.....	257
Ростовский В.В., Серебряков А.В., Кочеганов Д.М. Выбор оптимального метода контроля работоспособности автономного генераторного комплекса.....	264
Семькина И.Ю., Завьялов В.М., Нечипоренко Я.А. Модель жизненного цикла систем беспроводного заряда для автономного технологического электротранспорта.....	271
Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В., Гусев Д.А. Исследование участка электрической сети с тиристорным регулятором напряжения и источником распределённой генерации.....	278
Шалухо А.В., Липужин И.А., Бедретдинов Р.Ш., Шувалова Ю.Н. Разработка искусственной нейронной сети для системы управления энергоустановкой на топливных элементах.....	285

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

УДК 621.314.222.766

Н.С. Варламов, В.Г. Сугаков, Ю.С. Малышев**ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫЙ КОРРЕКТОР НАПРЯЖЕНИЯ
НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА**

Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье представлены результаты имитационного моделирования вольтодобавочного устройства на основе многоуровневого инвертора напряжения. В качестве результатов исследования приведены диаграммы работы и графические зависимости коэффициента нелинейных искажений. Показано, что предложенное устройство обеспечивает формирование многоуровневого выходного напряжения для коррекции небаланса фазных напряжений и компенсации гармонических искажений.

Ключевые слова: вольтодобавочный трансформатор, судовая электроэнергетическая сеть, корректор напряжения.

Обеспечение качества электрической энергии, регламентируемое правилами Российского классификационного общества, является важной задачей на объектах водного транспорта в связи с большим количеством нелинейных потребителей. К решениям по обеспечению электромагнитной совместимости электрооборудования относятся: выбор способа управления полупроводниковыми ключами и топологии полупроводниковых преобразователей, включение демпфирующих устройств, применение систем автоматического регулирования напряжения, использование активных и пассивных фильтров [1, 2].

Устройства на основе вольтодобавочного трансформатора нашли широкое применение в системах компенсации небаланса фазных напряжений [3], в энергосберегающем электроприводе, а также в последовательных и гибридных активных фильтрах [4, 5]. Для одновременной коррекции небаланса фазных напряжений и компенсации гармонических искажений при работе на переменную неоднородную нагрузку разработан корректор напряжения (КН), который обеспечивает форму выходного напряжения, наиболее приближенную к эталонному напряжению [6].

Целью данной работы является разработка и исследование схемного решения корректора напряжения на основе многоуровневого инвертора с использованием имитационной модели (рис. 1). Силовая часть КН состоит из последовательно включенных однофазных инверторов по топологии *Serial Connected H-bridge (SCHB) Multi-Level Converter* [7]. Источником напряжения звена постоянного тока инвертора служит однофазный выпрямитель, гальванически развязан-

ный через трансформатор. Однофазный инвертор формирует три уровня выходного напряжения и вместе с источником напряжения, дросселем и конденсатором составляют силовой модуль. Номинальное напряжение питания модуля определяется количеством однофазных инверторов в фазе (плече) преобразователя.

Принцип работы КН заключается в формировании и передаче в систему электроснабжения потребителя напряжения вольтодобавки, которое находится в противофазе с высшими гармониками напряжения сети.

Выходное напряжение u_{out} корректора напряжения определяется следующим образом:

$$u_{out}(t) = u_{in} + h \cdot |u_{in} - u_{\Delta}| = u_{in} + u_{\Delta},$$

где u_{in} – входное напряжение, В; h – переключающая функция, u_{Δ} – эталонное напряжение, В; u_{Δ} – напряжение вольтодобавки, В.

Переключающая функция h описывает действие силовых ключей (направление вольтодобавки) и имеет следующий вид:

$$h = \begin{cases} 1, & \text{если } |u_{in}| < |u_{\Delta}| \\ 0, & \text{если } |u_{in}| = |u_{\Delta}| \\ -1, & \text{если } |u_{in}| > |u_{\Delta}| \end{cases}$$

Эталонное напряжение $u_{\Delta}(t)$ синусоидальной формы:

$$u_{\Delta}(t) = U_m \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right),$$

где U_m – амплитудное значение эталонного напряжения, В; T – период входного напряжения, с; t – текущее время, с.

Выходное напряжение $u_{\Delta k}$ одного однофазного инвертора определяется следующим образом [7]:

$$u_{\Delta k} = (a_k - 1) \cdot U_{dc},$$

где U_{dc} – напряжение источника питания на шине постоянного тока, В; a_k – переключающая функция.

Переключающая функция a_k имеет вид:

$$a_k = \begin{cases} 0, & \text{если } u_{\Delta} \geq u_{опк1} > u_{опк2} \\ 1, & \text{если } u_{опк1} > u_{\Delta} > u_{опк2} \text{ или } u_{опк1} \leq u_{\Delta} \leq u_{опк2}, \\ 2, & \text{если } u_{\Delta} \leq u_{опк2} < u_{опк1} \end{cases}$$

где $u_{опк1}$, $u_{опк2}$ – опорные сигналы.

При использовании нескольких последовательно соединенных однофазных инверторов SCHB напряжение вольтодобавки определяется выражением:

$$u_{\Delta}(t) = u_{\Delta 1} + u_{\Delta 2} + \dots + u_{\Delta N} = \sum_{k=1}^N u_{\Delta k} = (\sum_{k=1}^N a_k - N) \cdot U_{dc},$$

где $u_{\Delta k}$ – выходное напряжения инвертора напряжения, В; N – количество последовательно соединенных инверторов.

Имитационная модель и результаты моделирования корректора напряжения

Анализ работы КН на основе многоуровневого инвертора проводился на модели, изображенной на рис. 1 (подробное описание системы формирования напряжения и модели отражено в работе [8]). Данная модель содержит три вольтодобавочных трансформаторов $T1-T3$, первичная обмотка которых питается от регулируемого источника напряжения вольтодобавки с системой управления $AF1$ (корректор напряжения). Вторичная обмотка вольтодобавочных трансформаторов включена последовательно в цепь генераторного агрегата $G1$ ($S_{G1} = 60$ кВА, $U_{G1ном} = 400$ В, $f_{G1ном} = 50$ Гц) с системой автоматического регулирования напряжения и нагрузкой $Z3$ (4 кВт). Помимо этого, модель включает в себя нагрузку $Z1$ (3 кВт) и нелинейную нагрузку, представленную в виде трехфазного мостового выпрямителя $VDS1$ и нагрузки $Z2$ (20 кВт).

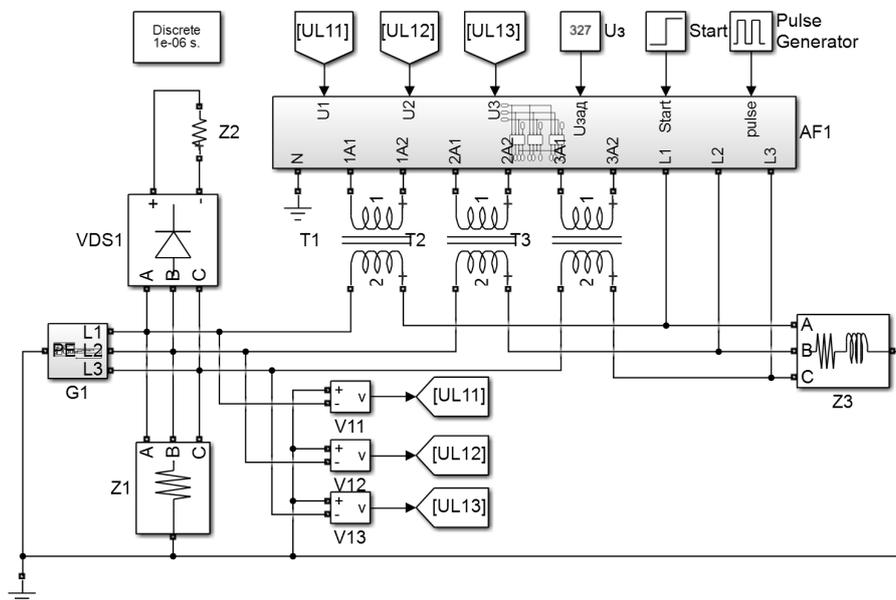


Рис. 1. Имитационная модель корректора напряжения

Питание КН осуществляется через клеммы $L1-L3$. К входам $U1-U3$ системы управления КН через вольтметры $V11-V13$ подается напряжение со входа КН, на вход $U_{зад}$ – амплитудное значение эталонного напряжения, а через вход $Start$ КН вводится в работу.

В каждой фазе КН присутствуют четыре модуля однофазного инвертора, образуя восьмиуровневый инвертор. Один модуль (рис. 2) состоит из следующих элементов: трансформатора $T1$, однофазного мостового выпрямителя $VDS1$, дросселя $L1$, конденсатора $C1$, четырех управляемых ключей $VT1-VT4$, двух источников опорного напряжения $SAW+$ и $SAW-$, элементов сравнения и логического НЕ, входа управляющего напряжения IN , а также клемм $X1-X4$.

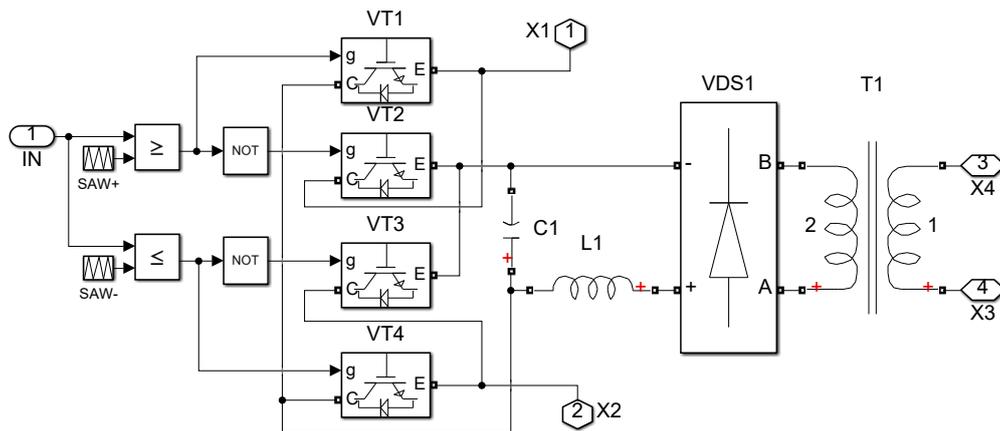


Рис. 2. Схема имитационной модели однофазного инвертора

Результаты моделирования корректора напряжения представлены на рис. 3 и рис. 4. На рис. 3, а показано формирование напряжения вольтодобавки для одной фазы КН на основе сравнения управляющего напряжения и опорных напряжений треугольной формы многоуровневого инвертора.

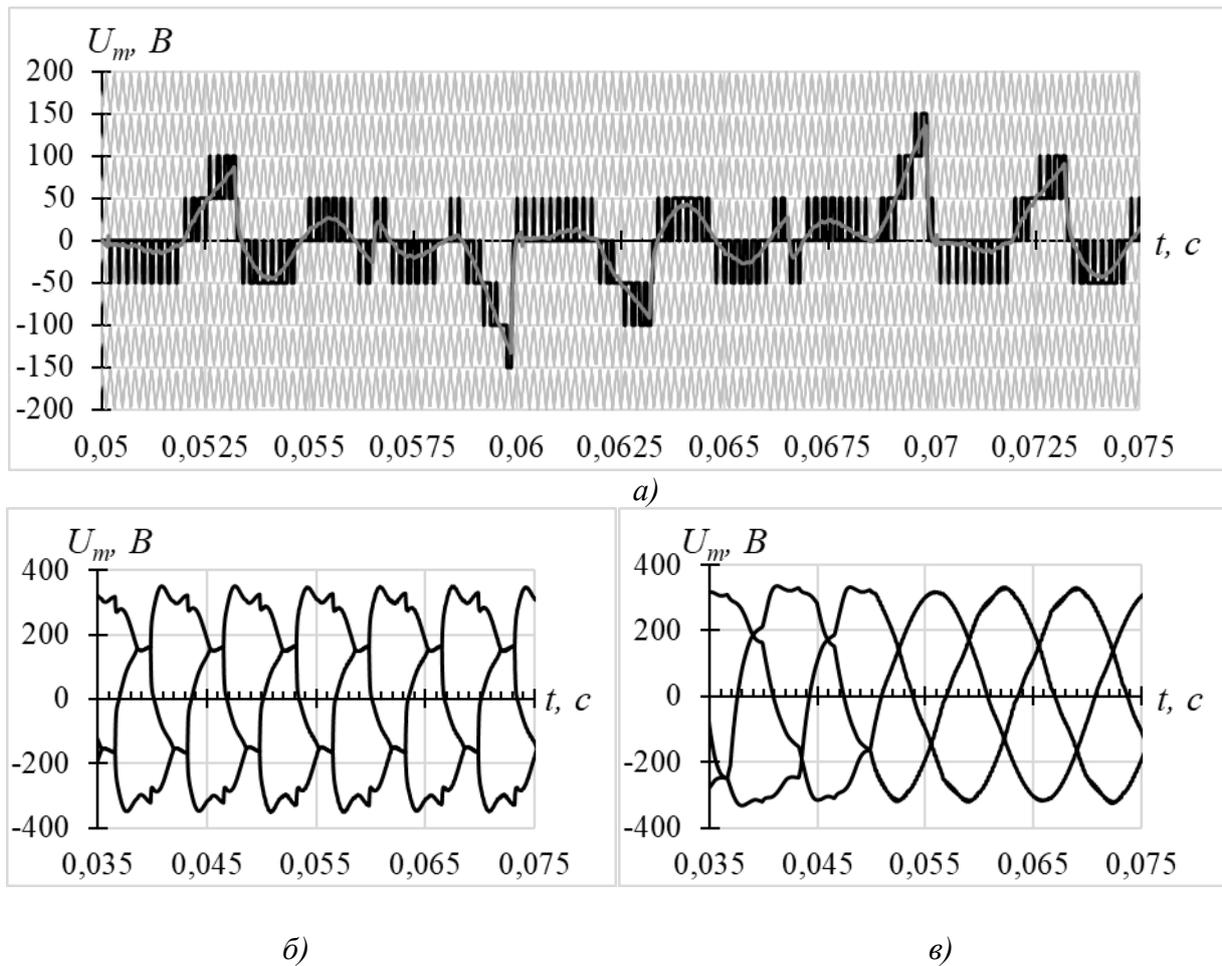


Рис. 3. Результаты моделирования: а – диаграмма формирования напряжения вольтодобавки; б – напряжение на входе КН; в – напряжение на выходе КН

В период времени от 0 – 0,05 с за счет нелинейной нагрузки $Z2$, мощность

которой составляет 20% от мощности генератора, установившееся значение коэффициента нелинейных искажений до КН достигает $THD_U \approx 14,4\%$, а на выходе КН – $THD_U \approx 8\%$ (рис. 4).

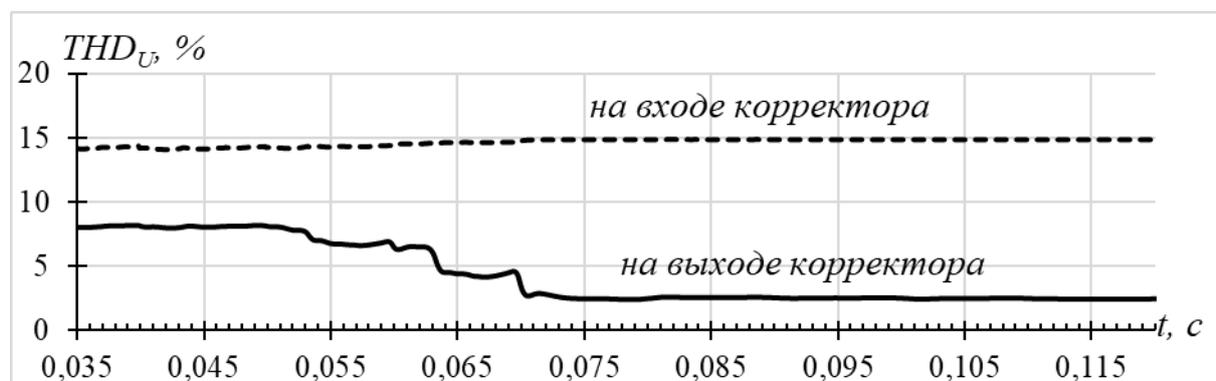


Рис. 4. Коэффициент THD_U на входе и выходе КН

При подаче команды запуска КН (0,05 с) формируется напряжения вольтодобавки (рис. 3, а) на основе напряжения управления. В результате форма напряжения на выходе КН становится близкой к эталонному значению. В установившемся режиме (0,1 с) на выходе КН коэффициент $THD_U \approx 15\%$, а на выходе – $THD_U \approx 3\%$ (рис. 4).

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что корректор напряжения на основе многоуровневого инвертора позволяет отказаться от независимого регулируемого источника электрической энергии, приведенной в работе [8], получая аналогичные выходные параметры. Однако при использовании многоуровневого инвертора в выходном и входном напряжении присутствуют гармонические искажения, вызванные работой широтно-импульсной модуляции. Применение многоуровневого инвертора топологии SCHB положительно влияет на форму потребляемого тока КН, в особенности при использовании многообмоточного трансформатора для питания силовых модулей.

Выводы

Результаты имитационного моделирования КН показали, что использование многоуровневого инвертора в составе устройства позволяет снизить величину небаланса фазных напряжений и гармонических искажений на стороне потребителя электрической энергии. Качество выходного напряжения в данном случае определяется формой задания эталонного напряжения, а также количеством уровней напряжения многоуровневого инвертора. Увеличение количества последовательно соединенных инверторов позволяет приблизить форму напряжения вольтодобавки к эталонному напряжению и уменьшить гармонические искажения потребляемого тока КН, увеличивая массогабаритные показатели.

Предложенное устройство может быть использовано для регулирования напряжения переменного тока в судовых электроэнергетических системах для обеспечения стабильных параметров питания потребителей электрической энергии.

Библиографический список

1. 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.
2. **Анисимов, Я.Ф.** Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок / Я.Ф. Анисимов, Е.П. Васильев. — Л.: Судостроение, 1990. — 264 с.
3. **Сугаков, В. Г.** Компенсация небаланса фазных напряжений / В. Г. Сугаков, О. С. Хватов, Ю. С. Малышев, А. А. Тощев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2015. — № 2. — С. 30–34. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.030.034.
4. **Мещеряков, В. Н.** Исследование активного фильтро-компенсирующего устройства с общим звеном постоянного тока / В. Н. Мещеряков, М. М. Хабибуллин, И. С. Павлов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 1. — С. 44–51. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.044-051.
5. **Akagi H.,** Watanabe E. H. & Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Second edition. 2017.
6. Пат. 2612055, Российская Федерация, МПК H02P 9/14. Корректор напряжения / В. Г. Сугаков, Ю. С. Малышев, О. С. Хватов, Н. С. Варламов, И. И. Ягжов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». — № 2631862; Заявл. 27.10.2016; опубл. 27.09.2017, бюл. № 27. — 10 с.
7. **Trzynadlowski, Andrzej.** Introduction to modern power electronics / Andrzej M. Trzynadlowski. — Third edition. — John Wiley & Sons, 2016. — 471 p.
8. **Сугаков, В.Г.** Вольтодобавочный корректор напряжения с использованием эталонной формы напряжения / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1264–1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276.

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

VOLTAGE CORRECTOR BASED ON MULTILEVEL INVERTER

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of simulation modeling of a voltage booster device based on a multi-level voltage inverter. As the results of the research, operation diagrams and graphical dependences of the nonlinear distortion coefficient are presented. It is shown that the proposed device provides the formation of a multi-level output voltage to correct the unbalance of phase voltages and compensate for harmonic distortions.

Key words: booster transformer, ship electrical power system, voltage corrector.

References

- [1] 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.
- [2] Anisimov, YA.F. and E.P. Vasil'ev. "Elektromagnitnaya sovместimost' poluprovodnikovyyh preobrazovatelej i sudovyh elektroustanovok" [Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and ship electrical installations]. L. Sudostroenie, 1990, - 264 p.
- [3] Sugakov, V. G., O. S. Khvatov, Y. S. Malyshev, and A. A. Toshchev. "Kompensaciya nebalansa faznyh napryazhenij" [Compensation of phase voltage unbalance] *Vestnik IGEU*, no. 2, pp. 30-34, 2015 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672..2.030-034.
- [4] Meshcheryakov, V. N., M. M. Khabibullin, and I. S. Pavlov. "Issledovanie aktivnogo fil'tro-kompensiruyushchego ustrojstva s obshchim zvenom postoyannogo toka" [A study of the active filter-compensation device with a common DC link] *Vestnik IGEU*, no. 1, pp. 44-51, 2016 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.044-051.
- [5] Akagi H., Watanabe E. H. & Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Second edition. 2017.
- [6] Sugakov, V. G., Yu. S. Malyshev, O. S. Khvatov, N. S. Varlamov, and I. I. Yagzhov. RU 2612055, IPC H 02 P 9/14. Korrektor napryazheniya. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Sept. 2017.
- [7] Trzynadlowski, Andrzej. Introduction to modern power electronics / Andrzej M. Trzynadlowski. — Third edition. — John Wiley & Sons, 2016. — 471 p.
- [8] Sugakov V.G., N.S. Varlamov and Y. S. Malyshev. "Vol'todobavochnyj korrektor napryazheniya s ispol'zovaniem etalonnogo formy napryazheniya" [Booster voltage corrector with use of standard voltage form] *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, no. 6, pp. 1264-1276, 2018 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi69.219>.

УДК 621.314.1

Д.Р. Мишенева, Н.Н. Вихорев, К.А. Ширшин

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО ВЫРАВНИВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрены варианты реализации системы активного выравнивания напряжений элементов аккумуляторных батарей с минимизированными энергетическими потерями. Приведены принципиальные и структурные схемы, а также описание принципов работы балансировки многоэлементных аккумуляторных батарей. Предложена схемотехника гальванически развязанного управления двунаправленным полупроводниковым ключом в контуре передачи энергии от элемента к балансировочному конденсатору. Приведена гибридная схемотехника активного балансера, сочетающего электромагнитную и резистивную части.

Ключевые слова: активная балансировка, многоэлементные батареи, высоковольтные аккумуляторы, гальваническая развязка, драйвер, двунаправленный ключ.

Развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) призвано решать задачи по устранению ряда проблем, связанных с истощением ресурсов и загрязнением окружающей среды. Россия, наряду с другими странами, реализует стратегии развития экономики с низким уровнем выбросов углерода. «Энергетическая стратегия-2030» предусматривает структурную диверсификацию, в рамках которой углеродная энергетика дополнится неуглеродной; внедрение широкомасштабных мер по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, а также развитие ВИЭ. Благодаря развитию и использованию новых видов энергии и продвижению интеллектуальных сетей (*Smart Grid*), исследования технологий хранения электроэнергии стали неотъемлемой частью развития современной электроэнергетики [1].

Аккумуляторные системы накопления энергии, питающие большие нагрузки, состоят из большого числа элементов. Ввиду того, что все аккумуляторные элементы имеют параметрические отклонения, процессы заряда и разряда требуют применения схем выравнивания напряжения элементов.

Одним из самых распространенных способов выравнивания напряжения является метод пассивного балансирования. Суть метода заключается в рассеивании излишней энергии элемента на балластных резисторах. Широкое распространение пассивного балансирования обусловлено его простотой. Однако применение этого метода сопряжено с низкой эффективностью цепей балансирования и как следствие аккумуляторной системы в целом.

Предлагаемое решение выравнивания напряжения многоэлементных аккумуляторных батарей позволит использовать излишнюю энергию элементов для координатного балансирования всего модуля АКБ, не рассеивая ее в виде тепла.

На рис. 1, а представлен способ активного балансирования батареи путем передачи энергии наиболее заряженных элементов к наименее заряженным.

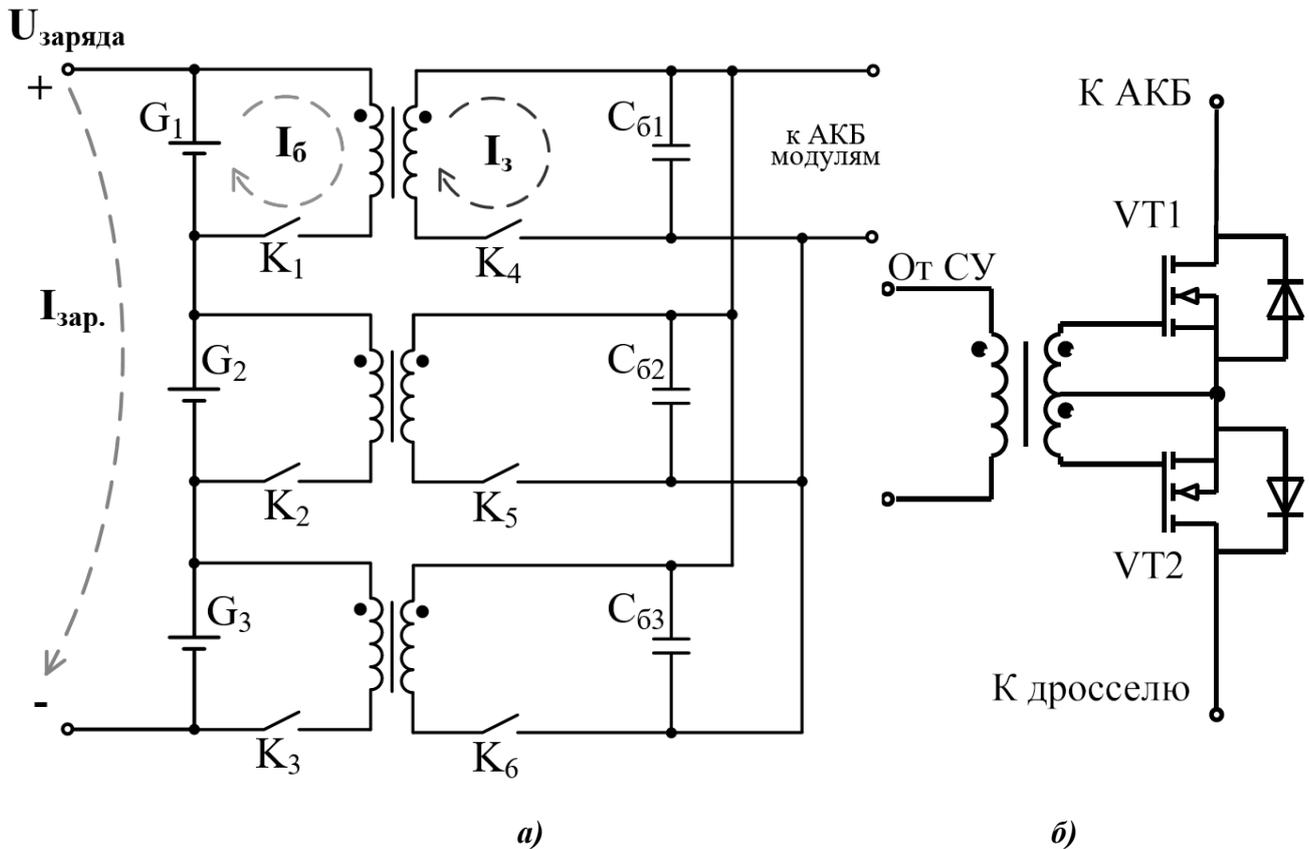


Рис. 1. Система активного балансирования с индивидуальными дросселями:
 а – структурная схема активного балансирования; б – принципиальная схема двунаправленного ключа

Способ балансирования на рис. 1, а основан на принципе работы преобразователя постоянного напряжения. При избыточном заряде элемента подается сигнал управления на двунаправленный транзисторный ключ, и энергия накапливается в первичной обмотке дросселя. Передача энергии в буферный конденсатор обеспечивается отпиранием ключа во вторичной обмотке дросселя. Энергия из конденсаторов может быть передана в следующий модуль, тем самым с помощью такой схемы можно выравнивать напряжение нескольких аккумуляторных модулей. Предлагаемое решение может быть реализовано с помощью трансформатора. В таком случае ключи К1 и К4 (рис. 1, а) могут работать одновременно, а согласование АКБ модулей происходит за счет коэффициента трансформации импульсного трансформатора.

Эксплуатация этого решения более предпочтительна на частоте в несколько десятков кГц, это позволит уменьшить размеры дросселей и конденсаторов.

Исходя из того, что основной смысл предлагаемого решения – это снижение потерь аккумуляторной системы, то все элементы балансировочных цепей должны нести в себе минимальные энергетические потери, это касается и двунаправленных ключей (рис. 1, б). Минимальные потери ключей возможны с помощью использования транзисторов с малым сопротивлением открытого канала.

Высокочастотными полупроводниками с низким падением напряжения являются *MOSFET* транзисторы. Сопротивление канала этих транзисторов зависит от класса напряжения, на который они изготовлены. В диапазоне напряжений до 60 Вольт существуют *MOSFET* транзисторы с сопротивлением канала в открытом состоянии до тысячных долей Ома.

Активное балансирование на рис. 1, а может применяться в ответственных аккумуляторных подстанциях, в связи с тем, что по правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей в батарее может быть не более 5% отстающих элементов. Напряжение отстающих элементов в конце разряда должно отличаться от среднего напряжения остальных элементов не более чем на 1,5% [2].

Преимущества схемы: высокое КПД, энергия не рассеивается как на резисторах в пассивной балансировке, а накапливается в буферном конденсаторе и передается между элементами.

Недостатки такого решения – это высокая стоимость и большие габариты. Увеличение количества элементов и модулей батареи вызывает рост количества двунаправленных транзисторов, дросселей и конденсаторов.

Вариация способа активного балансирования на рис. 1 представлена на рис. 2.

Отличительными особенностями приведенной схемы (рис. 2) от схемы (рис. 1, а) является использование одного многообмоточного дросселя на несколько элементов батареи. Принцип работы основан на тех же процессах: передача избыточной энергии элементов в буферный конденсатор через обмотку дросселя с применением двунаправленных ключей с минимальным падением напряжения [3].

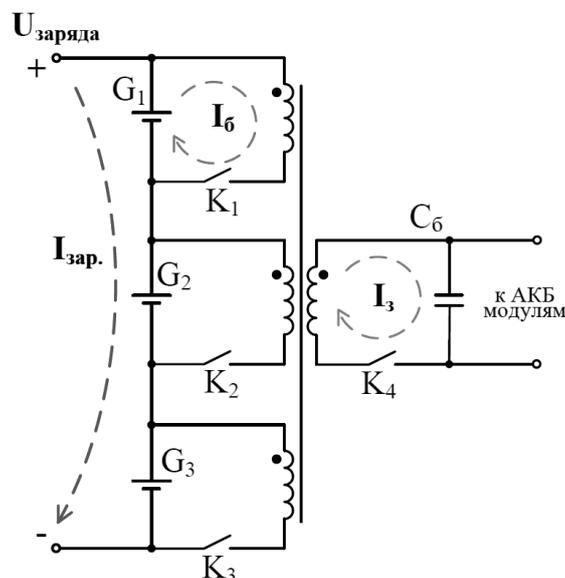


Рис. 2. Структурная схема активного балансирования с многообмоточным дросселем

С учетом того, что к буферному конденсатору может подключаться большое количество батарейных модулей, напряжение на конденсаторе может достигать десятков вольт в зависимости от количества параллельно подключенных балансировочных цепей. Поэтому ключи со стороны конденсатора должны выбираться на значительно большее напряжение, чем ключи со стороны элементов.

На рис. 3 представлена гибридная балансировочная система, основанная на предложенной в [3] активном балансировании и методе пассивного балансирования.

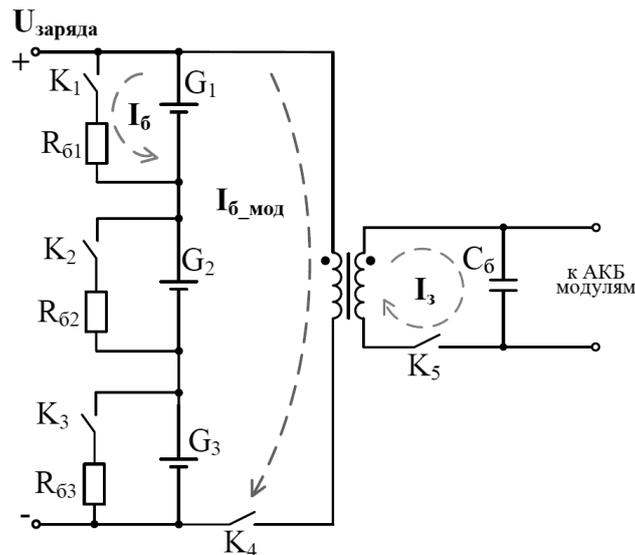


Рис. 3. Гибридная балансировочная система

Сущность метода заключается в выравнивании напряжений элементов внутри одного модуля с помощью пассивного балансирования, а выравнивание аккумуляторных модулей между собой осуществляется активным балансированием с использованием двухобмоточного дросселя (или импульсного трансформатора) и буферного конденсатора.

В этой системе применяются всего два двунаправленных ключа, в цепях первичной и вторичной обмоток дросселя, и один дроссель или импульсный трансформатор, что значительно уменьшает затраты на балансировочные цепи.

Уменьшение количества дросселей позволит значительно уменьшить стоимость балансира, а также габариты платы. Однако число обмоток ограничено 2-3, ввиду ухудшающегося параметра магнитной связи обмоток. Для достижения лучшего коэффициента магнитной связи при большом количестве обмоток требуется большой магнитопровод с большей шириной окна, что увеличит габариты балансировочных цепей.

В данном решении количество элементов одного модуля ограничивается максимально допустимым напряжением двунаправленного полупроводникового ключа, то есть до 60 В. При большем числе элементов транзисторы должны выбираться на больший класс напряжения, а это приведет к увеличению сопротивления открытого канала и, следовательно, к увеличению статических потерь транзисторов.

В табл. 1 приводится сравнение всех рассмотренных решений по нескольким параметрам.

Таблица 1

Сравнение решений выравнивания напряжения многоэлементной аккумуляторной батареи

Системы выравнивания напряжения	Параметры систем		
	КПД	Стоимость	Габаритность
Система активного балансирования с индивидуальными дросселями	Высокий	Высокая	Высокая
Система активного балансирования с многообмоточными дросселями	Высокий	Средняя	Средняя
Гибридная балансирующая система	Средний	Средняя	Низкая

Библиографический список

1. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 511-р от 03.11.2013.
2. ПТЭЭП. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Раздел 2. Электрооборудование и электроустановки общего назначения. Глава 2.10. Аккумуляторные установки.
3. **Nikolay Vkhorev**, Andrey Kurkin, Dmitriy Aleshin, Danil Ulyanov, Maksim Konstantinov, Andrey Shalukho. Battery Dynamic Balancing Method Based on Calculation of Cell Voltage Reference Value // *Energies*, Volume 16, Issue 9 (01.05.2023).

D.R. Misheneva, N.N. Vikhorev, K.A. Shirshin

ELECTROMAGNETIC SYSTEM OF ACTIVE BALANCING FOR MULTIPLE-CELL BATTERY

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

Abstract. The article discusses options for implementing a system of active battery cells balancing with minimized energy losses. Principal and structural diagrams are presented, as well as a description of the operating principles of multi-cell battery balancing. A circuit design for galvanically isolated control of a bidirectional semiconductor switch in an energy transfer circuit from an element to a balancing capacitor is proposed. A hybrid circuitry of an active balancing system combining electromagnetic and resistive parts is presented.

Key words: active balancing, multiple-cell batteries, high voltage batteries, galvanic isolation, driver, bidirectional switch.

References

- [1] Strategy for the development of the electric grid complex of the Russian Federation. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 511-r dated 03.11.2013.
- [2] Regulations of technical operation of electrical installations of consumers. Section 2. Electrical equipment and general-purpose electrical installations. Chapter 2.10. Battery installations.
- [3] Nikolay Vikhorev, Andrey Kurkin, Dmitriy Aleshin, Danil Ulyanov, Maksim Konstantinov, Andrey Shalukho. Battery Dynamic Balancing Method Based on Calculation of Cell Voltage Reference Value // Energies, Volume 16, Issue 9 (May-1 2023).

УДК 621.3.052

А.В. Серов¹, В.Г. Титов¹, И.В. Бобылев², М.В. Андрюхин²

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННОГО СИГНАЛА С АНАЛОГОВЫХ ДАТЧИКОВ

Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева¹
АО «ФНПЦ «Нижегородский научно-исследовательский
институт радиотехники»²

Аннотация. В статье рассмотрен способ формирования гальванически развязанного сигнала на примере датчика напряжения в среде схемотехнического моделирования Micro-Cap. Данная задача актуальна в импульсных преобразователях, где использованы быстродействующие ключи на базе карбида кремния или нитрида галлия, где в результате высоких значений dU/dt значительна величина синфазной емкостной помехи. Предлагается решение, позволяющее уменьшить уровень синфазной помехи, проникающей в систему управления.

Ключевые слова: датчик напряжения, синфазная помеха, гальваническая развязка, среда схемотехнического моделирования *Micro-Cap*.

Масштабирование аналоговых величин является важным элементом при проектировании схем импульсных преобразователей. Например, значение напряжения необходимо для организации обратной связи и/или защит в системе регулирования. В классическом варианте можно использовать датчик напряжения на элементах Холла с выходным сигналом в уровнях тока, пропорциональному измеряемому напряжению. Данное решение имеет недостатки в виде дополнительного питания ± 15 Вольт и достаточно длинной линии связи с системой управления на которую наводится синфазная помеха. В статье предложено решение для масштабирования уровней напряжения без использования специальных датчиков, при котором обеспечивается гальваническая развязка и защита от синфазной помехи. Все математические расчеты проводились в среде схемотехнического моделирования *Micro-Cap*.

Для моделирования всех трактов преобразования напряжений нужно реализовать в *Micro-Cap* следующую структурную схему (рис. 1).

Для задания силового напряжения используем источник идеального синуса амплитудой 150 В с постоянной составляющей 150 В, приведенный на рис. 2.

Далее с помощью резистивного делителя масштабируем напряжение звена постоянного тока с 300 В до 1,5 В. Первый операционный усилитель используется в режиме эмиттерного повторителя. Второй операционный усилитель масштабирует силовое напряжение 150 В в 1,5 В. Фрагмент схемы приведен на рис. 3.

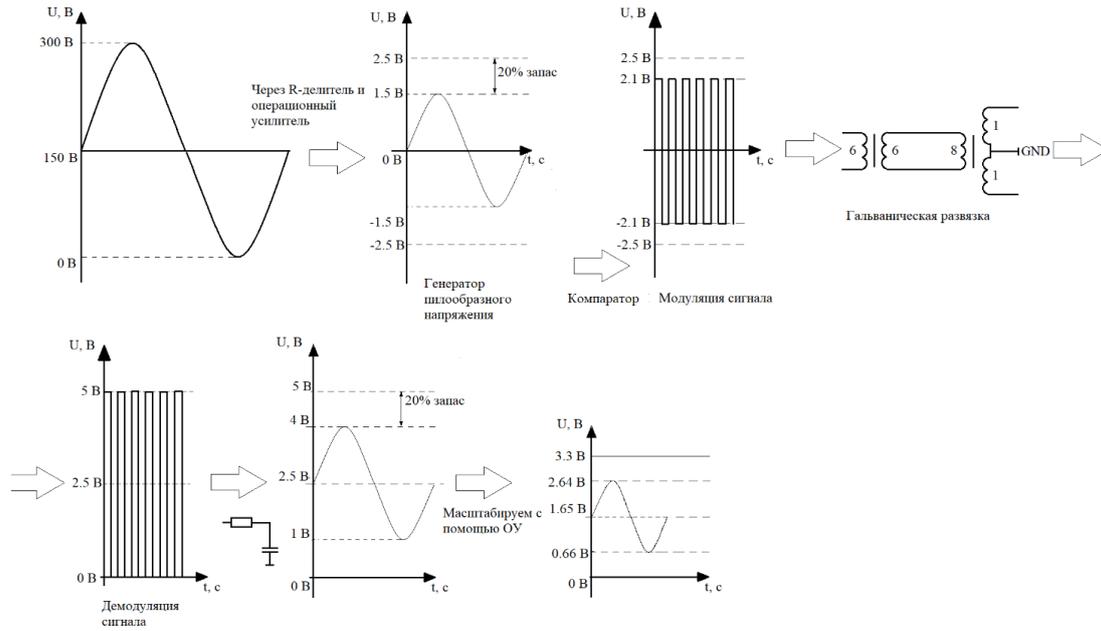
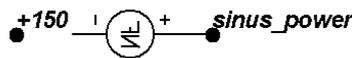


Рис. 1. Структурная схема преобразований

Формирование силового напряжения фазы



Задаем амплитуду силового напряжения 300 Вольт, с постоянной составляющей 150 Вольт

Рис. 2. Формирование силового напряжения

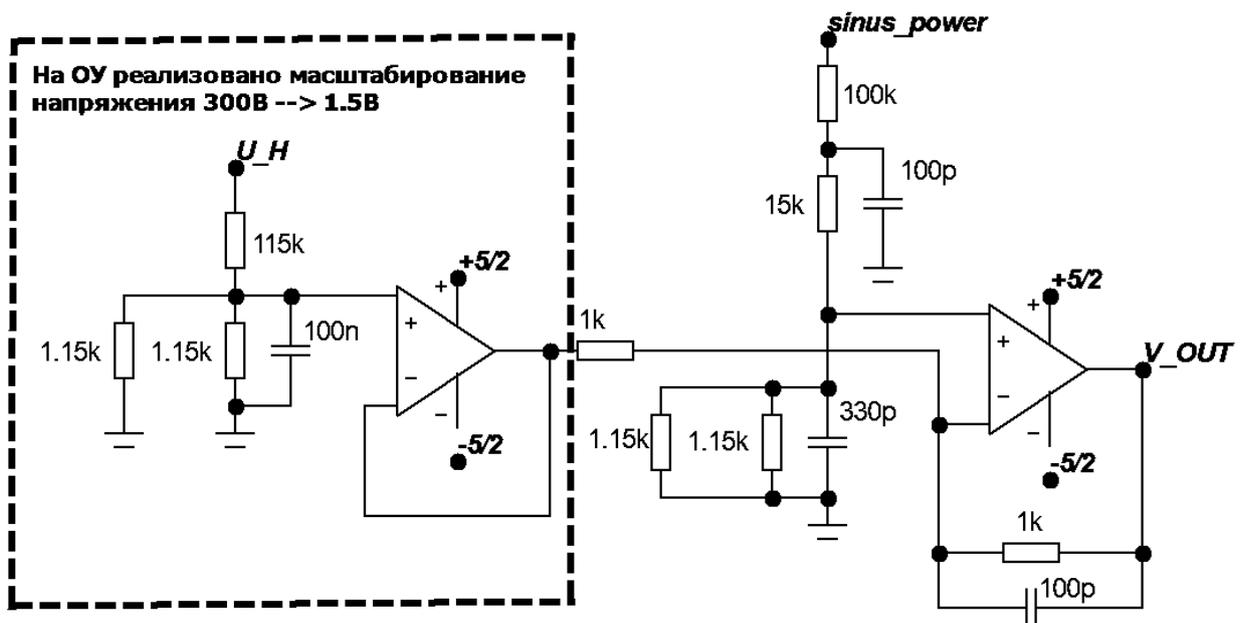


Рис. 3. Фрагмент схемы масштабирующие силовое напряжение

Генератор симметричной пилы реализован из источника импульсного сигнала, параметры которого приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Технические параметры источника импульсного сигнала

Обозначение	Содержание
$VZERO$	Начальное значение
$VONE$	Максимальное значение
$P1$	Начало переднего фронта
$P2$	Начало плоской вершины импульса
$P3$	Конец плоской вершины импульса
$P4$	Момент достижения уровня $VZERO$
$P5$	Период повторения

Временная диаграмма источника импульсного сигнала приведена на рис. 4.

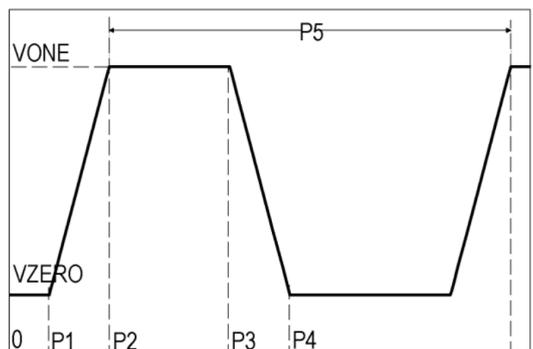


Рис. 4. Временная диаграмма источника импульсного сигнала

Для создания симметричного пилообразного напряжения частотой 1 МГц необходимо задать параметры $P1 = 0$, $P2 = P3 = 500$ нс, $P4 = 1$ мкс, $P5 = 1$ мкс, амплитуду $VONE$ и $VZERO$ установить ± 2.1 Вольт. Пилообразное напряжение должно быть немного выше синусоидального сигнала задания для того, чтобы при максимальных значениях обеспечивался запас по амплитуде.

Количественные значения источника пилообразного сигнала показаны на рис. 5.

Source: Local page 'Models'

P1	0	P2	500n	P3	500n
P4	1u	P5	1u	VONE	2.1
VZERO	-2.1				

Рис. 5. Параметры источника импульсного сигнала для задания пилообразного напряжения

Далее с помощью компаратора сравниваем сигнал задания с пилообразным напряжением. Полученные осциллограммы изображены на рис. 6. Стоит заметить, что ШИМ сигнал смещен на 5 единиц вверх.

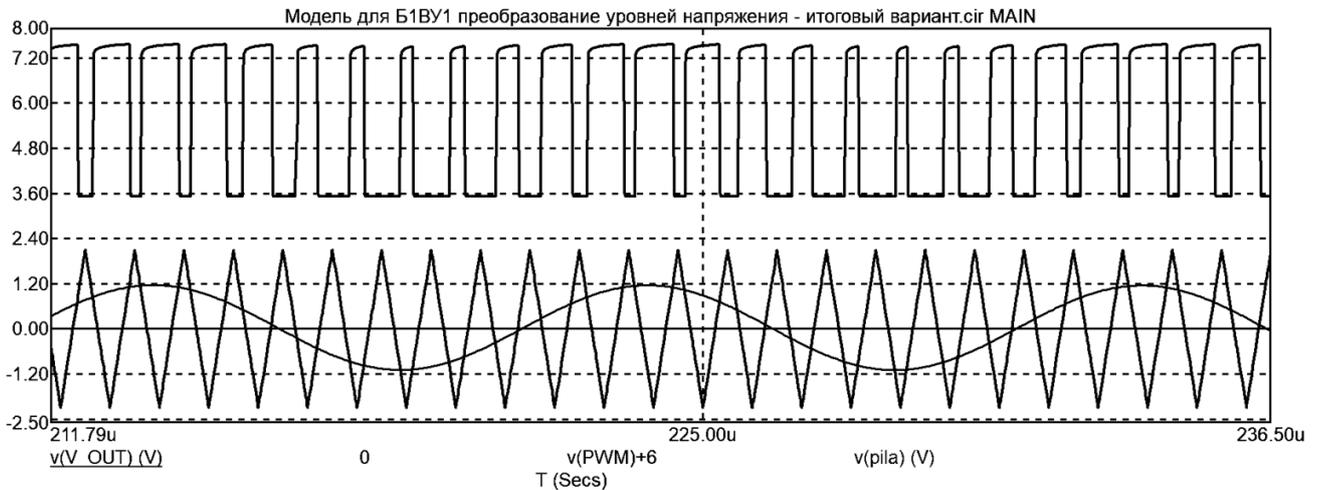
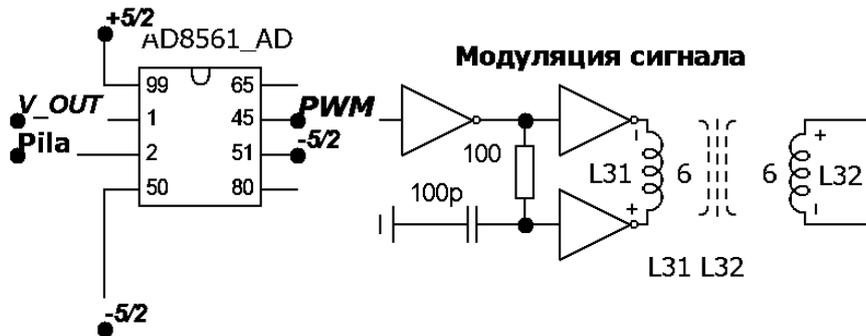


Рис. 6. Формирование двуполярной ШИМ

Согласно структурной схеме, с помощью двух трансформаторов необходимо преобразовать двуполярную ШИМ в однополярную. Демодуляция сигнала выполнена с помощью синхронного выпрямителя. Первый трансформатор выполняет функцию гальванической развязки сигнала. Количество витков на его первичной и вторичной обмотки равно в нашем случае 6. Фрагмент схемы приведен на рис. 7.

Компаратор для сравнения пилы с сигналом задания



Генератор симметричной пилы

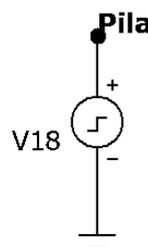


Рис. 7. Фрагмент схемы с модуляцией сигнала и гальванической развязкой

С помощью второго трансформатора формируем однополярную ШИМ с уровнем выходного сигнала 5 В. Количество витков на первичной обмотке

равно 8. Вторичная обмотка выполнена расщепленной по 1 витку. Средняя точка обмотки соединена с общей точкой схемы, в которую производится отвод тока помехи [2]. Фрагмент схемы показан на рис. 8.

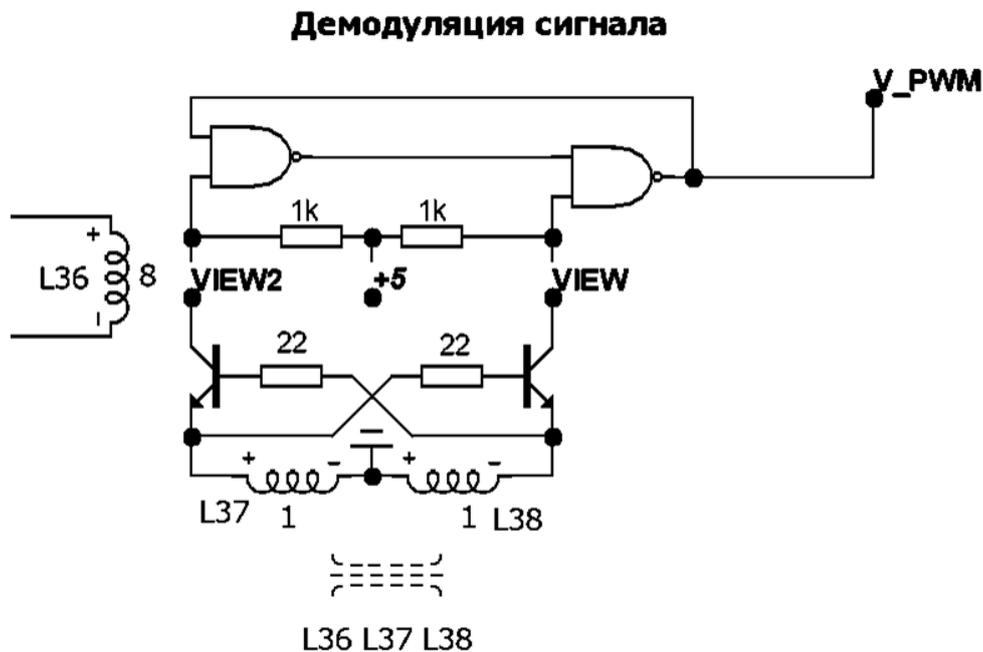


Рис. 8. Фрагмент схемы с демодуляцией сигнала

Однополярная ШИМ показана на рис. 9.

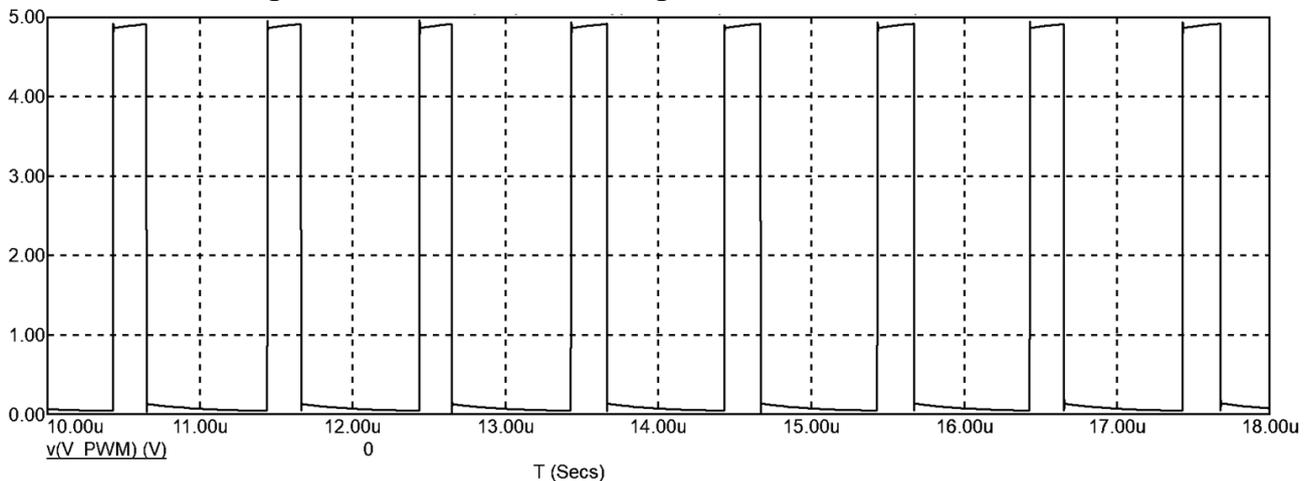


Рис. 9. Однополярная ШИМ, формируемая на выходе демодулятора сигнала

Далее необходимо сгладить выходной сигнал с помощью R-C фильтра и преобразовать к сигналу, которому можно подавать на АЦП микроконтроллера [3]. Уровень сигнала в амплитуде должен составлять 3.3 В. Стоит заметить, что середина диапазона составляет 1.65 В, что соответствует нулевому входному напряжению.

Фрагмент схемы для преобразования сигнала из 5 В в 3,3 В показан на рис. 10.

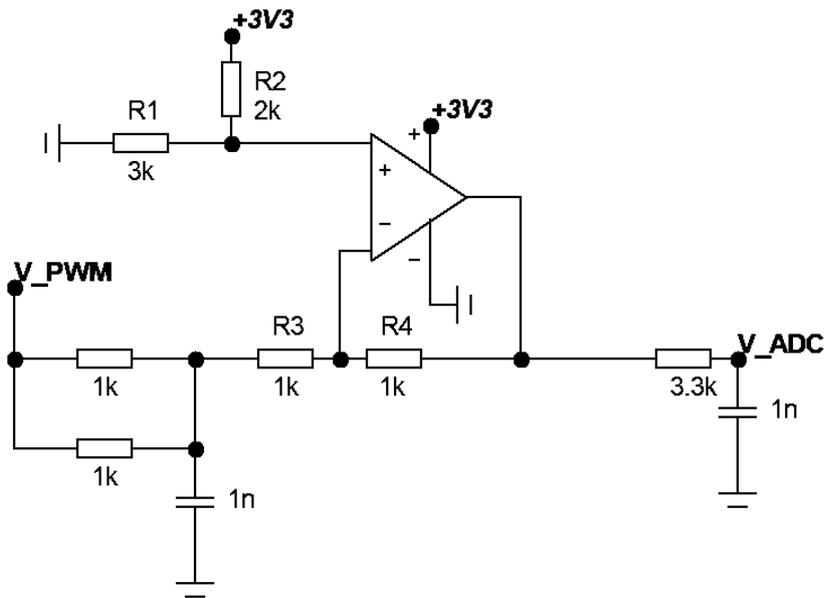


Рис. 10. Масштабирование уровней напряжения 5 В в 3.3 В

Формула для расчета выходного напряжения ОУ приведена далее [4].

$$V_{\text{ВЫХ}} = V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_3} \right) - V_2 \frac{R_4}{R_3} = \quad (1)$$

$$3,3 \frac{3 \cdot 10^3}{(3 + 2) \cdot 10^3} \left(\frac{(1,5 + 1) \cdot 10^3}{1,5 \cdot 10^3} \right) - 2,5 \frac{1 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 10^3} = 1,66,$$

где $V_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение операционного усилителя, В; V_1 – напряжение, прикладываемое к не инвертирующему входу, В; V_2 – напряжение, прикладываемое к инвертирующему входу, В.

Для наглядности выведем диаграммы напряжений с выхода операционного усилителя, масштабирующего силовое напряжение (синяя линия), с выхода демодулятора сигнала (красная линия) и итоговое напряжение (зеленая линия). Диаграммы работы схемы показаны на рис. 11. Стоит сказать, что V_{FILT} – это сигнал, который обозначен на схеме V_{PWM} , «пропущенный» через R-C фильтр для получения гладкой составляющей.

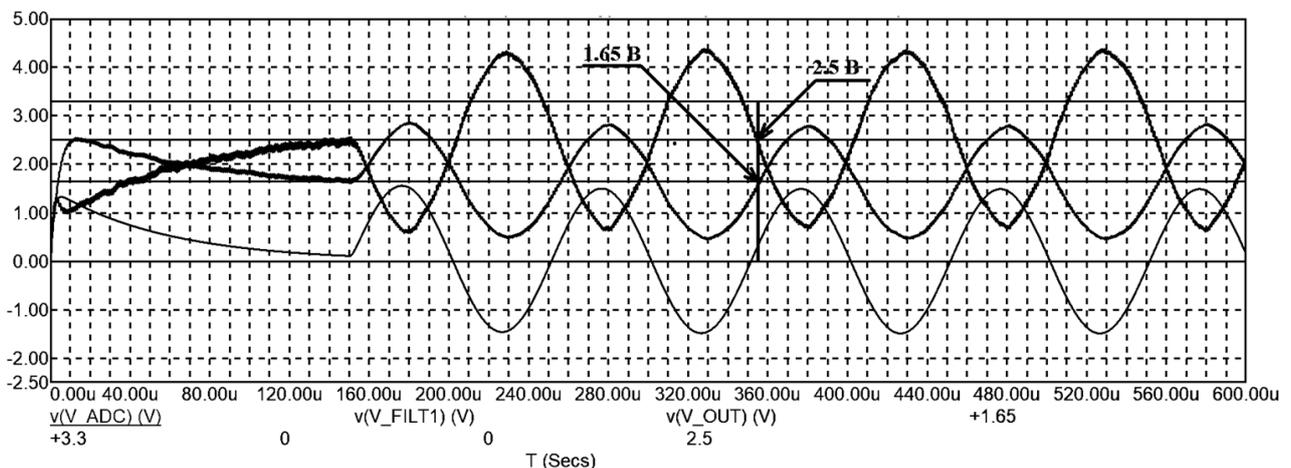


Рис. 11. Соотношение уровней напряжения схемы

Таким образом с помощью операционного усилителя мы преобразовали силовое напряжение в потенциал, который можно подавать на аналоговый вход микроконтроллера без использования датчика напряжения на элементах Холла. В дальнейшем планируется отработка данного схемного решения на реальном устройстве.

Библиографический список

1. **Амелина, М.А.**, Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. = Смоленский филиал НИУ МЭИ, Смоленск, 2013. = 618 с.
2. **Ваняев, В.В.** Преобразовательная техника: учеб. пособие / В.В. Ваняев; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. – 135 с..
3. Под ред. Уолта Кестера. Аналого-цифровое преобразование. Техносфера, Москва, 2007. – 1016 с.
4. Op Amps For Everyone: design reference / Ron Mancini, editor-in-chief. Burlington, USA, 469 pp.22.

A.V. Serov¹, V.G. Titov¹, I.V. Bobylev², M.V. Andryukhin²

FORMATION OF A GALVANICALLY ISOLATED SIGNAL FROM ANALOG SENSORS

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia¹

JSC Federal Research and Production Center Nizhny Novgorod Research Institute of Radio
Engineering²

Abstract. The article discusses a method for generating a galvanically isolated signal using the example of a voltage sensor in the *Micro-Cap* circuit modeling environment. This problem is relevant in pulse converters where high-speed switches based on silicon carbide or gallium nitride are used, where, as a result of high dU/dt values, the amount of common-mode capacitive interference is significant. A solution is proposed to reduce the level of common mode interference penetrating the control system.

Key words: voltage sensor, common mode interference, galvanic isolation, *Micro-Cap* circuit modeling environment.

References

- [1] M.A. Amelina., S.A. Amelin, “*Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap. Versiya 9,10 [Micro-Cap circuit modeling program. Version 9, 10]*”. – Smolensk branch of the National Research University MPEI. Smolensk, 2013, - 618 page (in Russian).
- [2] V.V. Vanyaev, “*Preobrazovatel'naya tekhnika [Conversation technology]*”. Study guide / V.V. Vanyaev; Nizhny Novgorod. state tech. University named after R.E. Alekseeva. - Nizhny Novgorod, 2020. - 135 page (in Russian).
- [3] Ed. Walt Kester. Analog-to-digital conversation. Technosphere, Moscow, 2007. – 1016 page (in Russian)
- [4] Op Amps For Everyone: design reference / Ron Mancini, editor-in-chief. Burlington, USA, 469 pp.22

УДК 621.314.1

К.А. Ширшин, Н.Н. Вихорев, Д.Р. Мишенева

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО КВАЗИРЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье предложен способ регулирования и стабилизации выходного напряжения квазирезонансного *LLC* преобразователя с возможностью «мягкой» коммутации силовых транзисторных ключей. Рассмотрены области применения квазирезонансных преобразователей, а также даны рекомендации расчета емкостного фильтра при отклонениях входного напряжения и стабилизированных выходных параметрах нагрузки для получения заданного качества выходного напряжения. Приведена имитационная модель силовой части и системы управления. Представлены достоинства и недостатки модели, а также дальнейшие рекомендации для оптимизации ее работы.

Ключевые слова: мягкая коммутация, квазирезонансный преобразователь, *LLC*, имитационное моделирование, способ управления, система управления.

В настоящее время энергетический сектор Российской Федерации претерпевает значительные изменения в рамках структурной диверсификации, углеродная энергетика дополнится не углеродной, централизованное энергоснабжение – децентрализованным, а совокупность отечественных энергетических ресурсов, технологий и оборудования способствуют значительному расширению спектра применений электроэнергии [1].

К технологиям, переводящим энергетику на новый технологический базис, к так называемому «энергетическому переходу», относятся:

- возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и накопители энергии;
- электромобили и гибридные автомобили;
- сетевые технологии, включающие активно-адаптивные сети и распределенную генерацию;
- энергоэффективные технологии в жилом, административном и коммерческом секторах.

В связи с развитием вышеперечисленных технологий, как правило, имеющих в своем составе одну или несколько аккумуляторных батарей (АКБ), обостряется вопрос эффективного преобразования одних параметров электрической энергии в другие.

Напряжение ячейки заряженного и разряженного аккумулятора может колебаться в широком диапазоне от 4,2 до 3 В [2]. Поскольку не все потребители энергии допускают изменения питания [3], электрическим преобразователям необходима функция стабилизации выходного напряжения, которую можно реализовать двумя подходами. Первый заключается о введении дополнительного

стабилизатора напряжения, который негативно влияет на КПД устройства, а второй подход состоит непосредственно в стабилизации напряжения самим преобразователем.

В настоящее время бурное развитие электротранспорта и возобновляемых источников энергии (ВИЭ), служит толчком для уменьшения массогабаритных параметров электрических устройств. Для решения спектра изложенных вопросов в качестве универсального преобразовательного звена предлагается использовать квазирезонансный *LLC* преобразователь.

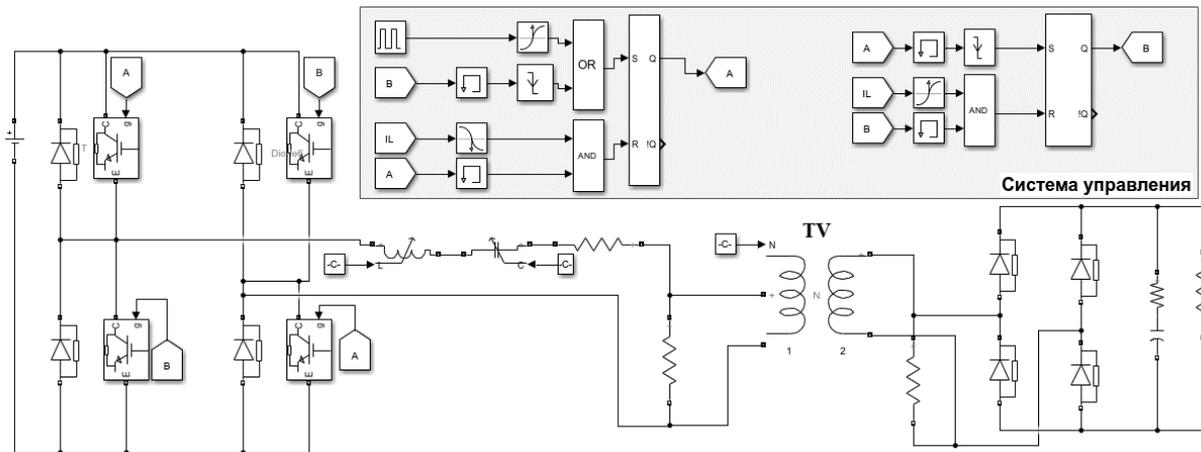


Рис. 1. Силовая часть и система управления *LLC* преобразователем

Типовым подходом к управлению *LLC* преобразователем является изменение выходного напряжения за счет регулирования длины импульса, проходящего через высокочастотный трансформатор *TV* (ШИМ). Такое решение в некоторых режимах работы может обладать рядом устранимых недостатков: постоянным подмагничиванием сердечника, искажением формы импульса, недоиспользованием трансформатора. При данном способе управления не всегда обеспечивается коммутация транзисторов в нуле тока, поэтому не достигается оптимального теплового режима работы. Потери на переключения, вызывающие нагрев кристалла силового полупроводникового ключа, значительны. В трансформаторе недопустимо наличие постоянной составляющей тока или напряжения. Предлагаемый способ регулирования выходного напряжения преобразователя обеспечивает симметричную работу диагоналей моста. Величина выходного напряжения регулируется при помощи изменения времени паузы t_p подачи импульсов управления (прерывистое число импульсов). Данный способ регулирования выходного напряжения *LLC* преобразователя позволяет устранить описанные негативные факторы, влияющие на трансформатор, а также обеспечить «мягкую коммутацию» транзисторов и увеличить частоту их работы, что в свою очередь позволит значительно снизить массогабаритные параметры устройства.

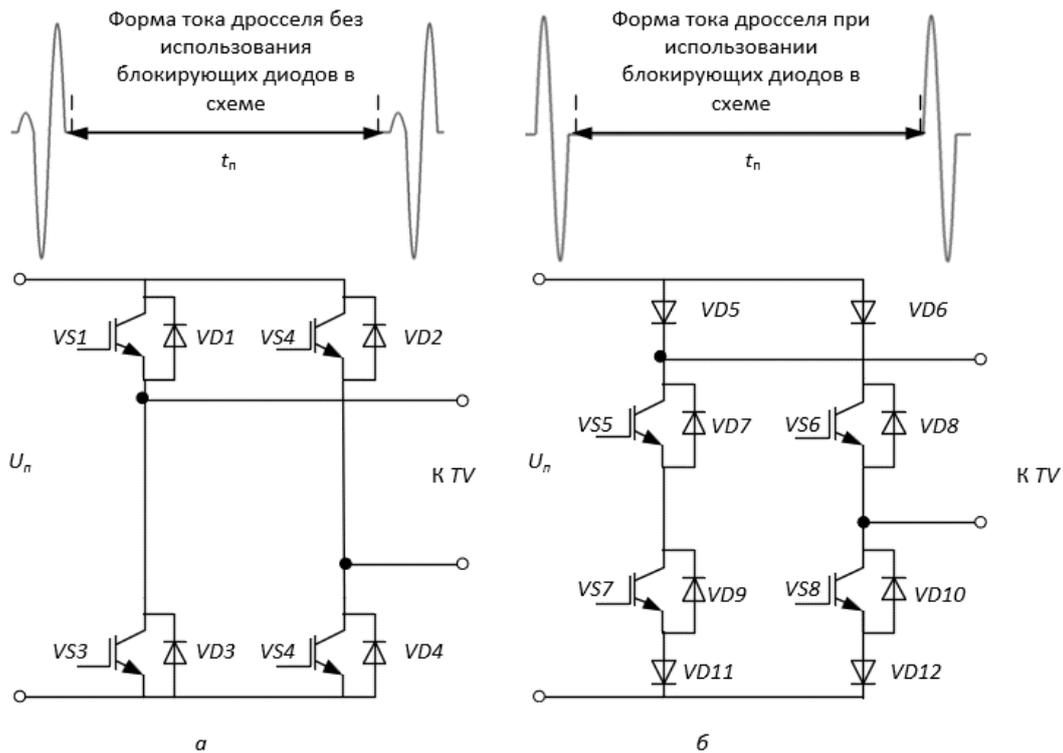


Рис. 2. Принципиальная схема инвертора напряжения и форма тока, проходящего через высокочастотный трансформатор: а) схема без блокирующих диодов, б) схема с блокирующими диодами

Таблица 1

Качество выходного напряжения при различном входном напряжении

$U_{вх}, В$	$U_{вых}, В$	R_H	$q \%$	$P, кВт$
300	393	160	1	1
300	350	125	7	1
300	306	90	14,5	1
300	280	80	31	1
400	376	160	28	1
400	350	125	37	1
400	300	90	50	1
400	280	80	70	1

При использовании в схеме блокирующих диодов обеспечивается наилучшее приближение формы тока, проходящего через трансформатор, к синусоидальной. Данное схемотехническое решение предпочтительно использовать для нагрузок небольшой мощности и невысокого напряжения питания из-за увеличенного напряжения на коммутирующей емкости. При увеличении входного напряжения предпочтительнее использовать схему без блокирующих диодов. Форма тока также близка к синусоидальной, явление самоиндукции в начальный момент времени создает небольшое нарастание тока, которое не оказывает негативного влияния на трансформатор (постоянная составляющая тока за период остается равной нулю). Для широкодиапазонного регулирования применяется более сложная схемотехника, которая снижает КПД и надежность устройства

вследствие увеличения количества полупроводниковых элементов. При регулировании и небольшом отклонении входного напряжения более оптимально применение предложенного решения с увеличенной емкостью выходного фильтра.

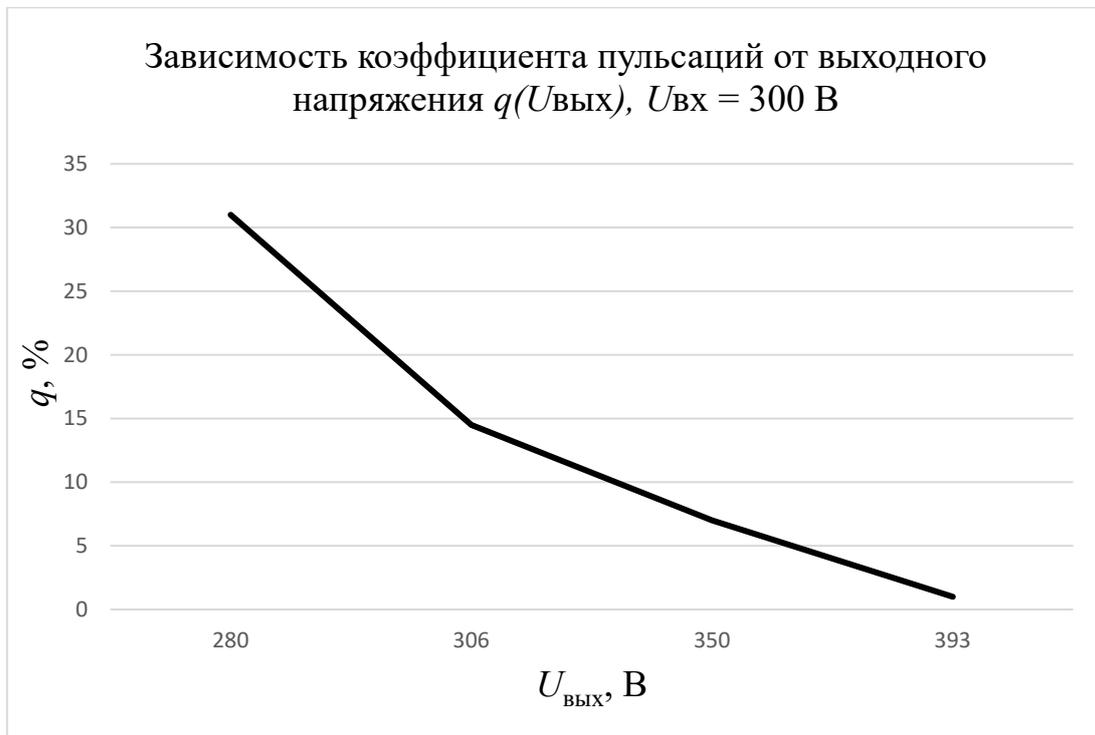


Рис. 3. Зависимость коэффициента пульсаций от величины выходного напряжения при постоянном входном напряжении 300 В

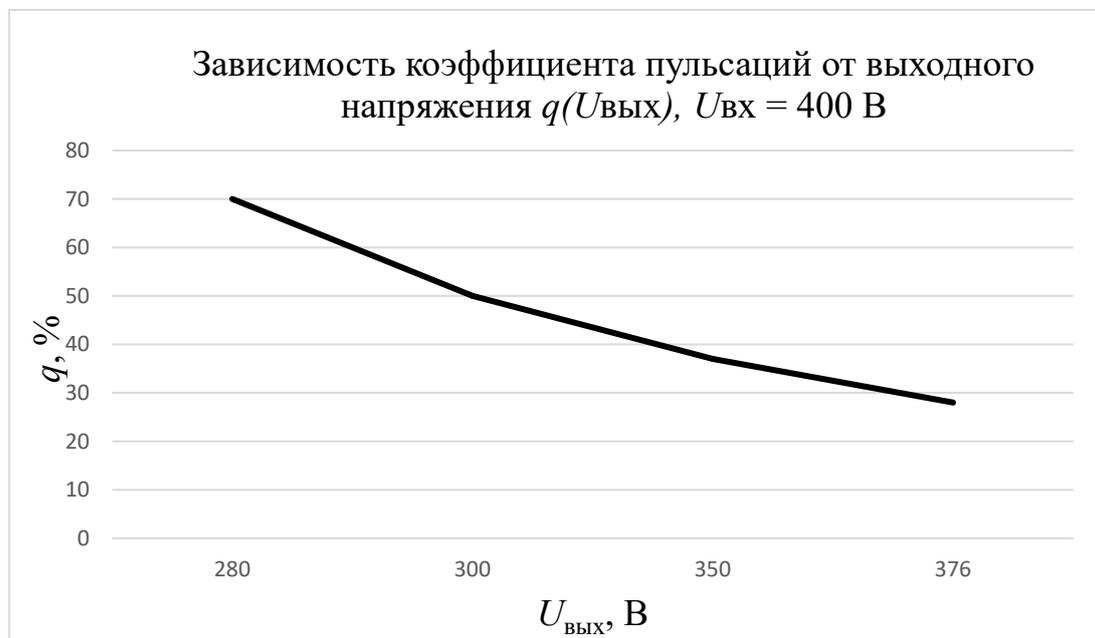


Рис. 4. Зависимость коэффициента пульсаций от величины выходного напряжения при постоянном входном напряжении 400 В

Определено, что напряжение 400 В батареи в процессе разряда может снижаться до 300 В. На рис. 3 и 4 представлена зависимость коэффициента пульсаций от выходного напряжения при входных 300 и 400 В соответственно. Выходной конденсатор (1 мкФ) выбирался таким образом, чтобы иметь наименьшее значение емкости и обеспечить коэффициент пульсаций менее 10%, для входного напряжения 300 В и наибольшего сопротивления 160 Ом.

Для расширения диапазонов регулирования фильтрующий конденсатор необходимо выбирать на наихудшие условия работы преобразователя (наибольший коэффициент пульсаций). В случае рассматриваемого способа регулирования, качество выходного напряжения *LLC* ухудшается вследствие увеличения пауз питания, что приводит к увеличению пульсаций выходного напряжения. Заданное качество напряжения нагрузки может быть достигнуто увеличением емкости выходного конденсатора, либо изменением типа выходного фильтра. С целью компенсации негативного влияния регулирования и достижения коэффициента пульсаций менее 10% во всем диапазоне выходных напряжений необходимо увеличить фильтрующий конденсатор в 3 раза до 3 мкФ.

Библиографический список

1. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 1523-р от 09.06.2020.
2. **Рязанов, Г. М.** Сравнение режимов работы различных типов литий-ионных аккумуляторных батарей // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы XII Национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 29–30 апреля 2021 года. – Саратов: ООО "Амирит", 2021. – С. 181-183.
3. **Гайдаш, Н. М.** Стабилизация напряжения в электрических сетях жилых домов / Н. М. Гайдаш, Д. А. Беловидов // Молодежь и системная модернизация страны : сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Курск, 19–20 мая 2020 года. Том 6. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 51-55.

K.A. Shirshin, N.N. Vikhorev, D.R. Misheneva

ANALYSIS OF THE OUTPUT VOLTAGE QUALITY OF AN ADJUSTABLE QUASI-RESONANT DC VOLTAGE CONVERTER

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

Abstract. The article proposes a method for regulating and removing the output voltage of a quasi-resonant *LLC* “converter” while maintaining “soft” switching of power transistor switches. The areas of application of quasi-resonant converters are considered, and recommendations are given for calculating a capacitive filter with input voltage deviations and stabilized output load parameters to obtain the specified quality of the output voltage. A simulation model of the power unit and control system is presented. The advantages and disadvantages of the model are presented, as well as further recommendations for optimizing its operation.

Key words: soft switching, quasi-resonant converter, *LLC*, simulation, control method, control system.

References

- [1] Strategy for the development of the electrical grid complex of the Russian Federation. Approved by order of the Government of the Russian Federation No. 1523-r dated 06/09/2020.
- [2] Ryazapov, G. M. Comparison of operating modes of various types of lithium-ion batteries / G. M. Ryazapov // Current problems of energy in the agro-industrial complex: Proceedings of the XII National Scientific and Practical Conference with international participation, Saratov, April 29–30, 2021 . – Saratov: Amirit LLC, 2021. – P. 181-183.
- [3] Gaidash, N. M. Voltage stabilization in electrical networks of residential buildings / N. M. Gaidash, D. A. Belovidov // Youth and systemic modernization of the country: a collection of scientific articles of the 5th International Scientific Conference of Students and Young Scientists, Kursk, 19 –May 20

Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.31

Е.В. Бычков, В.Л. Мельников

АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ВОДООТВЕДЕНИЯ В РЕЖИМЕ СИМУЛЯЦИИ *OWENLOGIC*

Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрен разработанный авторами программно-технический модуль имитационного моделирования алгоритмов работы системы водоотведения, функционирующей в автоматическом режиме. Приведена коммутационная схема модели. Описан алгоритм реализации различных сценариев функционирования, замкнутой *САР*. Разработаны графические элементы визуализации и управления.

Ключевые слова: программируемое реле, система программирования *OwenLogic*, имитация, режим симуляции, система автоматического регулирования.

Управление откачкой дренажных вод в автоматическом режиме – одна из ответственных технологических операций. Значительные скопления дренажных вод могут как возникать в силу естественных природных явлений, так и быть результатом деятельности человека. Высокое залегание грунтовых вод, изменчивый рельеф местности, изменение климата, искусственно созданные водоёмы, а также глубокие подземные сооружения, шахты, метрополитен – лишь небольшой перечень из того, что может послужить причиной накопления дренажных вод. Откачку дренажных вод необходимо производить незамедлительно и быстро, желательно в автоматическом режиме. Промышленно изготавливаемые дренажные станции имеют в своём составе системы управления, реализованные на основе микропроцессорной техники. Типовые алгоритмы управления откачкой дренажных вод могут быть реализованы также с применением программируемых реле. Например, программируемых реле *ОВЕН Пр200* и *Пр205* [1,2]. Среда программирования *OwenLogic* [3] имеет в своём составе инструмент симуляции. В режиме *ONLINE* отладки производится тестирование программы с реальными значениями сигналов на входах прибора. Имеется возможность выполнить проверку разработанного алгоритма и оценить влияние параметров системы регулирования на качественные и количественные характеристики технологического процесса. А также осуществить имитацию работы замкнутой системы автоматического регулирования.

В качестве демонстрационного примера в статье рассматривается следующий алгоритм работы станции (близкий к типовому алгоритму водоотведения). Функциональная схема установки представлена на рис. 1. При открытой входной

задвигке канализационные и сточные воды поступают в резервуар. Входная задвижка рассматривается исключительно в целях имитации дополнительных функций, возлагаемых на систему автоматического регулирования и увеличения количества моделируемых сценариев реализации технологического процесса. В реальных условиях может быть использована в аварийных режимах с целью водоотведения по другим резервным магистралям, предусмотренным в подобных ситуациях. В зависимости от уровня заполнения резервуара срабатывают соответствующие датчики уровня, которые запускают или останавливают насосы откачки дренажных вод. Работает либо один, либо два насоса одновременно. Все переключения сопровождаются световой индикацией. При достижении нижнего уровня заполнения резервуара включается первый насос. При достижении верхнего уровня заполнения резервуара дополнительно включается второй насос. Если при достижении аварийного уровня вода в резервуаре продолжает прибывать, а производительности насосов не хватает – такой режим считается аварийным. Срабатывает сигнализация, входная задвижка закрывается, насосы продолжают работать на осушение резервуара. Насосы работают до достижения уровня, при котором сработает датчик сухого хода. Резервуар полностью очищен от дренажных вод и готов к заполнению. Входная задвижка открывается. Дренажные воды начинают вновь поступать в резервуар. Уровень воды поднимается. Срабатывает сигнал датчика сухого хода, разрешающий работу насосов. Далее алгоритм работы повторяется.

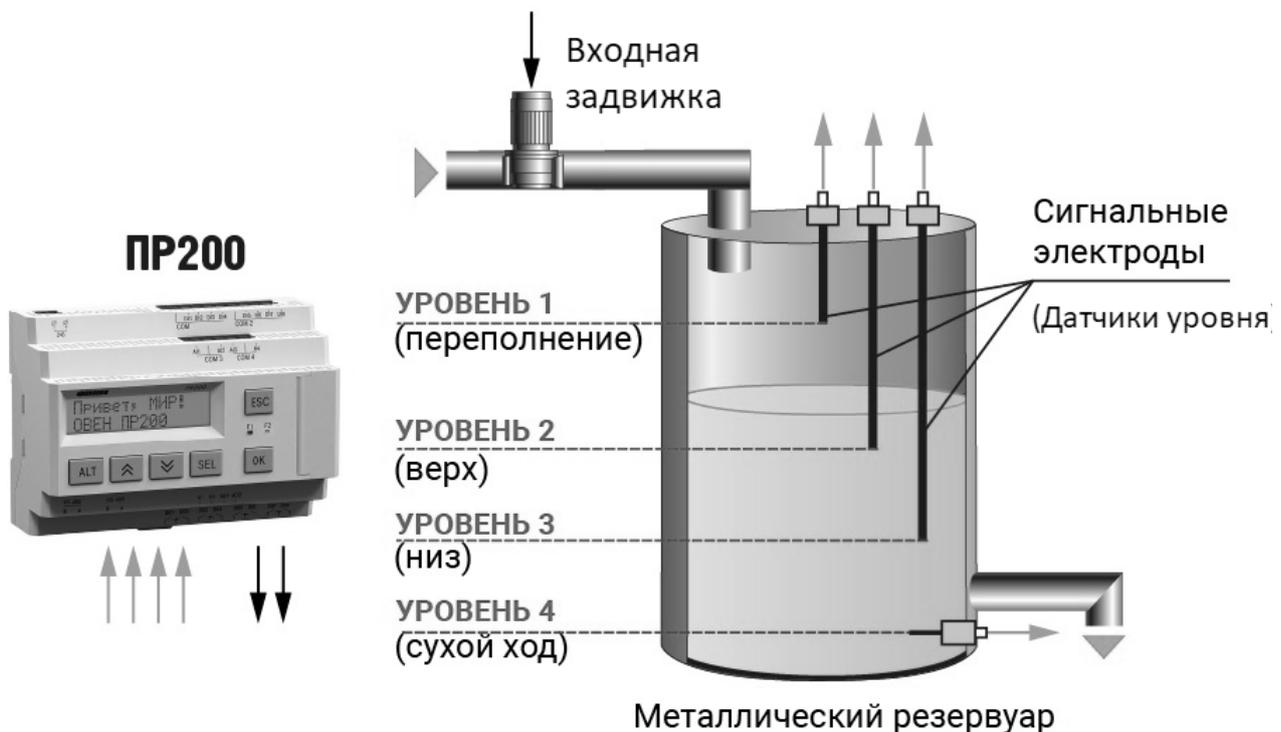


Рис. 1. Функциональная схема дренажной станции

Программируемое реле PR200 позволяет реализовывать различные алгоритмы управления откачкой дренажных вод. Для отладки разрабатываемых алгоритмов управления применяется режим симуляции. Управляющие сигналы с

выходов программируемого реле поступают на электрические и электромеханические преобразователи, которые непосредственно воздействуют на объект управления. Кроме управляющих имеются также и возмущающие воздействия, которые могут иметь как циклический (нагрузочные и технологические диаграммы), так и случайный характер (нештатные и аварийные режимы работы). Таким образом, в режиме симуляции очень важно технически достоверно имитировать реакцию объекта управления на управляющие и возмущающие воздействия. Распространённая практика – это имитация сигналов датчиков объекта с помощью потенциометров. Также потенциометры используют для генерации и изменения возмущающих факторов.

Средствами операционной среды *OwenLogic* можно создавать математические имитационные модели объектов управления и исполнительных механизмов. Использование подобных моделей совместно с апробируемыми алгоритмами управления позволяет разрабатывать модели замкнутых систем автоматического регулирования (*SAP*) и проводить имитационные вычислительные эксперименты и исследования. Для построения имитационных моделей используются математические функции сложения, вычитания и др. Их можно интерпретировать как сумматоры, интеграторы, накопители, которые могут воспроизводить с определённой степенью достоверности изменяющиеся во времени функции температуры, давления, влажности, уровня и др.

На рис. 2,3 представлены фрагменты коммутационной схемы алгоритма управления откачкой дренажных вод. Эта схема представляет собой математическую имитационную модель замкнутой *SAP*. В процессе функционирования такого программно-технического модуля имитируется процесс накопления дренажных вод, а также процесс их откачки путём последовательного подключения откачивающих насосов по мере поступления сигналов с датчиков уровня.

Центральным фрагментом коммутационной схемы является модель резервуара с водой (Накопитель). Накопитель представляет собой обычный сумматор, вычисляемый по выражению: $\text{Накопитель} = \text{Накопитель} + \text{Приток}$.

В каждом цикле выполнения программы контроллера величина Накопителя увеличивается на величину переменной Приток. Переменная Приток может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Это определяется соотношением: сколько воды поступает в резервуар (Темп Притока) и сколько воды в это же самое время откачивается насосом или группой насосов (в рассматриваемом варианте три насоса). Объём или количество воды, которое откачивается из резервуара, определяется мощностью насоса и числом одновременно работающих насосов (переменные Насос_1, Насос_12, Насос_123). Под мощностью насоса понимается некоторая абстрактная величина в условных единицах, представляющая собой эквивалент определённого объёма откачиваемой воды. Целочисленные переменные Темп притока и Ёмкость резервуара также измеряются в этих же условных единицах.

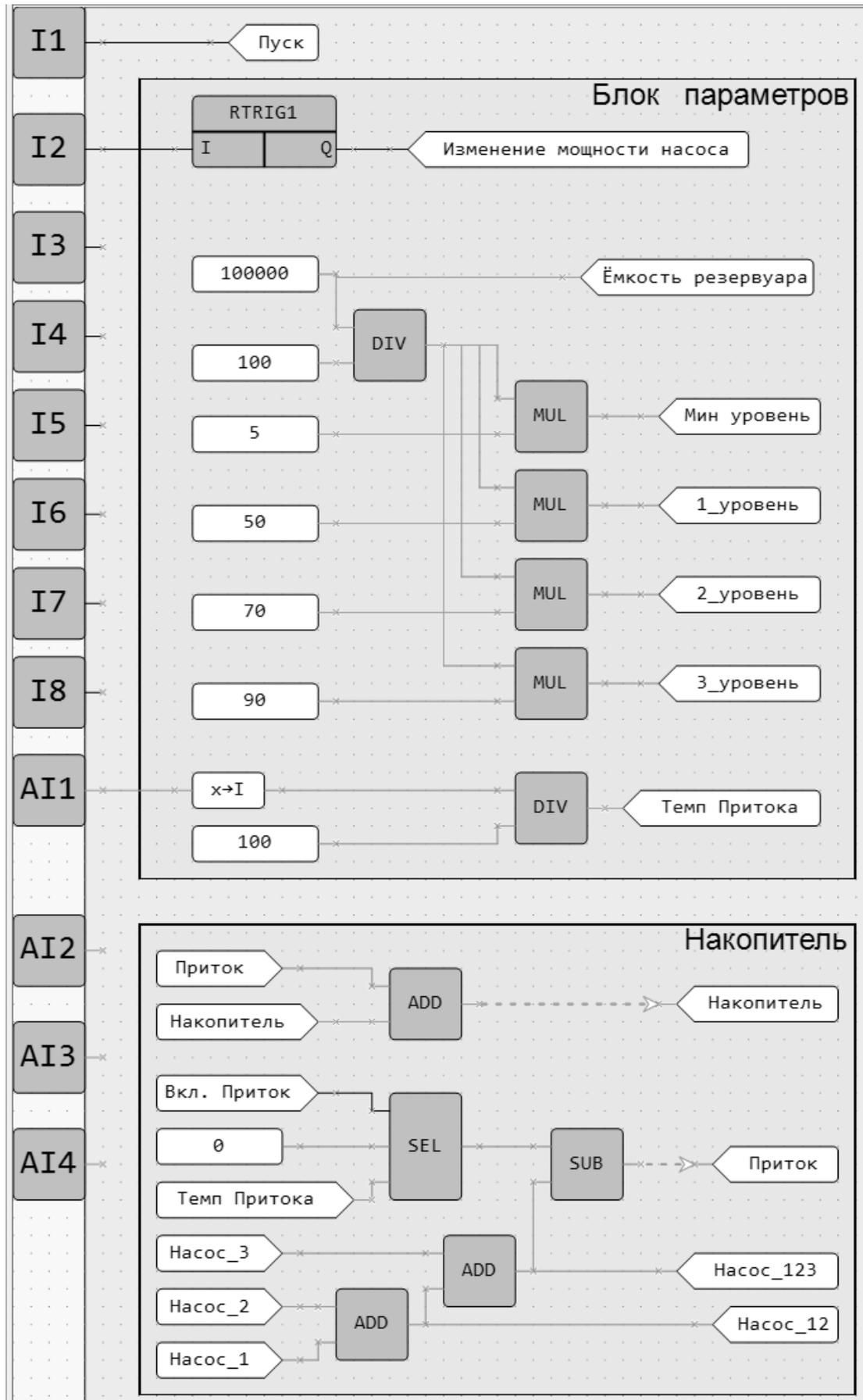


Рис. 2. Фрагмент №1 коммутационной схемы

Логическая переменная Вкл. Приток может принимать два значения: *true* – 1 и *false* – 0 и имитирует работу входной задвижки, регулирующей поступление воды в резервуар.

Нулевое значение логической переменной Вкл. Приток (задвижка закрыта) с помощью функции выбора *SEL* (тернарная условная операция) обнуляет темп притока. На выходе модуля *SEL* формируется нулевое значение. В результате целочисленная переменная Приток принимает отрицательное значение, равное количеству работающих насосов, умноженное на условную мощность каждого насоса. Это отрицательное значение Притока вычитается из переменной Накопитель. Объём воды в резервуаре в условных единицах начинает уменьшаться. На откачку работают все три насоса одновременно.

Таким образом, переменная Накопитель в зависимости от режима работы может изменяться от нулевого значения (резервуар пуст) до максимального значения, равного Ёмкости резервуара (в случае его переполнения в аварийном режиме), и наоборот.

Фрагмент схемы Блок параметров.

Количество воды, поступающей в резервуар в течение одного цикла расчёта, зависит от величины переменной Темп притока, то есть от скорости прибывающей в резервуар воды. Переменная Темп притока задаётся потенциометром и считывается с аналогового входа *AI1*. Делитель (блок *DIV*) предназначен для масштабирования входного сигнала. Необходимость масштабирования обусловлена тем, что выставить значение условной единицы, кратной десяткам или сотням Ом, тактильно проще, чем выставить условную единицу, равную 1 Ом. Это зависит и от номинального значения сопротивления, и от характеристики изменения сопротивления (линейная, логарифмическая и др).

Потенциометр выполняет функцию регулятора внутреннего сечения входной трубы в резервуар. Объём поступления дренажных вод в резервуар можно регулировать, увеличивая сопротивление (приоткрывая задвижку) и уменьшая сопротивление (закрывая задвижку, тем самым уменьшая проходное сечение трубы).

Ёмкость резервуара – целочисленная переменная, определяющая максимальную вместимость резервуара в условных единицах. Эта переменная используется для определения факта наступления аварии (то есть Перелива) в блоке сигнализации, а также вычисления уставок для выявления сухого хода и достижения различных уровней заполнения резервуара. Это переменные: Мин. уровень, 1-уровень, 2-уровень, 3-уровень. Уставки задаются в процентном соотношении к переменной Ёмкость резервуара. Числовое значение переменной Ёмкость резервуара также опосредованно влияет на длительность по времени процесса имитации полного цикла функционирования алгоритма управления откачкой дренажных вод.

Значение целочисленной переменной Мощность насоса можно задавать и изменять разными способами.

Самый простой – это присвоение значения с помощью блока константы.

Также переменную Мощность насоса можно задавать и изменять потенциометром и считывать, например, с аналогового входа *AI2*. Таким же образом, как это было сделано для переменной Темп притока.

Значение переменной можно изменять в ходе выполнения программы, используя экран и кнопки программируемого реле. На коммутационной схеме на дискретный вход *I2* подаётся управляющий сигнал. По переднему фронту управляющего сигнала срабатывает триггер *RTRIG1*. При этом изменяется значение логической переменной Изменение мощности насоса. По факту изменения этой переменной запускается соответствующий экран. На экран выводится численное значение редактируемой переменной Мощность насоса. В свойствах этой переменной обязательно необходимо отметить, что переменная может редактироваться. Для её отображения на экране отводится несколько числовых разрядов.

Для изменения значения переменной Мощность насоса следует:

Нажать кнопку *SEL*. Начнёт мигать самый младший разряд. С помощью кнопок  и  изменить значение в сторону увеличения или уменьшения. Если необходимо перемещаться по разрядам, то следует использовать комбинации кнопок *ALT* +  и *ALT* + .

Для сохранения измененного значения и перехода к следующему редактируемому элементу – нажать *SEL*. Для сохранения измененного значения и выхода из режима редактирования – нажать кнопку *OK*. Для сброса измененного значения в первоначальное состояние и выхода из режима редактирования следует нажать кнопку *ESC*.

Фрагмент схемы Блок сигнализации.

Если переменная Приток имеет положительное целочисленное значение, и задвижка открыта (переменная Вкл. Приток – имеет значение *true*), то на выходе элемента *AND* формируется сигнал логической единицы. Это означает, что вода в резервуаре прибывает. На выходе *Q4* появляется сигнал логической единицы. Если переменная Приток имеет отрицательное значение, то Притока нет. На выходе *Q5* появляется сигнал логической единицы. Загорается индикатор, что уровень воды в резервуаре не изменяется.

При достижении максимального уровня воды в резервуаре (переменная Накопитель становится больше, чем постоянная константа Ёмкость резервуара) формируется сигнал аварии (логическая переменная Авария изменяет значение на *true*).

Эта переменная поступает на *S* вход *RIS*-триггера. Инверсный сигнал с триггера сбрасывает в ноль переменную, отвечающую за включение притока (Вкл. Приток). В реальном объекте это соответствует закрытию задвижки и прекращению поступления дренажных вод в резервуар. То есть в случае перелива резервуара поступление воды в резервуар прекращается. В это же время сигнал с триггера запускает генератор импульсов (*BLINK1*). С интервалом в 1 с. генерируется мигающий сигнал (переменная – Сигнал Авария), который подаётся на выход *Q6*.

При снижении уровня воды в резервуаре ниже минимального (переменная Мин. Уровень), необходимого для работы насосов, генерируется сигнал Сухой ход (логическая единица). Этим сигналом сбрасываются в ноль триггеры, выдающие сигнал разрешения на включение насосов. Насосы отключаются.

Также сработает триггер *RTRIG2*, который отслеживает передний фронт переменной Сухой ход, а следом за ним триггер *RS1*. По сигналу триггера *RS1* сбрасывается Сигнал Авария и при наличии команды (переменной Пуск) вновь запускается алгоритм Накопителя. Переменная Вкл. Приток принимает значение логической единицы, что равноценно открытию задвижки на поступление воды в опорожненный резервуар. Система готова обрабатывать новый цикл накопления и осушения резервуара от дренажных вод в автоматическом режиме.

Фрагмент схемы Блок управления насосами.

В процессе функционирования алгоритма с помощью функции сравнения (*GT*) происходит сравнение фактического заполнения резервуара (переменная Накопитель) с назначенными значениями уставок (переменные: 1-уровень, 2-уровень, 3-уровень). Определяется факт достижения определённого уровня заполнения резервуара. Запускается соответствующий *RS2,3,4* триггер (на вход *S* триггера поступает сигнал логической единицы). На выходе *RS* триггера формируется разрешающий сигнал на включение насоса (логические переменные: Вкл. Насос_1, Вкл. Насос_2, Вкл. Насос_3). Насосы начинают работать.

С помощью функции выбора (*SEL*) происходит изменение целочисленных переменных: Насос_1, Насос_2, Насос_3. Для работающих насосов эти переменные приравниваются переменной Мощность насоса. Для неработающих насосов эти переменные обнуляются. Числовые значения Насос_1, Насос_2, Насос_3 используются в блоке Накопитель для расчёта числовых значений переменных Накопитель и Приток.

Отключение насосов происходит только по сигналу датчика сухого хода, то есть, когда резервуар будет пуст (на входы *R* триггеров *RS2,3,4* поступит сигнал логической единицы). Таким образом, если резервуар заполнен ниже самого нижнего 1-го уровня, то насосы отключены. Как только произойдёт включение насоса или насосов, то они будут работать до полной откачки резервуара. При этом, если будет наблюдаться интенсивное поступление дренажных вод, то количество работающих насосов будет увеличиваться.

Также в условных единицах задаётся переменная Мощность насоса. Принимается, что все насосы имеют одинаковую мощность. Задавая разные соотношения между Темпом Притока и Мощностью насоса, можно моделировать различные режимы функционирования алгоритма откачки дренажных вод. При этом ускоряется или замедляется время процесса, изменяется порядок включения и отключения насосов, отсутствует или имитируется аварийная ситуация.

Редактирование параметров и уставок функциональных блоков коммутационной схемы осуществляется с помощью элементов визуализации.

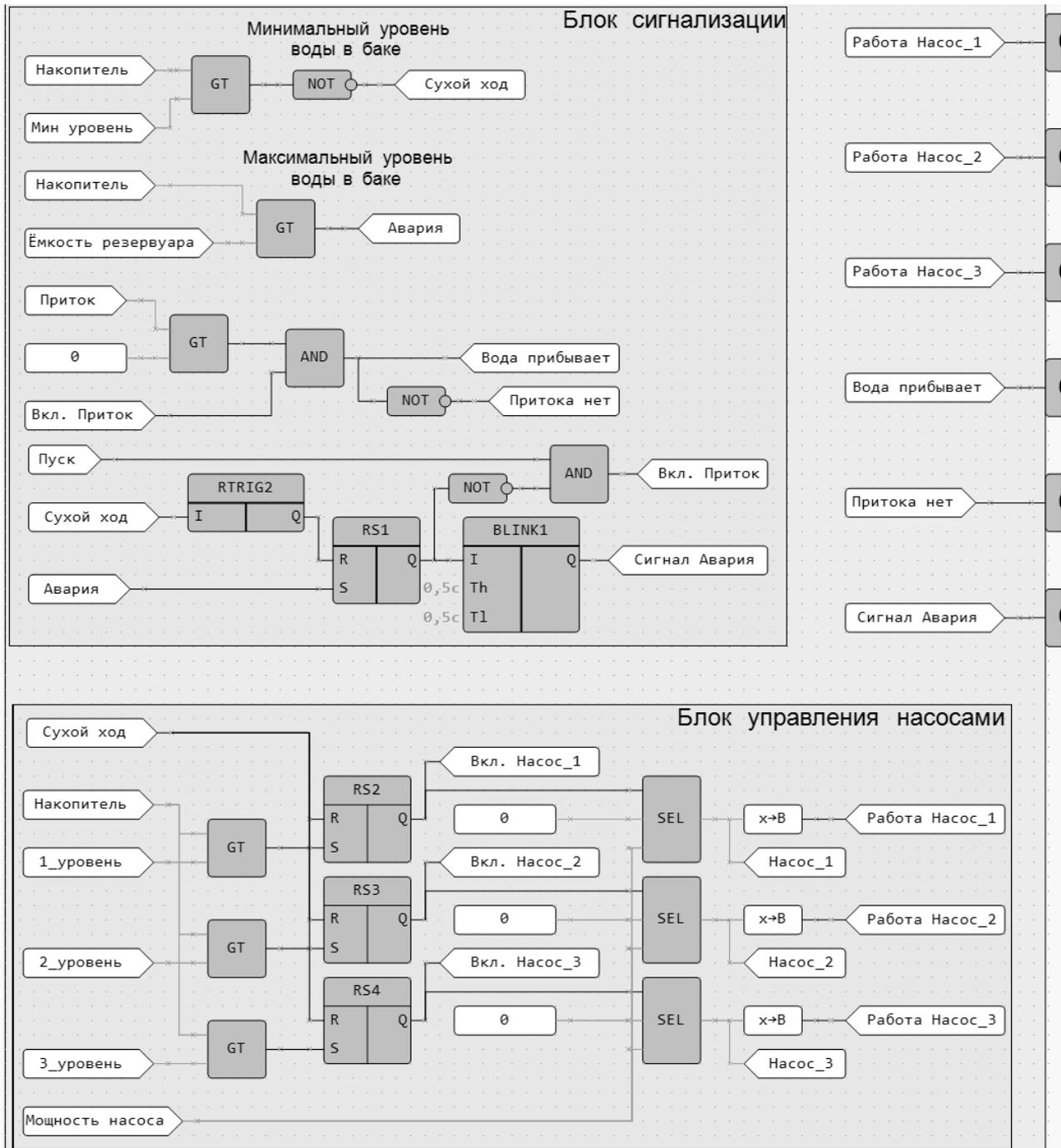


Рис. 3. Фрагмент №2 коммутационной схемы

С этой целью разработана группа экранов.

Переходы между экранами выполняются программным и аппаратным способами. В случае программного переключения назначаются соответствующие переменные логического типа, по факту изменения которых осуществляется смена экранов по заранее разработанному алгоритму.

Для аппаратного переключения используются кнопки программируемого реле. Во время создания переходов следует помнить, что приоритет отдается командам перехода на экран.

Назначение на кнопки  и  перехода на другой экран не позволяет пролистывать строки на текущем экране. Назначение на кнопку *SEL* перехода на другой экран не позволяет перейти в режим редактирования.

Для редактирования числовых значений уставок и переменных прежде всего необходимо создать и активировать экран, на который выводится редактируемая переменная. Можно создать один специальный экран для ввода группы уставок, параметров и переменных. При этом следует к двум имеющимся по умолчанию строкам экрана добавить необходимое количество строк. Переход к нужной строке и редактируемому параметру осуществляется нажатием на кнопки  и .

Также разработана коммутационная схема для программируемого реле Овен модификации Пр205. Для этого прибора в режиме симулятора доступна симуляция дисплея и кнопок прибора. Графический экран и элементы управления представлены на рис. 4.

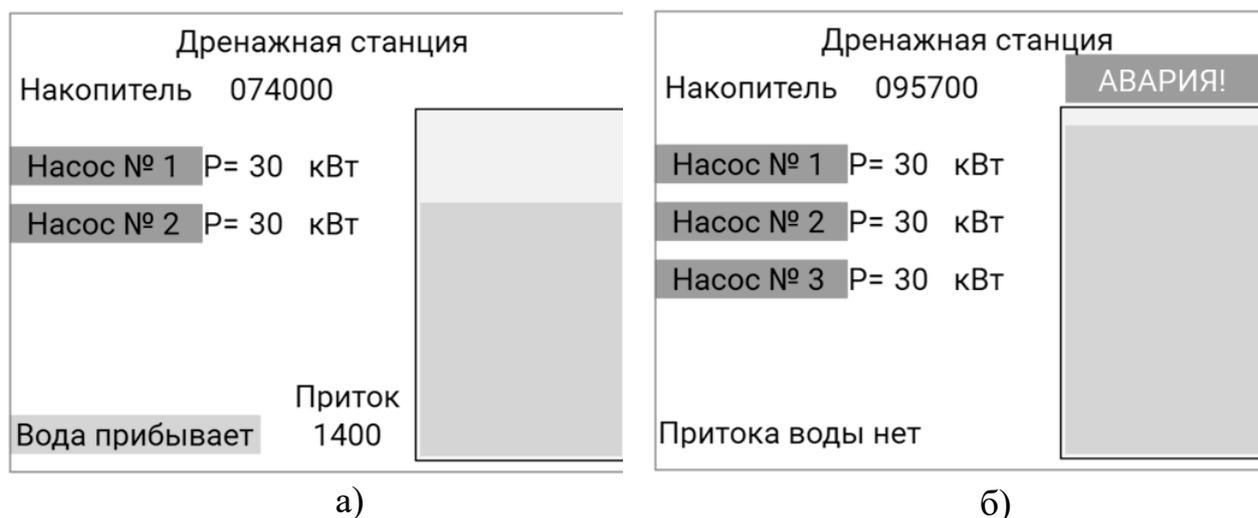


Рис. 4. Визуализация САР системы дренажа:

а) режим работы, б) режим аварии

Предложенная модель может быть использована в учебном процессе при изучении типовых алгоритмов автоматизации и систем автоматического регулирования.

Библиографический список

1. ПР200 Устройство управляющее многофункциональное, Руководство по эксплуатации, версия 1.72. https://owen.ru/product/pr200/documentation_and_software , Дата обращения 07.06.2024.
2. ПР205 Устройство управляющее многофункциональное, Руководство по эксплуатации, версия 1.16 <https://docs.owen.ru/product/pr205-programmiruемое-rele-s-graficeskim-displeem-i-ethernet/1116/86506#topic-86506> , Дата обращения 07.06.2024.
3. Среда программирования OwenLogic, версия 2.7, https://owen.ru/catalog/programmное_obespechenie_owen_logic, Дата обращения 07.06.2024.

E.V. Bychkov, V.L. Melnikov

APPROBATION OF DRAINAGE ALGORITHMS IN OWENLOGIC SIMULATION MODE

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

Abstract. The article presents the software and hardware module of simulation modeling of algorithms of the wastewater disposal system operating in automatic mode developed by the authors. The switching scheme of the model is given. The algorithm of realization of various scenarios of functioning of the closed ATS is described. Graphic elements of visualization and control are developed.

Key words: programmable relay, OwenLogic programming system, simulation, simulation mode, automatic control system.

References

- [1] PR200 Multifunctional control device, Operation Manual, version 1.72. https://owen.ru/product/pr200/documentation_and_software, Date of circulation 07.06.2024.
- [2] PR205 Multifunctional control device, Operation Manual, version 1.16 <https://docs.owen.ru/product/pr205-programmiruemoe-rele-s-graficeskim-displeem-i-ethernet/11116/86506#topic-86506>, Date of circulation 07.06.2024.
- [3] OwenLogic programming environment, version 2.7, https://owen.ru/catalog/programmoe_obespechenie_owen_logic, Date of address 07.06.2024.

УДК 621.3.078

А.Б. Дарьенков, А.Е. Храмов

**АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Разработана структура, математическая и имитационные модели адаптивного наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя. Полученная система оценки параметров электродвигателя позволяет определять полный спектр величин, необходимых для функционирования системы векторного управления электропривода на основе асинхронной машины. Наблюдатель индифферентен к изменениям параметров эквивалентной схемы замещения двигателя: активных сопротивлений статора и ротора. Указанные особенности разработанной системы определения состояния двигателя позволяют построить бездатчиковую систему векторного управления, адаптивную к изменениям активных сопротивлений статора и ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, система векторного управления, наблюдатель состояния электродвигателя, адаптивная система.

В настоящее время в Российской Федерации доля электрических приводов переменного тока в составе парка приводов производственных механизмов составляет около 68%, доля электрических приводов постоянного тока – 15%; доля приводов других типов (пневматические, гидравлические и др.) – 17% [1, 2]. При этом среди электрических приводов переменного тока преимущественное распространение получили электрические привода на основе асинхронного двигателя (АД) благодаря высокой надёжности, а также простоте конструкции и обслуживания двигателя.

Как правило, при невысоких требованиях к быстродействию асинхронного электропривода, отсутствии высоких динамических нагрузок применяется система управления приводом скалярного типа, которая основана на поддержании неизменного отношения питающего напряжения к частоте $U/f = const$. Такой алгоритм управления применяется, например, в электроприводах вентиляторов, насосов, где диапазон регулирования частоты вращения не превышает 1:10.

Современная промышленность характеризуется сложными технологическими процессами, которые требуют регулирования не только частоты вращения вала, но и момента. В отдельных случаях момент двигателя необходимо изменять в диапазоне околонулевых частот вращения вала двигателя [3, 4]. Скалярное управление не позволяет обеспечить качественное управление в этих случаях. Для таких применений уместно использование векторного управления частотой вращения вала АД. При векторном управлении снижается энергопотребление привода, что в сочетании с возможностями автоматизации технологических процессов способствует широкому распространению электроприводов с данным типом системы управления.

Наиболее перспективно применение бездатчиковых систем векторного управления (без датчиков на валу и внутри двигателя). Преимущества асинхронного электропривода с бездатчиковой системой векторного управления по сравнению с электроприводом на основе двигателя, оснащённого датчиками:

- более низкая стоимость и массогабаритные показатели;
- повышенная помехозащищённость.

Однако при реализации бездатчиковых систем векторного управления электропривода возникает существенная проблема, связанная с получением информации о текущей частоте вращения вала двигателя и других его параметрах. Решение проблемы заключается в разработке специальных алгоритмов, которые получили название наблюдателей состояния электропривода [5]. На основе информации о токах и напряжениях электродвигателя, получаемых с соответствующих датчиков, наблюдатель состояния рассчитывает оценку неизвестной переменной, например, частоты вращения вала двигателя или потокосцепления.

Недостатком существующих наблюдателей состояния АД является большая погрешность (более 20%) определения переменных его состояния (ток, частота вращения вала). Погрешность возникает вследствие неучёта изменения величин активных сопротивлений статора и ротора двигателя при нагреве. Активные сопротивления обмоток статора и ротора при нагреве могут увеличиваться на 50% и более [6]. Также большая погрешность расчёта переменных состояния наблюдателя возникает при работе двигателя в области низких частот вращения (менее 300 об/мин). Это связано с тем, что в данном диапазоне частот вращения ЭДС ротора мала, поэтому погрешность оценки частоты вращения возрастает до (35...40) %. Ввиду этого актуальным является разработка наблюдателя состояния с адаптивным алгоритмом, который будет с допустимой точностью (не более 3%) вычислять активные сопротивления статора и ротора во всём диапазоне изменения их температуры, а также проводить оценку неизмеряемых переменных состояния (потокосцепление, частота вращения вала АД) во всём диапазоне частот вращения вала двигателя.

Известно достаточно большое количество работ по разработке наблюдателей состояния электродвигателей. Так, авторы исследования [7] спроектировали наблюдатель состояния на основе адаптивной системы с эталонной моделью. При таком принципе построения модель цепи статора является задающей, а модель ротора – подстраиваемой. Отличительная особенность данного алгоритма – способность рассчитывать зависимость активного сопротивления ротора в зависимости от изменения частоты скольжения ω_s . При уменьшении скольжения от 1 до 0,15, рассчитанное наблюдателем значение сопротивления увеличивается, как правило, в 1,5 раза по отношению к начальному значению при пуске двигателя, а при уменьшении скольжения от 0,15 до 0 – в 5...7 раз. При этом погрешность оценивания наблюдателем частоты вращения ротора ω_R находится в пределах от 6,33% до 9,43%. Существенным недостатком рассмотренного решения также является отсутствие возможности учитывать изменение величины активных сопротивлений обмоток статора R_S и ротора R_R при их нагреве. Модель цепи статора, используемая в данном методе, определяется выражением (1)

$$\vec{\Psi}_R^{est(u)} = \frac{L_R}{L_m} \cdot \left(\int_0^t (\vec{U}_{1s} - R_S \cdot \vec{I}_S) \cdot dt - \sigma \cdot L_S \cdot \vec{I}_S \right), \quad (1)$$

где L_R – индуктивность ротора, Гн;

L_m – индуктивность намагничивания, Гн;

\vec{U}_{1s} – вектор напряжений статора, В;

\vec{I}_S – вектор токов статора, А;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S \cdot L_R}$ – коэффициент индуктивных потерь (рассеяния), Гн;

L_S – индуктивность статора, Гн.

Поскольку (1) включает операцию интегрирования, погрешность, вносимая параметрами правой части этого равенства, будет приводить к накапливающейся ошибке. В этом случае работа наблюдателя будет нестабильной и характеризоваться значительными погрешностями (свыше 60%). Данный недостаток отсутствует у наблюдателей на основе алгоритмов Калмана и Люенбергера.

Анализ точности оценок неизмеряемых переменных состояния АД в наблюдателях на основе алгоритмов Калмана и Люенбергера при наличии шумовой составляющей в каналах измерения токов статора двигателя был проведён в исследовании [8], согласно которому наибольшие относительные ошибки оценивания возникают в пусковом режиме работы электропривода. Так, при пуске АД до номинальной частоты вращения двигателя, ошибка её оценивания в бездатчиковой системе векторного управления при использовании наблюдателя Люенбергера составила 22,86%, а при использовании фильтра Калмана – 5,69%. В остальных режимах работы привода (работа на номинальной частоте вращения ω_n , уменьшение частоты вращения от номинальной до 0) наблюдатель на основе фильтра Калмана вычислял величину частоты вращения двигателя с погрешностью от 0,27 до 2,00 %. Ошибка оценки наблюдателя на основе алгоритма Люенбергера составила (0,89...4,10) %.

Однако алгоритмы работы рассмотренных наблюдателей не учитывают изменения активных сопротивлений R_S и R_R при их нагреве, что приводит к существенным погрешностям в определении частоты вращения двигателя [9, 10]. Так, в [9] было выявлено, что наблюдатель Люенбергера при изменении сопротивлений статора и ротора в пределах $\pm 90\%$ работает с погрешностью оценки частоты вращения двигателя (12...16) %. В действительности же, во время работы АД его активные сопротивления R_S и R_R при нагреве могут изменяться в два раза [6]. В этих условиях алгоритм Люенбергера будет неработоспособен.

Для исключения влияния изменения активных сопротивлений обмоток двигателя на работу наблюдателя в структуру системы векторного управления дополнительно должен быть включён идентификатор параметров R_S и R_R двигателя, вычисляющий их точные значения независимо от температуры нагрева. В статье [11] представлен способ идентификации активного сопротивления статора АД путём его вычисления с использованием значений обобщённого вектора

ЭДС и статорного тока двигателя. В установившемся режиме работы привода погрешность оценки частоты вращения составляет 6,65%, а сопротивления статора – 4,3%. Однако такой алгоритм неработоспособен при малых частотах вращения двигателя (0...315 об/мин). В этом случае идентификация R_S производится с ошибкой 18%, что увеличивает погрешность оценки частоты вращения до 35%.

Другой вариант построения идентификатора параметров АД предложен в работе [12]. Здесь определение активных сопротивлений двигателя производится с применением цифровой модели АД, которая позволяет при частотах вращения ниже $0,5 \cdot \omega_R$ оценивать R_S и R_R двигателя с погрешностью не более 4%. Недостатком такого метода идентификации активных сопротивлений является заметное снижение точности определения потокосцепления и частоты вращения двигателя (погрешность более 23%) при частотах вращения более $0,5 \cdot \omega_R$, что вызвано влиянием искажения синусоидальной формы его статорных токов и напряжений.

С целью преодоления изложенных недостатков авторами разработан адаптивный наблюдатель состояния АД, отличительной особенностью которого является то, что оценки неизмеряемых величин (частота вращения ротора ω_R , потокосцепление Ψ_R и угол поворота потокосцепления $\theta_{\Psi R}$) не зависят от изменения активных сопротивлений обмоток статора и ротора. Структурная схема системы векторного управления АД с адаптивным наблюдателем состояния представлена на рис. 1.

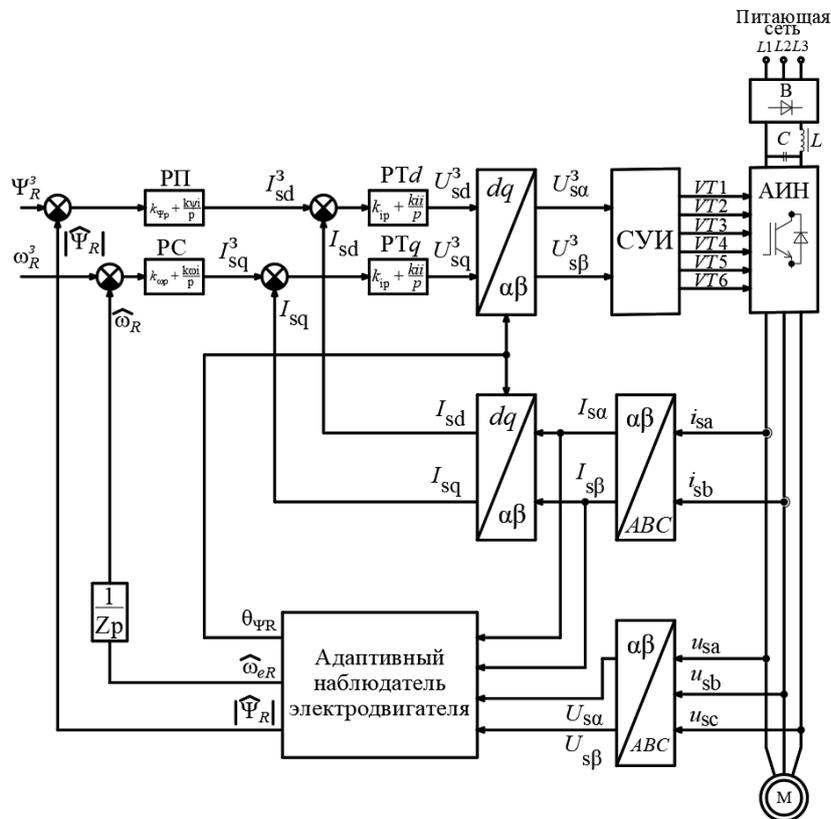


Рис. 1. Структурная схема системы векторного управления АД

РП – регулятор потока; РС – регулятор скорости; РТd, РТq – регуляторы тока по осям dq; СУИ – система управления инвертором; В – выпрямитель; АИН – автономный инвертор напряжения; I_{sd} , I_{sq} , U_{sd} , U_{sq} – токи и напряжения статора по осям d-q; I_{sa} , I_{sb} , U_{sa} , U_{sb} – токи и напряжения статора по осям α-β

Согласно рис. 1, система векторного управления построена по принципу ориентации по вектору потокосцепления ротора. На основе информации с датчиков тока и напряжения АД производится оценка проекций вектора потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_R$ на оси α и β – $\hat{\Psi}_{R\alpha}$, $\hat{\Psi}_{R\beta}$. Знак «^» характеризует оценочную величину. При таком способе управления уравнения АД рассматриваются не в стационарной системе координат Кларка, а во вращающейся, которая ориентирована по вектору потокосцепления ротора (система координат Парка – Горева). Эту систему координат обозначают d - q . Ось q задаёт моментобразующий ток статора i_{sq} , т.к. он перпендикулярен потокосцеплению Ψ_R , а ось d задаёт ток $\vec{i}_{sd} \uparrow \vec{\Psi}_R$. При таком математическом описании АД все его основные переменные (токи, напряжения) изменяются не по синусоидальному, а по стационарному закону – как в двигателе постоянного тока. Поэтому система векторного управления АД строится по принципу подчинённого регулирования, как и для двигателя постоянного тока. Ориентация вращающейся системы координат d - q по вектору $\vec{\Psi}_R$ и стабилизация потокосцепления $\Psi_R = const$ делает механическую характеристику АД линейной, подобно характеристике двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В результате возможно создание двух независимых каналов регулирования: канала регулирования момента АД и канала регулирования потокосцепления ротора. Для правильной ориентации системы координат d - q необходима информация об угле поворота вектора потокосцепления ротора $\theta_{\Psi R}$.

Адаптивный наблюдатель построен на основе модели электромагнитных процессов АД, которая в матричной форме имеет вид (2)

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \cdot x = A \cdot x + B \cdot \vec{U}_s, \\ y = C \cdot x, \end{cases} \quad (2)$$

где x – матрица переменных состояния электродвигателя;

A – матрица состояния объекта;

B – матрица коэффициентов связи;

\vec{U}_s – вектор напряжения статора;

y – матрица доступных измерений;

C – матрица выхода.

Адаптивный наблюдатель вычисляет оценки неизмеряемых величин в соответствии со следующими выражениями (3-5):

$$|\hat{\Psi}_R| = \sqrt{(\hat{\Psi}_{R\alpha}^R)^2 + (\hat{\Psi}_{R\beta}^R)^2}, \quad (3)$$

$$\hat{\theta}_{\Psi R} = \text{arctg} \left(\frac{\hat{\Psi}_{R\beta}^R}{\hat{\Psi}_{R\alpha}^R} \right), \quad (4)$$

$$\hat{\omega}_{eR} = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) \cdot (\hat{\Psi}_{R\alpha}^R \cdot \hat{\Psi}_{R\beta}^S - \hat{\Psi}_{R\beta}^R \cdot \hat{\Psi}_{R\alpha}^S), \quad (5)$$

где $\hat{\Psi}_{R\alpha}^R, \hat{\Psi}_{R\beta}^R$ – оценки составляющих вектора потокосцепления ротора по осям α и β ;

$\hat{\omega}_{eR}$ – оценка электрической частоты вращения ротора;

k_p – коэффициент пропорциональной части регулятора;

k_i – коэффициент интегральной части регулятора.

В структуру наблюдателя интегрирован идентификатор активных сопротивлений статора и ротора АД. Разработанная система оценки параметров и координат двигателя представлена на рис. 2.

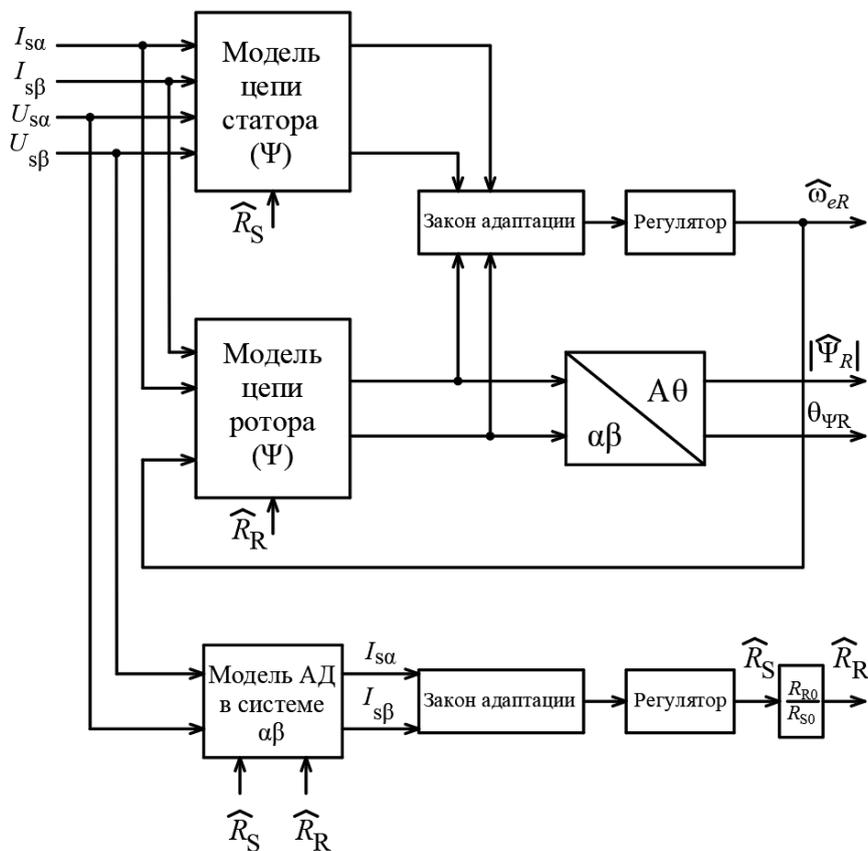


Рис. 2. Структурная схема адаптивного наблюдателя АД

Закон адаптации оценок потокосцепления, частоты вращения двигателя к изменению активного сопротивления статора реализован на основе пропорционально – интегрального регулятора (6)

$$\hat{R}_S = A_{\hat{R}_S} \cdot \int (\Delta \hat{I}_{S\alpha} + \Delta \hat{I}_{S\beta}) \cdot dt, \quad (6)$$

где $A_{\hat{R}_S}$ – коэффициент настройки;

$\Delta \hat{I}_{S\alpha}, \Delta \hat{I}_{S\beta}$ – результирующие оценки токов статора.

Для исследования разработанной системы векторного управления с адаптивным наблюдателем состояния разработана имитационная модель в среде *MatLab Simulink*, представленная на рис. 3.

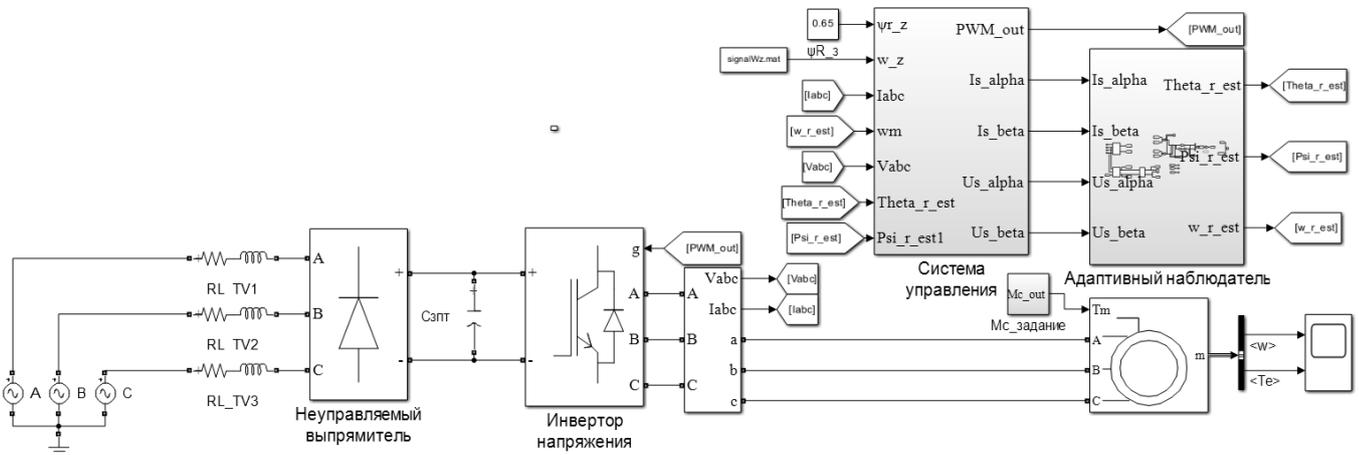


Рис. 3. Имитационная модель системы векторного управления АД с адаптивным наблюдателем

Для исследования работы системы векторного управления АД (рис. 3) посредством моделирования были выбраны следующие режимы:

- пуск двигателя до частоты вращения 100 рад/с (частота вращения холостого хода двигателя составляет 104,7 рад/с (1000 об/мин));
- наброс нагрузки $M_C = 2$ Н·м;
- реверс двигателя;
- останов двигателя.

Указанные этапы работы электропривода отражает рис. 4. Результаты сравнения оценок модуля потокосцепления $|\hat{\Psi}_R|$ и частоты вращения АД $\hat{\omega}_R$ с реальными величинами $|\Psi_R|$ и ω_R представлены на рис. 5 и рис. 6.

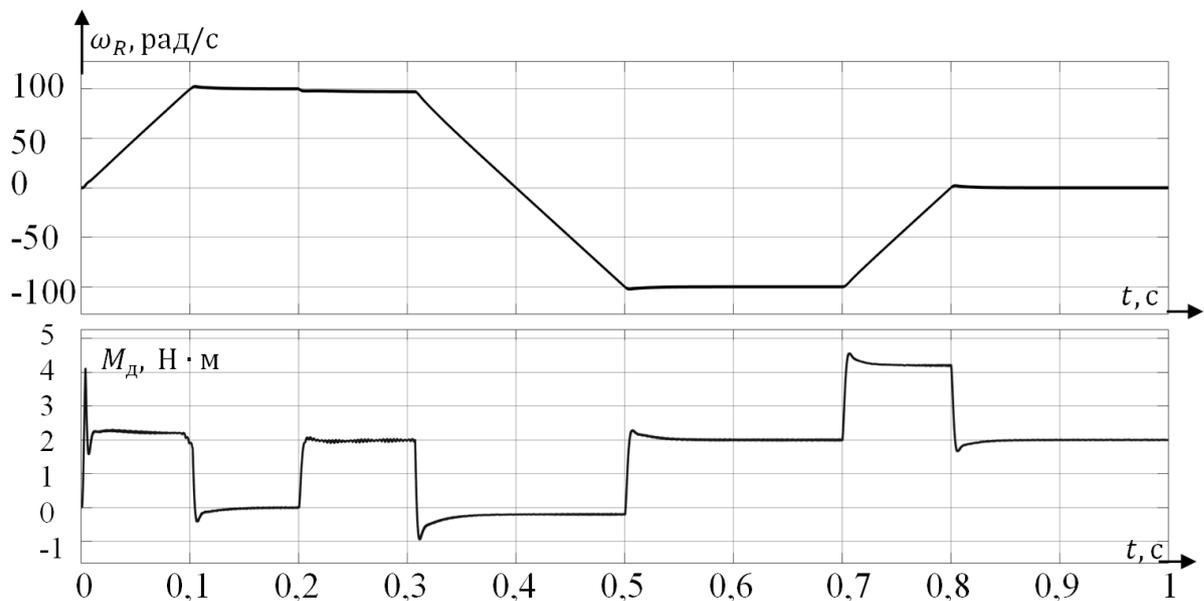


Рис. 4. Диаграммы работы электропривода на основе АД

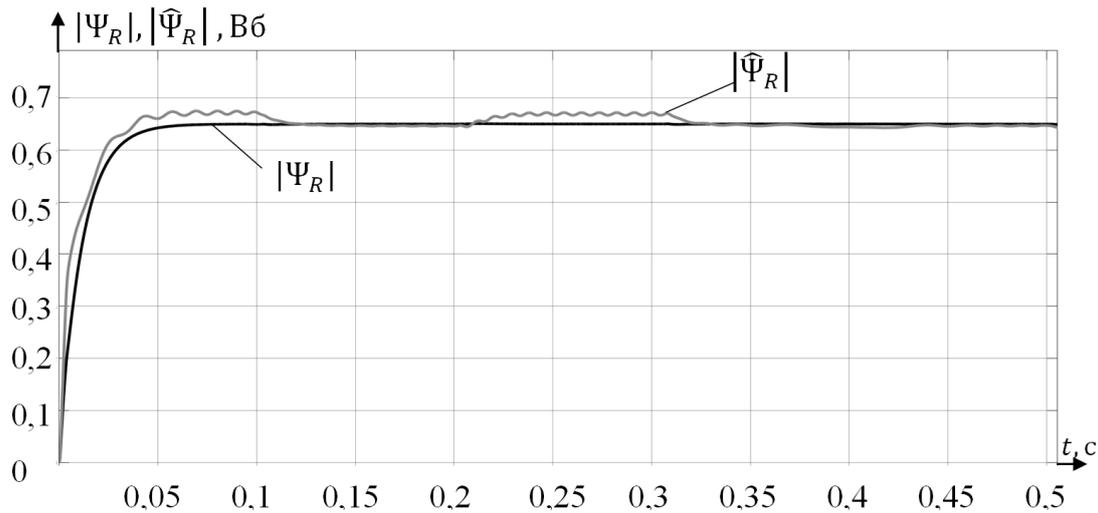


Рис. 5. Диаграммы работа модуля оценки потокосцепления АД

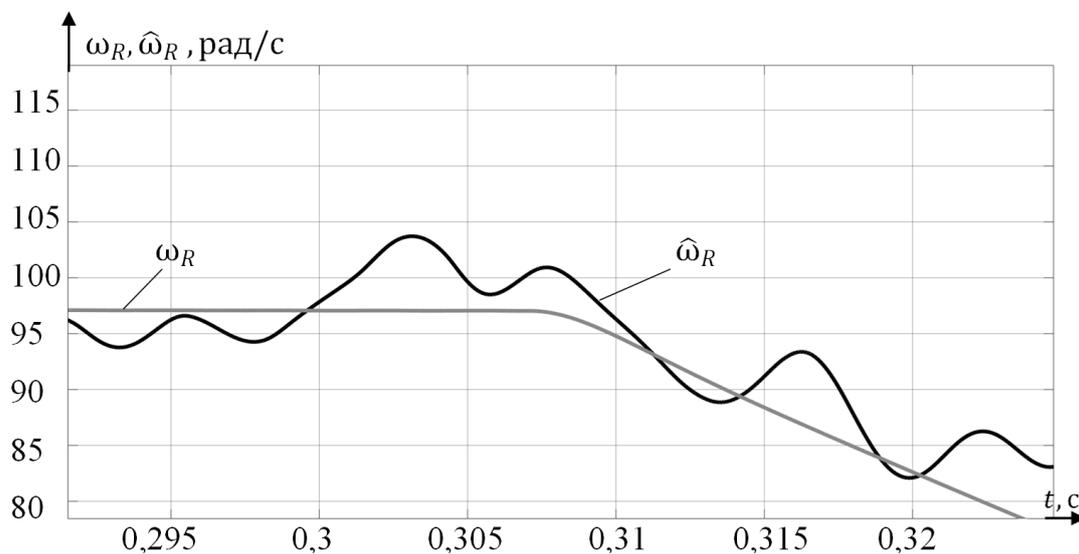


Рис. 6. Диаграммы работа модуля оценки частоты вращения вала АД

Анализ результатов имитационного моделирования наблюдателя (рис. 5-6) показал, что погрешности оценок неизмеряемых величин характеризуются следующими значениями. Так, отклонение расчётного значения потокосцепления $|\hat{\Psi}_R|$ от величины $|\Psi_R|$ не превышает 2,4%, оценка частоты вращения $\hat{\omega}_R$ отличается от значения ω_R не более чем на 5% (в переходном режиме), а в установившемся режиме относительная погрешность не более 2,8%, что допустимо для технической реализации такой системы.

Библиографический список

1. **Руди, Д.Ю.** Анализ влияния электроприводов переменного тока на питающую сеть / Д.Ю. Руди, К.В. Хацевский // Проблемы и перспективы развития России: молодёжный взгляд в будущее. – 2021. – № 57. – С. 332-340.
2. **Горлова, Т.В.** Электропривод, его состояние и перспективы / Т.В. Горлова, В.П. Обрусник // Доклады ТУСУР. – 2015. – №1 (35). – С. 161-164.

3. **Храмов, А.Е.** Электропривод движения пассажирского лифта / А.Е. Храмов, А.С. Плехов // Будущее технической науки: тез. докл. XX Всероссийской молодёжной науч.-техн. конф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – С. 104-105.
4. **Храмов, А.Е.** Разработка энергосберегающего электропривода безопасного скоростного пассажирского лифта / А.Е. Храмов, А.С. Плехов // Будущее технической науки: тез. докл. XXI Всероссийской молодёжной науч.-техн. конф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – С. 454-455.
5. **Калачёв, Ю.Н.** Наблюдатели состояния в векторном электроприводе / Ю.Н. Калачёв. – М., 2015. – 81 с.
6. **Самосейко, В.Ф.** Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В.Ф. Самосейко // Вестник ГУМиРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2019. – Т.11. – №1. – С. 156-168.
7. **Utrata, G.** The Induction motor MRAS-Based speed estimator capable of modelling the slip frequency dependent variability of the rotor impedance / G. Utrata, J. Rolek // Energies. – Vol. 16 (6). – 2023. – № 2591.
8. **Букреев, В.Г.** Анализ точности оценивания состояний асинхронного электропривода алгоритмами Люенбергера и Калмана / В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, Ф.В. Перевощиков // Науч.-техн. вест. информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – Т.23. – №1. – С. 35-43.
9. **Bernadeta, W.H.** The effect of motor parameters on the induction motor speed sensorless control system using Luenberger observer / W.H. Bernadeta // International Journal of Applied Sciences and Smart Technologies. – Vol. 4 (1). – 2022. – pp. 59-74.
10. **Dadkhah, R.** Parameter estimation of the induction motor using extended Kalman filter for wide range speed control / R. Dadkhah, H. Givi, A. Mehdipour // The 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference, Iran. – 2015. – pp. 137-142.
11. **Fan, B.** The full-order state observer speed-sensorless vector control based on parameters identification for induction motor / B. Fan, Z. Fu, L. Liu, J. Fu // Measurement and Control. – Vol. 52 (3-4). – 2019. – pp. 202-211.
12. **Pham, N.T.** Improve the performance of the MRAS speed estimator for sensorless controlled of six phase induction motor drive using neural network / N.T. Pham, D.P. Nguyen, K.H. Nguyen, N.V. Nguyen // Proceedings of the International Conference on Automation, Control and Robots, USA – 2017. – pp. 25-31.

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

ASYNCHRONOUS MOTOR STATE OBSERVER BASED ON AN ADAPTIVE MODEL

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

Abstract. The structure, mathematical and simulation models of an adaptive state observer of an asynchronous electric motor has been developed. The obtained system for evaluating the parameters of an electric motor allows us to determine the full range of values necessary for the operation of a vector control system of an electric drive based on an asynchronous machine. The observer is indifferent to changes in the parameters of the equivalent motor replacement circuit: the active resistances of the stator and rotor. The specified features of the developed engine condition detection system make it possible to build a sensorless vector control system adaptive to changes in the active resistances of the rotor and the rotor.

Keywords: asynchronous motor, vector control system, electric motor state observer, adaptive system.

References

- [1] Rudy, D.Yu. Analysis of the influence of AC electric drives on the supply network / D.Yu. Rudy, K.V. Khatsevsky // Problems and prospects of development of Russia: a youth's view into the future. – 2021. – No. 57. – pp. 332-340 (in Russian).
- [2] Gorlova, T.V. Electric drive, its state and prospects / T.V. Gorlova, V.P. Obrusnik // Reports of TUSUR. – 2015. – №1 (35). – pp. 161-164 (in Russian).
- [3] Khramov, A.E. Electric drive of passenger elevator / A.E. Khramov, A.S. Plekhov // The future of technical science: thesis of the XX All-Russian Youth Scientific and Technical Conference. NSTU named after R.E. Alekseev. – 2021. – pp. 104-105(in Russian).
- [4] Khramov, A.E. Development of an energy-saving electric drive for a high-speed safe passenger elevator / A.E. Khramov, A.S. Plekhov // The future of technical science: thesis of the XXI All-Russian Youth Scientific and Technical Conference. NSTU named after R.E. Alekseev. – 2022. – pp. 454-455(in Russian).
- [5] Kalachev, Yu.N. Observers of the state in a vector electric drive / Yu.N. Kalachev. – M., 2015. – 81 p (in Russian).
- [6] Samoseiko, V.F. Adaptive vector control algorithm for electric drives with asynchronous electric motors / V.F. Samoseiko // Bulletin of GUMiRF named after Adm. S.O. Makarov. – 2019. – Vol. 11. – No. 1. – pp. 156-168 (in Russian).
- [7] Loss, G. An estimator of the speed of an asynchronous motor based on MRAS, capable of modeling the frequency-dependent variability of the rotor impedance / G. Loss, J. Rolek // Energies. – vol. 16 (6). – 2023. – № 2591.
- [8] Bukreev, V.G. Analysis of the accuracy of estimating the states of an asynchronous electric drive by the algorithms of Luenberger and Kalman / V.G. Bukreev, E.B. Shandarova, F.V. Perevoshikov // Scientific and Technical. west. information technology, mechanics and optics. – 2023. – Vol. 23. – No. 1. – pp. 35-43(in Russian).
- [9] Bernadeta, W.H. The influence of engine parameters on the sensorless speed control system of an asynchronous motor using the Luenberger observer / W.H. Bernadeta // International Journal of Applied Sciences and Intelligent Technologies. – Vol. 4 (1). – 2022. – pp. 59-74.

- [10] Dadha, R. Estimation of parameters of an asynchronous motor using an extended Kalman filter for speed control in a wide range / R. Dadha, H. Givi, A. Mehdipour // 6th International Conference on Power Electronics Drive Systems and Technologies, Iran. – 2015. – pp. 137-142.
- [11] Fan, B. The full-order state observer speed-sensorless vector control based on parameters identification for induction motor / B. Fan, Z. Fu, L. Liu, J. Fu // Measurement and Control. – Vol. 52 (3-4). – 2019. – pp. 202-211.
- [12] Pham, N. T. Improve the performance of the MRAS speed estimator for sensorless controlled of six phase induction motor drive using neural network / N. T. Pham, D. P. Nguyen, K. H. Nguyen, N.V. Nguyen // Proceedings of the International Conference on Automation, Control and Robots, USA – 2017. – pp. 25-31.

УДК 621.3

А.И. Ермолаев¹, В.И. Ерофеев¹, А.С. Плехов², И.В. Тишин¹

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ШУМА В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ СО СТАТИЧЕСКИМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ РОТОРА

Институт проблем машиностроения Российской академии наук¹
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Аннотация. В работе проведено исследование вибрации и акустического шума магнитной природы, излучаемого асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором, обладающим статическим эксцентриситетом. Разработана численная конечно-элементная модель двигателя марки АИР180М4УЗ, описывающая взаимосвязанные электромагнитные, структурно-механические и акустические процессы в его узлах при статическом эксцентриситете. Результаты исследования, полученные с использованием данной модели, позволили установить зависимости уровня шума, амплитуды вибрации статора, времени разгона и напряжения по фон Мизесу от радиуса статического эксцентриситета ротора.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, магнитный шум, эксцентриситет ротора, метод конечных элементов, численное моделирование, вибрация статора.

Введение

Асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором является одним из самых распространенных типов электрических машин [1-4]. Воздушный зазор (ВЗ) между его ротором и статором находится в пределах 0,1-1,0 мм (обычно 0,2-0,6 мм) [1, 4-6]. Очевидно, что даже незначительные нарушения его формы приводят к существенному изменению параметров магнитной цепи, влияют на магнитный шум, снижают рабочий ресурс АД [1-9].

Повышение надежности АД с короткозамкнутым ротором является одной из актуальных задач промышленной энергетики. Существенную роль при этом играют мероприятия по обеспечению допустимой степени неравномерности его ВЗ. Эксцентриситет ротора АД определяется как мера нарушения симметрии ВЗ по результатам непосредственных его замеров в торцевых частях расточки статора по формуле [6,7]:

$$\varepsilon = (\delta_{\max} - \delta_0) / \delta_0, \quad (1)$$

где δ_{\max} и δ_0 – максимальная и средняя величины ВЗ.

При наличии существенной неравномерности ВЗ ($\varepsilon > 0,15$) снижается пусковой момент двигателя, растут одностороннее магнитное притяжение и вибрация статора, снижается коэффициент полезного действия АД. Указанные явления обуславливаются неравномерностью магнитных сопротивлений фаз АД в

области ВЗ, что нарушает симметрию фазных токов статора за счет изменения индуктивностей его обмоток. Согласно [8,9], вследствие изменения эксцентриситета АД коэффициент полезного действия снижается на 2,8%. Очевидное влияние на перечисленные рабочие параметры АД возникает при эксцентриситете ротора $\varepsilon > 0,3$ [8,9].

Обзор научной литературы показал, что проблематике магнитного шума и вибрации в электрических машинах разного типа посвящено достаточно много трудов отечественных и зарубежных авторов. Вместе с тем, публикаций, посвященных исследованию влияния эксцентриситета на магнитный шум крайне мало. В АД с эксцентриситетом ротора, как правило, исследуются потери электроэнергии, диаграммы токов, нагрев, влияние на подшипники. Одним из первых исследователей, описавших процессы возбуждения магнитного шума в АД с эксцентриситетом, был И.Г. Шубов [7]. Позднее в своих исследованиях влияние эксцентриситета ротора изучали *K.C. Maliti* [10], *A. Rezig, M.R. Mekideche* [11], *A. Negoita, G. Scutaru* [12]. Вместе с тем, результаты, полученные этими авторами применительно к исследованию влияния эксцентриситета на магнитный шум, достаточно поверхностны, следовательно, проблема требует более подробного изучения.

Цель данной статьи – оценить зависимости параметров магнитного шума АД, механических напряжений и деформаций в его статоре от величины эксцентриситета его ротора.

Возбуждение магнитных сил в асинхронном двигателе со статическим эксцентриситетом ротора

Известно, что периодические радиальные магнитные силы F_r в бездефектных АД являются основными источниками их вибрации [7,13]. Эти силы вызваны действием магнитного поля B в зазоре АД на стальной сердечник статора [7,10,13,14]:

$$F_r(x, t) = \frac{B^2(x, t)}{2 \cdot \mu_0}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, x – угловая координата ВЗ, t – время.

Для аналитического описания наиболее выраженной гармоника вибровозмущающей силы F_r (с порядком $2 \cdot z$, где z – число пар полюсов) необходимо знать ее основные параметры, а именно частоту, амплитуду и начальную фазу:

$$F_r(x, t) = F_m \cdot \cos(r \cdot x - \omega \cdot t - \varphi), \quad (3)$$

где F_m – амплитуда радиальной магнитной силы, r – порядок пространственных колебаний, ω – частота радиальной магнитной силы, φ – фаза магнитной силы.

Согласно [7,15], вибрации статора будут возбуждаться силой с порядком $r = 0$ (или же $0 \cdot z$), но с амплитудой, много меньшей по сравнению с силой с порядком $2 \cdot z$, описываемой выражением (3). Радиальные силы порядка $r = 2$ и выше вызывают изгибные деформации статора, как показано на рис. 1.

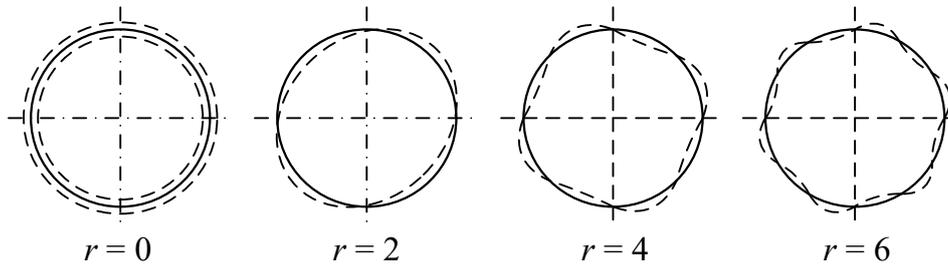


Рис. 1. Формы колебаний сердечника статора

Величина ВЗ δ при статическом эксцентриситете ротора описывается выражением [7]:

$$\delta = \delta_0 - \delta_\varepsilon \cos(x),$$

где $\delta_\varepsilon = \delta_{\max} - \delta_0$ – радиус эксцентриситета.

Если пренебречь влиянием демпфирования со стороны статорной обмотки и короткозамкнутого ротора, амплитуда основной гармоники магнитного поля определяется отношением [7]:

$$B_{z\pm 1} = 0,5\varepsilon' B_1,$$

где $\varepsilon' = \delta_\varepsilon / (\delta_0 k_c) = \varepsilon / k_c$ – относительный эксцентриситет, k_c – коэффициент Картера, в общем случае равный отношению максимальной магнитной индукции B_{\max} на зубцовом делении t_z к ее среднему значению B_0 [7,16].

Полная радиальная вибровозмущающая сила, действующая на сердечник статора при $r = z \pm 1$, описывается следующим выражением [7]:

$$F_1 \approx 20\pi D_t l_t B_1^2 \varepsilon',$$

где l_t – длина статора, D_t – диаметр средней линии ВЗ.

Виброскорость на поверхности статора АД может быть определена из отношения [7]:

$$\dot{y}_\varepsilon = F_1 / \left(\left[1 + \frac{M_{ст}}{M_{рот}} - \frac{1}{\omega^2 m \lambda_{ст}} \right] z_p - \omega M_{рот} \right),$$

где $M_{ст}$ – масса статора, $M_{рот}$ – масса ротора, $\lambda_{ст}$ – механическая податливость статора, $z_p = \omega M_{рот} - 1/(\omega \lambda_{рот})$ – механический импеданс ротора, $\lambda_{рот}$ – механическая податливость ротора.

Расчет магнитного шума статора асинхронного двигателя при статическом эксцентриситете ротора

Известно, что радиальные магнитные силы одного гармонического состава вызывают вибрацию статора АД другого гармонического состава [7,10]. Дело в том, что статор АД с точки зрения механики обладает своей амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), как правило, с несколькими собственными частотами (модами). Следовательно, ввиду резонансного усиления близи собственных частот спектральный состав радиальных магнитных сил в ВЗ АД будет разительно отличаться от гармонического состава вибрации статора.

При колебаниях с порядком $r = 2$ и более статор претерпевает деформации сложной пространственной формы r -угольника (см. рис. 1) с частотой, равной [7]:

$$\omega_r = \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot m \cdot R_{ст}^4}}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости ярма статора, h – высота спинки статора, $R_{ст}$ – внешний радиус статора, m – приведенная масса ярма статора, определяемая по формуле:

$$m = \frac{m_{ст}}{2 \cdot \pi \cdot R_{ст} \cdot l_l},$$

где $m_{ст}$ – масса сердечника статора.

Выражение (4) подтверждает, что наибольшей амплитудой характеризуются колебания с порядком $r = 2$, поскольку их частота ниже, чем у других форм колебаний [7,15]. Однако при питании АД от ПЧ значительное влияние на виброактивность статора оказывают и колебания порядка $r = 2 \cdot z = 4$.

Механический импеданс $z_{ст}$ статора на частоте ω радиальных магнитных сил будет определяться следующим образом:

$$z_{cm} = \omega \cdot m - \frac{1}{\omega \cdot \lambda_{cm}} = \omega \cdot m - \frac{E \cdot h}{R_{cm}^2 \cdot \omega}.$$

Так как вибрация наибольшей интенсивности возникает в силу взаимодействия первой и высших гармоник магнитного поля в воздушном зазоре АД, пространственно-временное распределение вибровозмущающих сил в ВЗ будет иметь следующий вид:

$$F_r(x, t) = \sum_{g=1}^{\infty} F_{rgm} \cdot \cos \left((Z_p \pm Z_p) \cdot x - 2(1 \pm g)\omega_0 t - (\varphi_{12} \pm \varphi_{12g}) \right), \quad (5)$$

где F_{rgm} – амплитуда g -й гармоники радиальной магнитной силы, ω_0 – частота питающей сети, φ_{12} – фаза 1-й гармоники тока намагничивания, φ_{12g} – фаза g -й гармоники тока намагничивания.

Амплитудные значения гармоник радиальной магнитной силы F_{rgm} могут быть определены из соотношения:

$$F_{rgm} = \frac{B_{\delta}^2 \cdot R \cdot I_{12g}}{2 \cdot \mu_0 \cdot R_{ст} \cdot I_{12}}$$

где R – внутренний радиус сердечника статора, I_{12} – амплитуда 1-й гармоники тока намагничивания согласно Т-образной схеме замещения I_{12g} – амплитуда g -й гармоники тока намагничивания.

С использованием полученных значений F_{rgm} можно определить значения скоростей деформации статора, вызванных магнитной вибрацией:

$$\dot{y} = \frac{F_{rgm} \cdot R}{z_{ст} \cdot R_{ст}}$$

Численная конечно-элементная модель асинхронного двигателя

Процессы возбуждения магнитного шума статора АД могут быть описаны достаточно точно с использованием приведенной теории, которая, тем не менее, содержит в себе ряд допущений. Они преимущественно связаны с особенностями формы ВЗ, вращением ротора и деформацией статора, а также гармоническим составом питающего напряжения.

Если учитывать каждый из перечисленных факторов, то это неизбежно приведет к усложнению математических выражений, описывающих процессы возбуждения магнитной вибрации [7,15]. Так, если описание волн магнитной индукции проводится с использованием метода гармонических проводимостей, то в уравнении появляется допущение постоянства ширины воздушного зазора во времени при расчете функции магнитной проводимости, что неприемлемо при исследовании АД с эксцентриситетом [17].

Ранее в работах авторов, в частности в [18], была представлена численная модель АД модели АИР180М4У3 мощностью 30 кВт, синхронной скоростью вращения 1500 об/мин, разработанная в среде мультифизического конечно-элементного проектирования. Отчасти выбор типа двигателя был продиктован наблюдением за виброактивностью и шумностью двигателей разной мощности, где наблюдался повышенный уровень шума у АД мощностью 30-100 кВт [7]. Основные геометрические и технические характеристики АД модели АИР180М4У3 приведены в табл. 1 [2,5].

Таблица 1

Технические параметры и геометрические размеры двигателя АИР180М4У3

№	Физ. величина	Значение	Ед. изм.
1	Действующее значение напряжения	380	В
2	Номинальный ток	57,3	А

Окончание табл. 1

№	Физ. величина	Значение	Ед. изм.
3	Номинальный момент	195	Н·м
4	Номинальная мощность	30	кВт
5	Синхронная частота вращения	1500	мин ⁻¹
6	Число пар полюсов	2	–
7	Диаметр сердечника статора внешний	0,313	м
8	Диаметр сердечника статора внутренний	0,211	м
9	Длина сердечников статора и ротора	0,185	м
10	Ширина воздушного зазора	0,6	мм
11	Высота спинки статора	0,01	м
12	Высота паза статора	0,041	м
13	Высота паза ротора	0,025	м
14	Ширина паза статора (внутр./внешн.)	3,2 / 9	мм
15	Ширина паза ротора (внутр./внешн.)	11 / 8	мм
16	Число пазов статора	48	–
17	Число пазов ротора	39	–
18	Число проводников в одной обмотке	17	–

В целях повышения производительности и расширения возможностей численная модель была переделана в двухмерной постановке. Расчеты выполнены при моменте нагрузки 100 Нм. Геометрия обновленной численной модели АД марки АИР180М4У3 и ее расчетная сетка приведены на рис. 2.

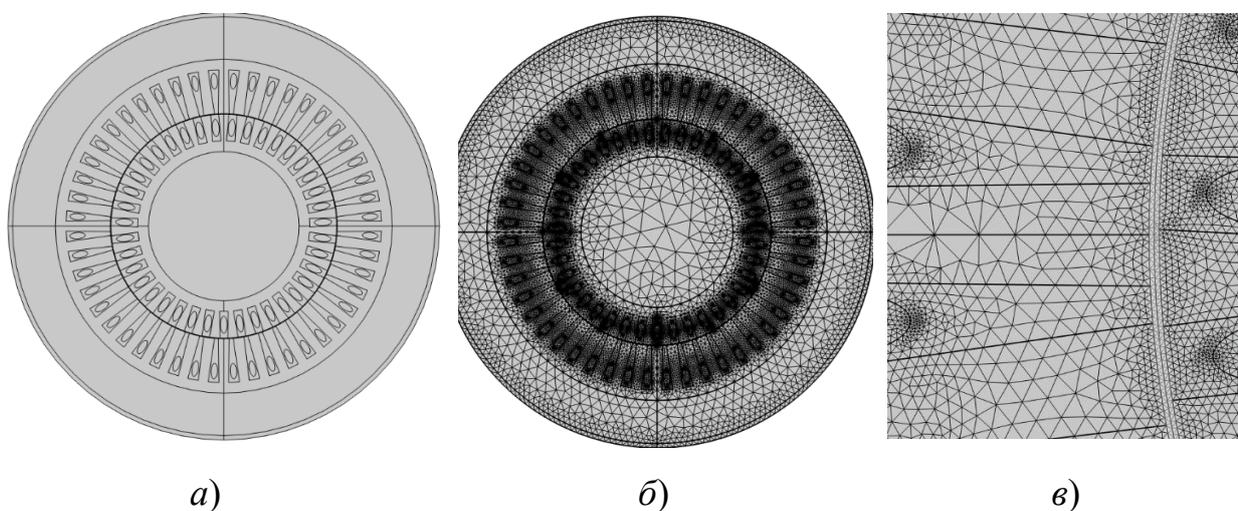


Рис. 2. Численная модель двигателя марки АИР180М4У3:
геометрия модели (а), расчетная сетка модели (б) и воздушного зазора (в)

На рис. 2, б, в можно наблюдать, что при расчете используется высококачественная треугольная сетка, обладающая выраженной структурой и высокой плотностью в области ВЗ. О высоком качестве сетки также свидетельствуют ее статистические данные, приведенные на рис. 3.

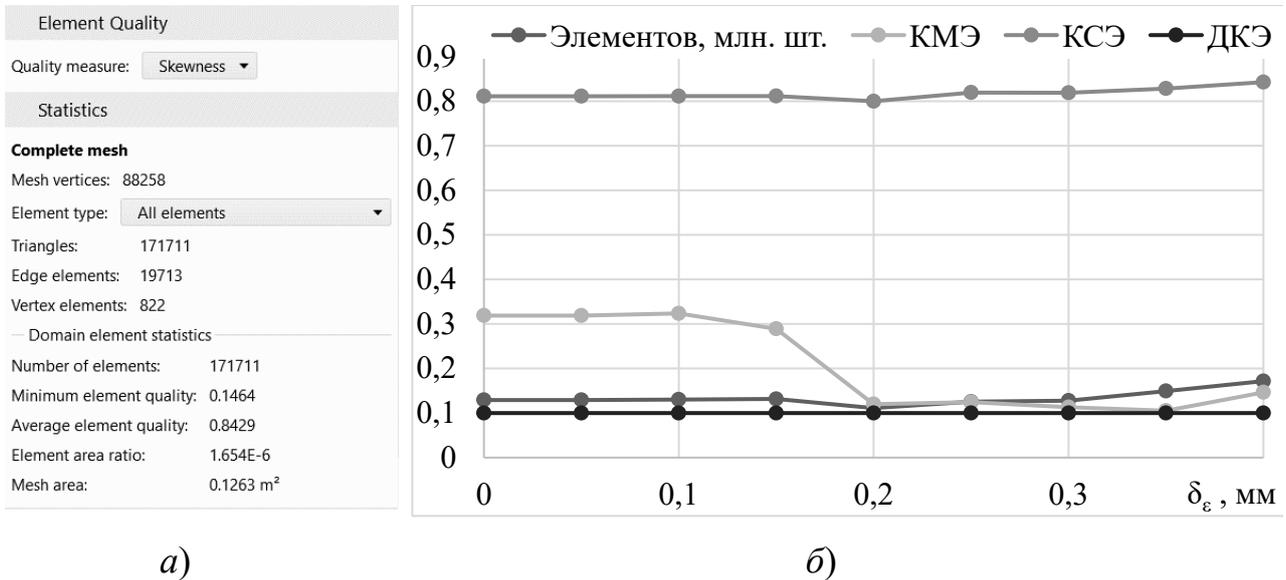


Рис. 3. Качество расчетной сетки:
статистика при $\delta_\varepsilon = 0,4$ мм (а), статистика при различных δ_ε (б)

На рис. 3, б приняты обозначения: КМЭ – качество минимального элемента (*Minimum element quality*), КСЭ – среднее качество элементов (*Average element quality*), ДКЭ – допустимое качество минимального элемента. Из представленного графика следует, что при всех значениях δ_ε КМЭ > ДКЭ, что свидетельствует об удовлетворительном качестве расчетной сетки. При $\delta_\varepsilon > 0,15$ из-за роста несимметрии модели и уменьшении ширины части ВЗ значение КМЭ стало резко падать, что удалось скомпенсировать повышением качества сетки за счет увеличения числа ее элементов (с 129 тыс. до 172 тыс.).

Высокое качество сетки свидетельствует о высокой достоверности результатов при условии правильной постановки задачи, установки необходимых граничных условий и исходных данных.

Исследование магнитного шума и вибрации асинхронного двигателя

С использованием приведенной на рис. 2 численной модели были исследованы процессы возбуждения магнитного шума и вибрации статора АД от электромагнитных взаимодействий, приводящих несбалансированный ротор АД в движение, до радиальных колебаний статора, являющихся источником магнитного шума. При этом радиус эксцентриситета $\delta_\varepsilon = \delta_{\max} - \delta_0$ варьировался от 0 до 0,4 мм с шагом 0,05 мм. Распределение индукции магнитного поля в сердечнике АД при $\delta_\varepsilon = 0,4$ мм представлено на рис. 4.

На представленном рисунке практически незаметно влияние эксцентриситета на магнитное поле, хотя ротор машины сдвинут вправо на 2/3 ширины зазора.

Практически такая же картина наблюдалась и при других значениях статического эксцентриситета ротора.

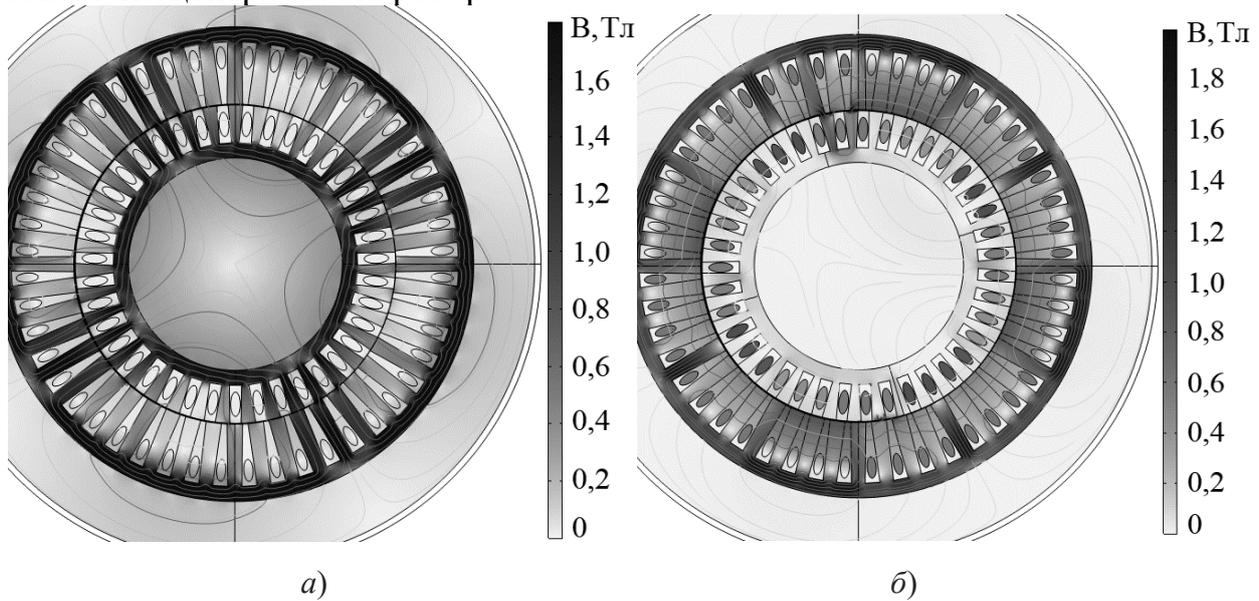


Рис. 4. Индукция магнитного поля в двигателе АИР180М4У3 при $t = 0$ с (а) и $t = 0,2$ с (б)

Однако формы колебаний и распределения механических напряжений в стали статора при различных δ_ϵ разительно отличались, что можно наблюдать, в частности, на рис. 5.

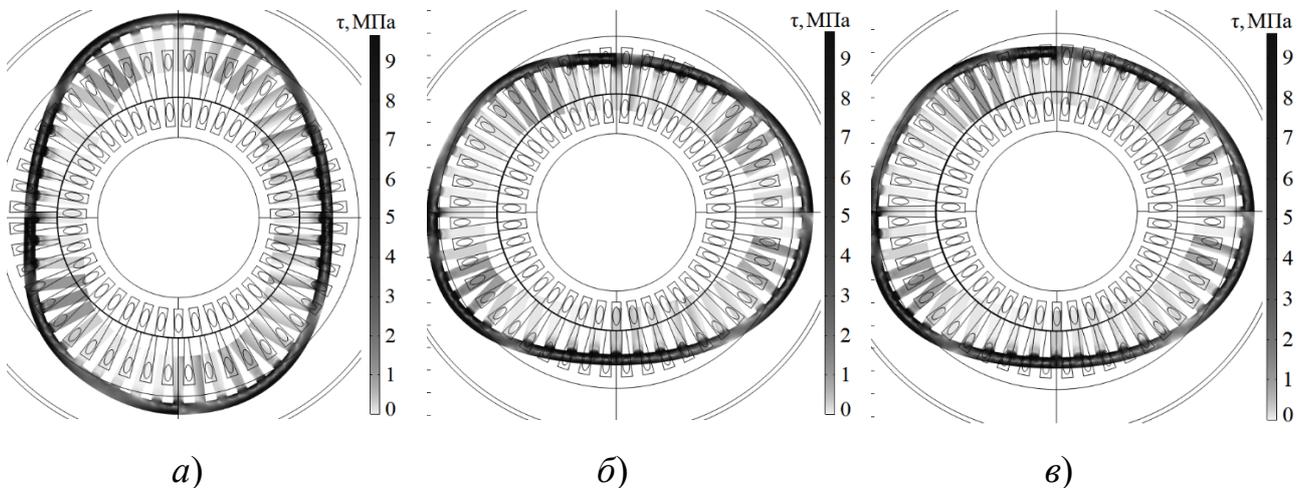


Рис. 5. Напряжения по Мизесу в статоре двигателя АИР180М4У3:
 $\delta_\epsilon = 0$ мм (а), $\delta_\epsilon = 0,2$ мм (б), $\delta_\epsilon = 0,4$ мм (в)

Из анализа рис. 5 следует, что наибольшие механические напряжения и деформации достигаются при $\delta_\epsilon = 0$. Такие же значения достигаются при $\delta_\epsilon < 0,1$ мм. При $\delta_\epsilon > 0,1$ мм направление деформации статора ориентируется вдоль оси смещения ротора. Дальнейшее увеличение эксцентриситета привело к незначительному снижению деформации и механических напряжений в статоре.

Периодические деформации статора, вызванные действием радиальных магнитных сил и магнитострикции, являются одним из основных источников

шума в АД. Диаграммы звуковых давлений магнитного шума АД марки АИР180М4У3 представлены на рис. 6. и рис. 7.

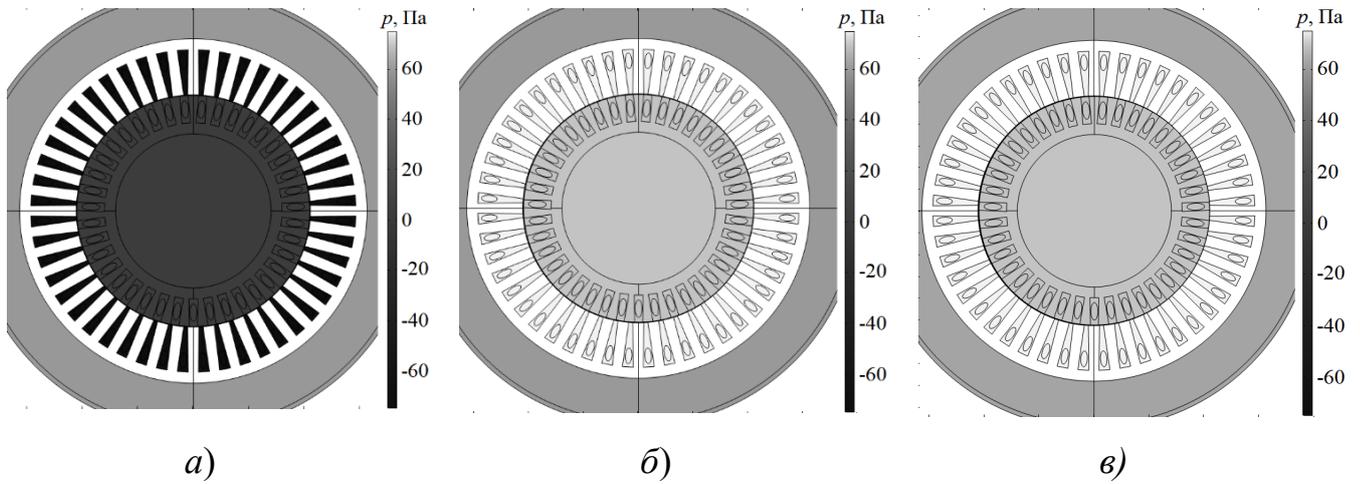


Рис. 6. Звуковое давление, вызванное вибрацией АИР180М4У3 при $t = 0,2$ с:
 $\delta_\epsilon = 0$ мм (а), $\delta_\epsilon = 0,2$ мм (б), $\delta_\epsilon = 0,4$ мм (в)

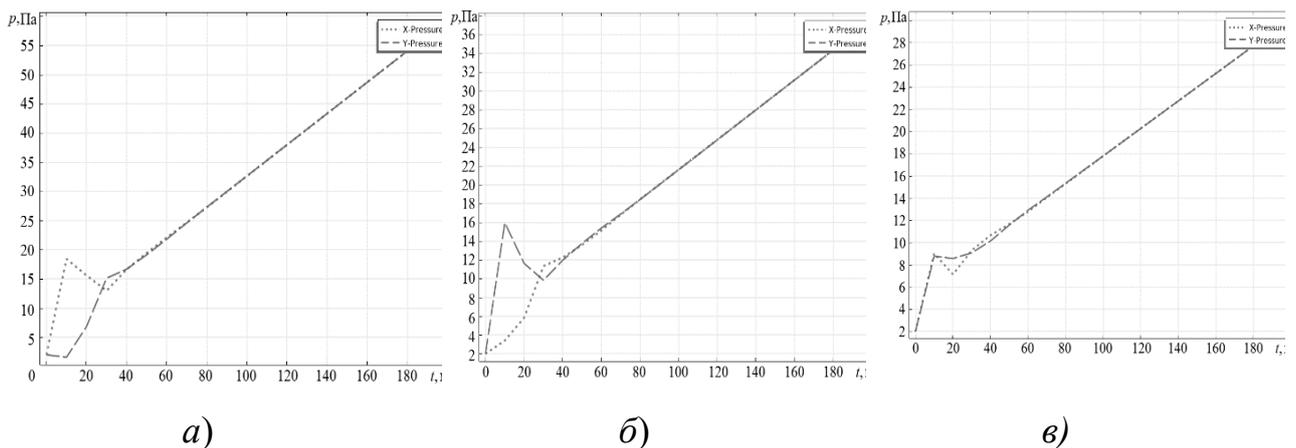


Рис. 7. Диаграммы звуковых давлений в статоре двигателя АИР180М4У3:
 $\delta_\epsilon = 0$ мм (а), $\delta_\epsilon = 0,2$ мм (б), $\delta_\epsilon = 0,4$ мм (в)

Из рис. 6 и 7 следует, что с ростом эксцентриситета ϵ магнитный шум двигателя в целом уменьшается. Подобное поведение наблюдалось на рис. 5, иллюстрирующем деформации и механические напряжения в сердечнике статора. Зависимости звуковых давлений p при $t = 0,2$ с, деформаций статора s на собственной частоте $f_0 = 160$ Гц и времени разгона АД до 24 об/мин представлены на рис. 8.

На рис. 8 можно наблюдать, что время разгона АД увеличивается с ростом радиуса эксцентриситета δ_ϵ ротора, причем уже при $\delta_\epsilon = 0,1$ мм ($\epsilon = 0,167$) время разгона увеличивается в 1,5 раза, а при $\delta_\epsilon = 0,2$ мм ($\epsilon = 0,333$) вырастает почти вдвое. При этом амплитуда вибрации на основной гармонике снижается практически в 3 раза, а уровень шума – в 1,5 раза.

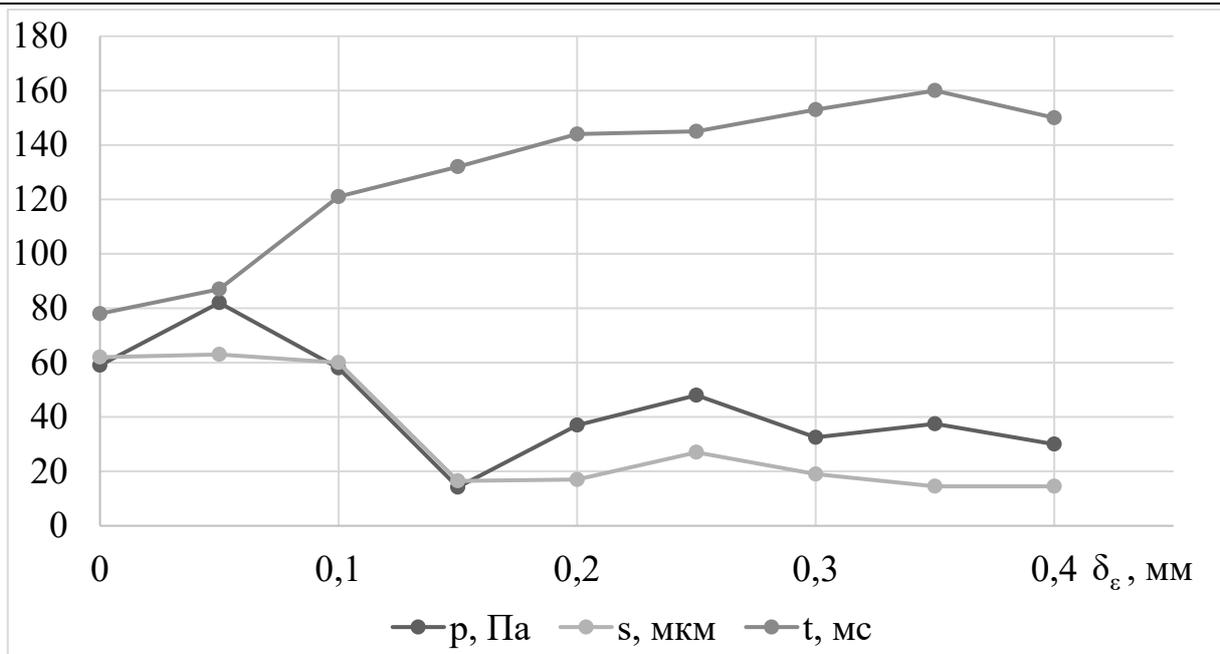


Рис. 8. Зависимости звуковых давлений p при $t = 0,2$ с, деформаций статора s и времени разгона t двигателя АИР180М4УЗ

На этапе частотного анализа были получены спектрограммы виброперемещений точек, расположенных на внешней поверхности сердечника статора на пересечении условных осей X и Y . Спектрограммы перемещений этих точек представлены на рис. 9.

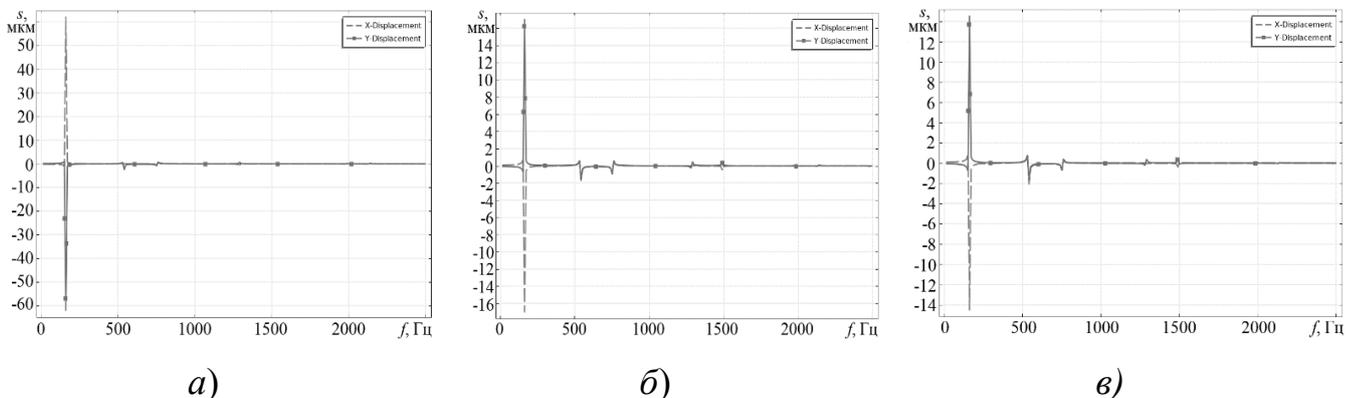


Рис. 9. Спектрограммы деформаций статора двигателя АИР180М4УЗ:
 $\delta_\epsilon = 0$ мм (а), $\delta_\epsilon = 0,2$ мм (б), $\delta_\epsilon = 0,4$ мм (в)

На рис. 9 можно наблюдать, что в отсутствие эксцентриситета ротора в спектре превалирует гармоника $f = 160$ Гц с $r = 2$. При $\epsilon = 0,25$ ($\delta_\epsilon = 0,15$ мм) уровень шума и вибрации резко снижается более чем в 3 раза. При дальнейшем увеличении ϵ можно наблюдать рост вклада гармоник с $r = 3$ ($f = 540$ Гц), $r = 4$ ($f = 755$ Гц), $r = 6$ ($f = 1493$ Гц), при достаточной стабильности гармоники $f = 160$ Гц. И.Г. Шубов в своей работе [7] также отмечал рост влияния форм колебаний с нечетным значением r в АД с эксцентриситетом ротора.

Заключение

В программной среде мультифизического конечно-элементного проектирования была разработана численная модель, позволяющая исследовать электромагнитные, механоакустические и энергетические процессы в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором с учетом его эксцентриситета. При вычислениях учитываются взаимосвязанность и взаимовлияние процессов, происходящих на разных уровнях физики.

В результате моделирования процессов в двигателе марки АИР180М4У3 со статическим эксцентриситетом ротора были получены графики, отражающие пространственно-временные распределения физических переменных, имеющих отношение к возбуждению магнитного шума и вибрации: радиальной магнитной силы, деформации статора, излучаемого звукового давления.

Было установлено, что наибольшие деформации статора в двигателе АИР180М4У3 возникают при $\varepsilon < 0,167$ ($\delta_\varepsilon < 0,1$ мм). Доминирующей является гармоника с порядком $r = 2$ и частотой $f = 160$ Гц. Эта форма колебаний характеризуется наименьшей частотой и наибольшей амплитудой среди прочих форм колебаний АД. Увеличение ε до 0,25 сопровождалось скачкообразным снижением амплитуды гармоники $f = 160$ Гц и возрастанием влияния гармоник с $r = 3$, $r = 4$, $r = 6$. Такое поведение двигателя может быть объяснено изменением мод колебаний из-за перераспределения радиальных магнитных сил, действующих на статор АД. Также в процессе исследования было выявлено существенное увеличение времени переходного процесса разгона АД в зависимости от радиуса эксцентриситета.

В будущем планируется использовать разработанную программу для дальнейшего исследования влияния эксцентриситета ротора на процессы возбуждения магнитной вибрации статора асинхронного электродвигателя, в том числе в условиях номинальной нагрузки, перегрузки и искажения формы питающего напряжения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН на выполнение фундаментальных научных исследований на 2024-2026 г.г. FFUF - 2024-0031. № НИОКТР 1023032800130-3-2.3.2.

Библиографический список

1. Железняков, А. В., Караван И. А. Эксцентриситет ротора в погружных асинхронных двигателях // Сб. науч. трудов ДОНИЖТ, 2021. – № 60. – С. 4-9.
2. Вольдек, А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока: уч. для вузов. М.: Питер, 2008. – 349 с.
3. Induction Motor Eccentricity Fault Analysis and Quantification with Modified Winding Function based Model / Wang B., Albader M., Inoue H. Kanemaru M. // 25-th ICEMS, 2022. – pp. 1–6.
4. Irgat E., Ünsal A., Canseven H. Detection of Eccentricity Faults of Induction Motors Based on Decision Trees // 13-th ELECO, 2021. – pp. 435–439.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В.

- И., Соболенская Е. А. М.: Энергоиздат, 1982. – 503 с.
6. **Petryna J., Duda A., Sułowicz M.** Eccentricity in Induction Machines – A Useful Tool for Assessing Its Level // *Energies*, 2021. – vol. 14. – pp. 1976.
 7. **Шубов, И. Г.** Шум и вибрация электрических машин. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.Г. Шубов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 208 с.
 8. **Ванягин, А.В.** Диагностика эксцентриситета роторов электрических машин переменного тока по их электрическим параметрам / А.В. Ванягин, Б.А.Гордеев, А.А. Кралин, С.Н. Охулков, Д.Ю. Титов // НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – С. 4-15.
 9. **Новожилов, А. Н.,** Исупова Н.А. Способы диагностики эксцентриситета ротора асинхронного двигателя по его электромеханическим параметрам / Вестник ПГУ, Респуб. Казахстан, ПГУ им. С. Торайгырова, Павлодар, 2011. – №1. – С. 37-44.
 10. **Maliti K. C.** Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: doctoral dissertation. Stockholm: 2000. – 209 p.
 11. **Rezig A., Mekideche M.R.** Effect of rotor eccentricity on magnetic noise generation in induction motors // *Journal of Electrical Engineering*, 2020. – vol. 8 (is. 1). – pp. 220379216.
 12. **Negoita A., Scutaru G., Peter I., et. al.** Influence of rotor static eccentricity on the noise level of a single phase squirrel cage induction motor // 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, 2012. – pp. 373-378.
 13. **Leleu E., Espanet C., Miraoui A., Siala S.** Analytical modelling of electromagnetic origin vibrations in an induction machine supplied by high power PWM inverter // *IEEE Industrial Electronics IECON 2006. 32nd Annual Conference*, 2006. – P. 836-843.
 14. **Shahaj A.** Mitigation of vibration in large electrical machines: doctoral dissertation. Nottingham, 2010. – 424 p.
 15. **Доброскок, Н. С.** Алгоритмические методы снижения шумов и вибраций в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе: дисс... канд.техн.наук. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 162 с.
 16. **Афанасьев, А. А.** Расчет магнитного поля в воздушном зазоре магнитоэлектрических машин на основе комплексной потенциальной функции // *Электричество*, 2014. – № 1. – С. 41-47
 17. **Franck D., van der Giet M., Hameyer K.** Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011. – P. 1213-1218.
 18. **Ермолаев, А. И.,** Ерофеев В. И., Плехов А. С., Титов Д. Ю. Исследование магнитной вибрации в асинхронном электродвигателе посредством МКЭ-моделирования // *Интеллектуальная электротехника*, 2021. – № 3. – С. 37-56.

A.I. Ermolaev¹, V.I. Erofeev¹, A.S. Plekhov², I.V. Tishin¹

STUDY OF MAGNETIC NOISE OCCURRING IN AN INDUCTION MOTOR WITH STATIC ROTOR ECCENTRICITY

Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of the Sciences
Nizhny Novgorod, Russia¹
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia²

Abstract. The article carried out a study of magnetic vibration and noise emitted by a squirrel-cage induction motor having a static eccentricity of its rotor. A numerical finite element model of the AIR180M4U3 motor has been developed, describing the interconnected electromagnetic, structural-mechanical and acoustic processes in its components at static eccentricity. The research results obtained using this model made it possible to establish the dependence of the noise level, stator deformation amplitude, acceleration time and von Mises stress due with the radius of static eccentricity of the rotor.

Key words: squirrel-cage induction motor, magnetic noise, rotor eccentricity, finite element method, numerical modeling, stator vibration.

References

- [1] A. V. Zheleznyakov, I. A. Karavan, “E`kscentrisitet rotora v pogruzhny`x asinxronny`x dvigatelyax [Rotor eccentricity in submersible asynchronous motors]”, “*Sb. nauch. trudov DONIZhT [Proceedings of DONIZHT]*”, no. 60, pp. 4-9, 2021 (in Russian)
- [2] A. I. Vol`dek, V. V. Popov, “E`lektricheskie mashiny`. Mashiny` peremennogo toka: uch. dlya vuzov [Electrical machines. AC machines: textbook. for universities]”, Piter, Moscow, 2008 (in Russian)
- [3] B. Wang, M. Albader, H. Inoue, M. Kanemaru, “Induction Motor Eccentricity Fault Analysis and Quantification with Modified Winding Function based Model”, “*25-th ICEMS*”, pp. 1–6, 2022
- [4] E. Irgat, A. Ünsal, H. Canseven, “Detection of Eccentricity Faults of Induction Motors Based on Decision Trees”, “*13-th ELECO*”, pp. 435–439, 2021
- [5] A. E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolenskaya, “Asinxronny`e dvigateli serii 4A: Spravochnik [Asynchronous motors series 4A: Directory]”, Energoizdat, Moscow, 1982 (in Russian)
- [6] J. Petryna, A. Duda, M. Sułowicz, “Eccentricity in Induction Machines – A Useful Tool for Assessing Its Level”, “*Energies*”, vol. 14, pp. 1976, 2021
- [7] I. G. Shubov, “Shum i vibraciya e`lektricheskix mashin [Noise and vibration of electrical machines]”, E`nergoatomizdat, Leningrad, 1986 (in Russian)
- [8] A. V. Vanyagin, B. A. Gordeev, A. A. Kralin, S. N. Oxulkov, D. Yu. Titov, “Diagnostika e`kscentrisiteta rotorov e`lektricheskix mashin peremennogo toka po ix e`lektricheskim parametram [Diagnostics of the eccentricity of rotors of alternating current electric machines based on their electrical parameters]”, “*Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Works of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]*”, pp. 4-15, 2016 (in Russian)
- [9] A. N. Novozhilov, N. A. Isupova, “Sposoby` diagnostiki e`kscentrisiteta rotora asinxronnogo dvigatelya po ego e`lektromexanicheskim parametram [Methods for diagnosing the rotor eccentricity of an asynchronous motor based on its electromechanical parameters]”, “*Vestnik PGU [PGU Bulletin]*”, PSU n.s. S. Toraigyrova, no. 1, pp. 37-44, 2011 (in Russian)

-
- [10] K. C. Maliti, “Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors”: doctoral dissertation. Stockholm, 2000
- [11] A. Rezig, M. R. Mekideche, “Effect of rotor eccentricity on magnetic noise generation in induction motors”, *“Journal of Electrical Engineering”*, vol. 8, no. 1, pp. 220379216, 2020
- [12] A. Negoita, G. Scutaru, I. Peter, et. al. “Influence of rotor static eccentricity on the noise level of a single phase squirrel cage induction motor”, *“13-th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)”*, Brasov, pp. 373-378, 2012
- [13] E. Leleu, C. Espanet, A. Miraoui, S. Siala, “Analytical modelling of electromagnetic origin vibrations in an induction machine supplied by high power PWM inverter”, *“32nd Annual Conference IEEE Industrial Electronics IECON”*, pp. 836-843, 2006
- [14] A. Shahaj, “Mitigation of vibration in large electrical machines”: doctoral dissertation. Nottingham, 2010
- [15] N. S. Dobroskok, “Algoritmicheskie metody` snizheniya shumov i vibracij v chastotno-reguliruemom asinxronnom e`lektroprivode [Algorithmic methods for reducing noise and vibration in a frequency-controlled induction electric drive]”: candidate of technical sciences dissertation. Sankt-Petersburg, 2014 (in Russian)
- [16] A. A. Afanas`ev, “Raschet magnitnogo polya v vozdushnom zazore magnitoe`lektricheskix mashin na osnove kompleksnoj potencial`noj funkcii [Calculation of the magnetic field in the air gap of magnetoelectric machines based on a complex potential function]”, *“E`lektrichestvo [Electricity]”*, no. 1, pp. 41-47, 2014 (in Russian)
- [17] D. Franck, M. van der Giet, K. Hameyer “Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors”, *“2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)”*, pp. 1213-1218, 2011
- A. I. Ermolaev, V. I. Erofeev, A. S. Plekhov, D. Yu. Titov, “Issledovanie magnitnoj vibracii v asinxronnom e`lektrodvigatele posredstvom MKE`-modelirovaniya [Study of magnetic vibration in an induction electric motor using FEM modeling]”, *“Intellektual`naya e`lektrotexnika [Intelligent Electrical Engineering]”*, no. 3, pp. 37-56, 2021 (in Russian) УДК 621.311.1 DOI: 10.46960/apeen_2023_50

УДК 62-83

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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОДИНАМИЧНЫХ СЛЕДЯЩИХ
ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Воронежский государственный технический университет

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы синтеза высокочастотного следящего электропривода с обеспечением амплитудно-фазочастотных характеристик в условиях воздействия на него дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: следящий электропривод, математическое моделирование, динамические характеристики.

Обеспечение требований к динамическим характеристикам следящих электроприводов по строгой регламентации амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) в условиях воздействия значительных дестабилизирующих факторов, с учетом нелинейностей (в том числе насыщений по максимальному напряжению питания и максимальному току) и нестационарности объекта управления является сложной многокритериальной задачей. В частности, резкое подавление амплитудной характеристики за полосой пропускания электропривода при жестком допуске на разброс величины полосы пропускания по угловому положению и заданной фазе на частоте пропускания в условиях параметрических возмущений связано с большими трудностями и практически не решается в рамках аналоговых систем, поэтому структура управления электропривода реализована на базе микроконтроллера с возложением максимального количества функций на программный уровень.

Целью данной статьи является реализация имитационной математической модели следящего электропривода с обеспечением динамических характеристик для дальнейшего переноса алгоритмов управления в программную среду.

Система автоматического регулирования (САР) построена на основе классических принципов управления угловым положением по отклонению. Отклонение действительного значения угла поворота выходного вала от требуемого измеряется с помощью датчиков рассогласования между преобразованным в цифровой код аналоговыми сигналами задания угла и обратной связи от потенциометрического датчика. Ошибка по положению через основной регулятор положения, устройство дополнительной коррекции и преобразователь цифровой код-ШИМ поступает на усилитель мощности и обрабатывается исполнительным электродвигателем в сочетании с управляемыми электромагнитными муфтами, которые через редуктор поворачивают выходной вал электропривода и датчик обратной связи в соответствии с задающим сигналом. Указанные

принципы построения систем автоматического регулирования нелинейных систем также рассматривались и внедрялись в производственные комплексы такими учеными как Ляпунов А. М., Летов А. М., Жуковский Н. Е. и другими [1 – 3].

С учетом изложенного для дальнейшего исследования принята следующая схема исполнительного следящего электропривода, которая представлена на рис. 1.

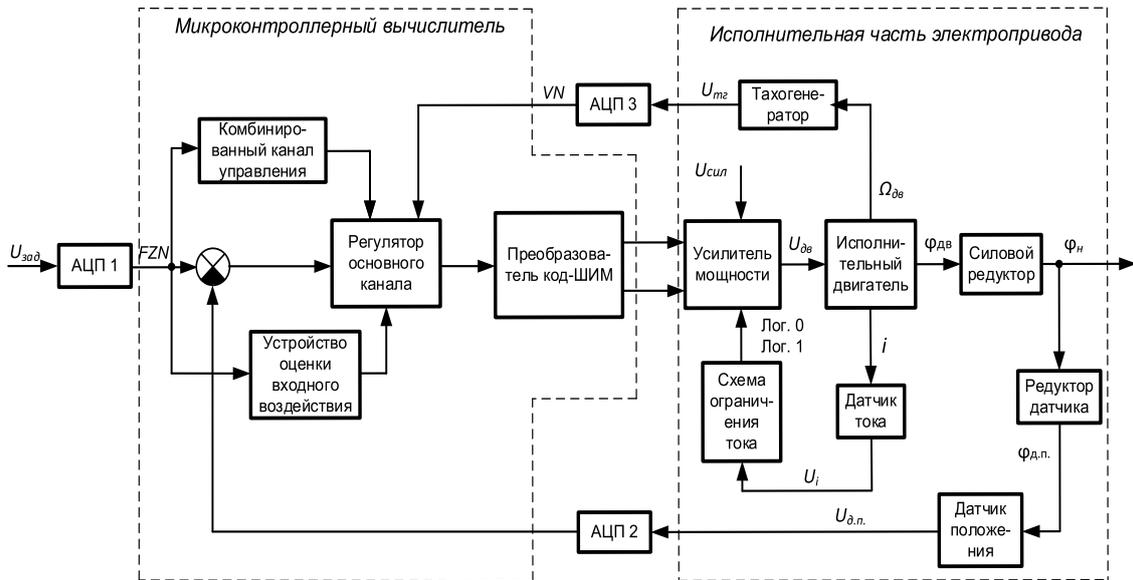


Рис. 1. Схема следящего электропривода

Весомый вклад в описание процессов регулирования и устойчивости в теории автоматического управления внес Солодовников В. В., описав теорию автоматического регулирования следующим образом: «теория управления – это теория динамических систем, основным аппаратом анализа и синтеза которых являются обыкновенные дифференциальные уравнения» [4].

Таким образом, разработка, анализ и регулирование электропривода невозможны без применения дифференциальных уравнений различной сложности. Математическое описание следящего цифрового электропривода рулевого управления включает в себя описание электродвигателя, датчика скорости, механической передачи, датчика положения выходного вала, усилителя мощности, цифрового микроконтроллерного регулятора.

Математическое описание электродвигателя имеет вид [5 – 7].

Здесь сухое трение, обусловленное подшипниками, щеточно-коллекторным узлом и трением первых ступеней механической передачи представлено в выражении $M_{ст}^{дв}$ и включает составляющие трения покоя, момент которого направлен против момента нагрузки и компенсирует его до начала движения, и трения движения, которое устанавливается после преодоления $M_{ст}^0$.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U(t) = R_{\text{я}} \cdot i(t) + L_{\text{я}} \cdot \frac{d}{dt} i(t) + C_e \cdot \Omega_{\text{дв}}(t); \\
 M_{\text{дв}}(t) = C_m \cdot i(t); \\
 M_{\text{пуль}}(t) = K_{\text{вт}}^{\text{пуль}} \cdot \Omega_{\text{дв}}(t) \cdot \cos(2z \cdot \phi_{\text{дв}}(t)) + M_{\text{пуль}}^0 \cdot \sin(2z \cdot \phi_{\text{дв}}(t)); \\
 M_{\text{д1}}(t) = M_{\text{дв}}(t) - \frac{M_{\text{н}}(t)}{i_p} - M_{\text{пуль}}(t); \\
 M_{\text{ст}}^{\text{дв}}(t) = \begin{cases} M_{\text{д1}}(t), \Omega_{\text{дв}}(t) = 0, |M_{\text{д1}}(t)| \leq M_{\text{ст}}^0, \\
 M_{\text{ст}}^0 \cdot \text{sign}(M_{\text{д1}}(t)), \Omega_{\text{дв}}(t) = 0, |M_{\text{д1}}(t)| > M_{\text{ст}}^0, \\
 M_{\text{ст}}^0 \cdot \text{sign}(\Omega_{\text{дв}}(t)), \Omega_{\text{дв}}(t) \neq 0; \end{cases} \\
 M_{\text{д1}}(t) - M_{\text{ст}}^{\text{дв}}(t) = J_{\text{дв}} \cdot \frac{d}{dt} \Omega_{\text{дв}}(t).
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где U – напряжение питания электродвигателя, В, $\Omega_{\text{дв}}$ – частота вращения вала двигателя, рад/с, $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление обмотки якоря электродвигателя, Ом, $L_{\text{я}}$ – индуктивность обмотки якоря, мГн, i – ток якоря электродвигателя, А, $J_{\text{дв}}$ – момент инерции электродвигателя, кг·м², C_e – коэффициент противо-ЭДС, В·с/рад, C_m – коэффициент момента, Н·м/А, T_s – Электромагнитная постоянная времени, с, $K_{\text{вт}}^{\text{пуль}}$ – коэффициент момента вязкого трения зубцовых пульсаций, Н·м·с/рад, $M_{\text{пуль}}^0$ – амплитуда момента зубцовых пульсаций, Н·м, $2z$ – коэффициент зубчатых пульсаций, $M_{\text{ст}}^0$ – постоянная составляющая момента сухого трения, Н·м, i_p – передаточное число механической передачи, $\phi_{\text{дв}}$ – угол поворота вала двигателя, рад.

В качестве датчика обратной связи по частоте вращения электродвигателя используется тахогенератор постоянного тока. Уравнение напряжения на тахогенераторе имеет вид:

$$U_{\text{ТГ}}(t) = k_1 \cdot \Omega_{\text{дв}}(t) + k_1 \cdot k_2 \cdot \Omega_{\text{дв}}(t) \cdot \sin(\Omega_{\text{дв}}(t) \cdot t), \quad (2)$$

где k_1 – крутизна характеристики тахогенератора, В·с/рад; k_2 – коэффициент пульсаций; $\Omega_{\text{дв}}$ – скорость исполнительного двигателя, рад/с.

Описание динамики процессов в механической передаче представлено системой дифференциальных уравнений [8 – 10].

В качестве датчика угла поворота выходного звена использован переменный резистор, кинематически связанный через прямозубую двухступенчатую передачу с выходным звеном редуктора.

Коэффициент безлюфтовой передачи «выходной вал – датчик положения» $i_p^{\text{дп}}$ определен из конструкции механической передачи. Коэффициент передачи датчика положения представлен безынерционным звеном с коэффициентом усиления $K_{\text{дп}}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_3(t) = \begin{cases} \frac{\phi_{дв}(t)}{i_p} - \phi_H(t) - \frac{\alpha_3}{2}, & \left| \frac{\phi_{дв}(t)}{i_p} - \phi_H(t) \right| \geq \frac{\alpha_3}{2}, \\ 0, & \left| \frac{\phi_{дв}(t)}{i_p} - \phi_H(t) \right| < \frac{\alpha_3}{2}; \end{cases} \\ M_H(t) = C \cdot \phi_3(t) + K_{вт}^{\Omega} \cdot \frac{d\phi_3(t)}{dt}; \\ M_{ст}^H(t) = \begin{cases} M_{ст}^1(t) = M_{ст}^2 + 0,1 \cdot |M_H(t)| \\ M_H(t), \Omega_H(t) = 0, |M_H(t)| \leq M_{ст}^1(t), \\ M_{ст}^1(t) \cdot \text{sign}(M_H(t)), \Omega_H(t) = 0, |M_H(t)| > M_{ст}^1(t), \\ M_{ст}^1(t) \cdot \text{sign}(\Omega_H(t)), \Omega_H(t) \neq 0; \end{cases} \\ M_H(t) - M_{ст}^H(t) - K_{вт}^H \cdot \Omega_H(t) - C_{ш} \cdot \phi_H(t) - M_{вн}(t) = J_H \cdot \frac{d}{dt} \Omega_H(t). \end{array} \right. \quad (3)$$

где ϕ_H – угол поворота выходного вала, рад, ϕ_3 – угол «закрутки» вала нагрузки относительно вала двигателя с учетом зазора, рад, α_3 – величина зазора, рад, C – жесткость механической передачи, Н·м/рад, $K_{вт}^{\Omega}$ – коэффициент вязкого трения, отражающий потери в механической передаче, Н·м·с/рад, $M_{ст}^H$ – момент сухого трения нагрузки, Н·м, $K_{вт}^H$ – коэффициент вязкого трения нагрузки, Н·м·с/рад, Ω_H – частота вращения выходного вала, рад/с, $C_{ш}$ – коэффициент шарнирного момента, Н·м/рад, $M_{вн}$ – внешний момент нагрузки, Н·м, J_H – момент инерции нагрузки, кг·м², $M_{ст}^2$ – постоянная составляющая момента сухого трения на валу нагрузки, Н·м, i_p – передаточное число механической передачи, $i_p^{дп}$ – коэффициент редукции «выходной вал – ось датчика обратной связи».

Усилитель мощности представлен безынерционным пропорциональным звеном с коэффициентом передачи K_{γ} , которое переводит единицы младшего разряда ЦМР в сигнал скважности ШИМ, умножаемый на напряжение питания, с нелинейностями и насыщением по напряжению.

В усилителе мощности предусмотрена токовая отсечка с токоограничением. Датчик тока измеряет напряжение тока якоря и подает сигнал на отключение питающего напряжения. При уменьшении тока якоря питающее напряжение подается на обмотки якоря [11, 12].

Для формирования структуры управляющего сигнала в системе использован микроконтроллер с реализацией дискретизации алгоритма вычисления управляющего воздействия 1000 Гц.

На рис. 2 представлена математическая модель исполнительных звеньев электропривода, используемая для определения поведения системы при влиянии различных параметрических возмущений. Входным управляющим воздействием при моделировании данной системы является сигнал различной частоты, амплитуды и формы.

Напряжение питания лежит в пределах от 35 до 60 В, при этом за базовое принято напряжение питания – 45 В, в свою очередь граничные значения 35 В и 60 В определяют рабочий диапазон системы и также допустимы при ее работе.

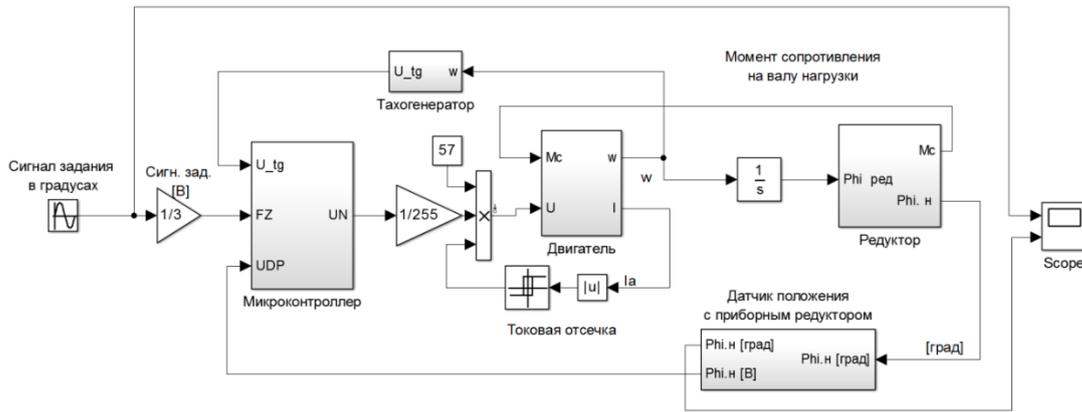


Рис. 2. Математическая модель исполнительных звеньев электропривода

В процессе работы электропривод должен выполнять перемещение выходного звена с заданной точностью и скоростью, независимо от различных параметрических неопределенностей. Основными критериями, характеризующими качество разрабатываемого изделия, являются его частотные характеристики, описывающие реакцию системы на входной сигнал в части соотношения амплитуд и фаз входного и выходного сигналов. Данные критерии качества систем прорабатывались в своих трудах уже упомянутыми Солодовниковым В. В., Летовым А. М., Красовским Н. Н. и другими.

На рис. 3 приведены амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) высокودинамичного следящего цифрового электропривода рулевого управления с реализацией предложенных технических решений, которые демонстрируют достигнутый технический результат.

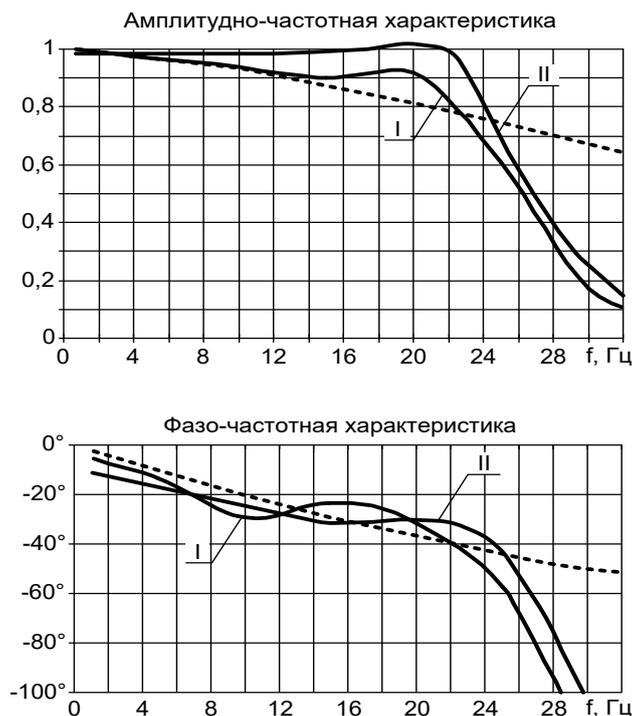


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ высокودинамичного следящего цифрового электропривода

АЧХ и ФЧХ сняты в ходе отработки входных синусоидальных задающих воздействий с амплитудами 3° (I) и $0,3^\circ$ (II). Для сравнения на рис. 3 пунктиром представлены АЧХ и ФЧХ блока эталонной модели, в качестве которой использовано апериодическое звено первого порядка. Согласно представленным данным на рис. 3 АЧХ имеют полосу пропускания по уровню -3 дБ составляет 24 Гц для характеристики (I) и 25 Гц для характеристики (II). Полоса пропускания на ФЧХ по уровню -45 градусов составляет 23 Гц для характеристики (I) и 25 Гц для характеристики (II) [13 – 14].

Заключение

Современные следящие электроприводы представляют собой довольно сложные динамические системы, включающие целые группы различных устройств, которые, несмотря на различные характеристики (линейные или нелинейные), должны стабильно работать в составе единого объекта.

В данной статье рассматривались вопросы построения системы следящего электропривода, с исследованием его динамических показателей, которые определяют, в конечном счете, точность и эффективность применения электропривода. Динамические характеристики чаще всего определяются параметрами амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик (АЧХ и ФЧХ). Представленные характеристики позволяют судить об успешном синтезе математической модели и создают предпосылки к переходу от математической реализации моделирующих структур к программной реализации алгоритмических блоков и их дальнейшей стендовой отработке.

Библиографический список

1. **Ляпунов, А.М.** Общая задача об устойчивости движения. /Ляпунов А.М. – М.: Гостехиздат, 1950. 471 с.
2. **Летов, А.М.** Состояние проблемы устойчивости в теории автоматического регулирования // Тр. II Всесоюзного совещания по автоматическому регулированию. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 1. 217 с
3. **Жуковский, Н.Е.** Теория регулирования хода машин. М.: Медиа, 2012. 145 с.
4. **Солодовников, В.В.** Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М.: Физматгиз, 1960. 656 с.
5. **Борцов, Ю.А.,** Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1984. – 216 с., ил.
6. **Рабинович, Л.В.,** Петров Б.И., Терсков В.Г., Сушков С.А., Панкратьев Л.Д. Проектирование следящих систем. – М.: «Машиностроение», 1969. – 498 с.
7. **Изерман, Р.** Цифровые системы управления: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с., ил.
8. **Кузовков, Н.Т.** и др. Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации/ М.: Машиностроение, 1978. – 222 с., ил.
9. **Квакернаак, Х.,** Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир. 1977. 650 с.
10. **Тимофеев, Б. П.,** М. Ю. Сачков Передаточные механизмы приводов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 103 с.

11. **Башарин, А.В.**, Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учеб. Пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1982. – 392 с., ил.
12. **Эйкхофф, П.** Основы идентификации систем управления. Перевод с английского. Под ред. В.А. Лотоцкого и А.С. Манделя. Изд. «Мир», М. 1975. 685 с.
13. **Зайцев, Г.Ф.** Синтез следящих систем высокой точности. Киев, Техника, 1971. – 191 с
14. **Верховин, Г.А.** Справочник конструктора точного приборостроения /Г.А. Верховин, Е.Н. Головешкин, В.А. Голубков и др.; Под общ. ред. К.Н. Явленского, Б.П. Тимофеева, Е.Е. Чаадаевой. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989г.

Y.M. Krylov, A.A. Agapov, A.M. Litvinenko

MATHEMATICAL MODELING OF HIGHLY DYNAMIC TRACKING DIGITAL ELECTRIC DRIVES

Voronezh State Technical University

Abstract. This article discusses the issues of synthesis of a highly dynamic tracking electric drive, providing amplitude-phase-frequency characteristics under the influence of destabilizing factors on it.

Keywords: tracking electric drive, mathematical modeling, dynamic characteristics.

References

- [1] Lyapunov A.M. The general problem of motion stability. M.: Gostekhizdat, 1950. 471 p.
- [2] Letov A.M. The state of the problem of stability in the theory of automatic regulation // Tr. II of the All-Union Meeting on Automatic Regulation. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1955. Vol. 1. 217 p 3.
- [3] Zhukovsky N.E. Theory of regulating the movement of machines. M.: Media, 2012. 145 p. 4.
- [4] Solodovnikov V.V. Statistical dynamics of linear automatic control systems. M.: Fizmatgiz, 1960. 656 p.
- [5] Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. Electromechanical systems with adaptive and modal control. – L.: Energoatomizdat. Leningr. Publishing House, 1984. – 216 p., ill.
- [6] Rabinovich L.V., Petrov B.I., Terskov V.G., Sushkov S.A., Pankratiev L.D. Design of tracking systems. - M.: "Mechanical Engineering", 1969. – 498 p.
- [7] Izerman R. Digital control systems: Translated from English – M.: Mir, 1984. – 541 p., ill.
- [8] Kuzovkov N.T. et al. Continuous and discrete control systems and identification methods/ M.: Mashinostroenie, 1978. – 222 p., ill.
- [9] Kvakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. – M.: Mir. 1977. 650 p.
- [10] Timofeev B. P., M. Y. Sachkov Transmission mechanisms of drives. – St. Petersburg: ITMO University, 2015. – 103 p
- [11] Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovsky G.G. Electric drive control: Textbook. Handbook for universities. – L.: Energoatomizdat. Leningr. edition. 1982. – 392 p., ill.
- [12] Eickhoff P. Fundamentals of identification of control systems. Translated from English. Edited by V.A. Lototsky and A.S. Mandel. Publishing house "Mir", M. 1975. 685 p.
- [13] Zaitsev G.F. Synthesis of high-precision tracking systems. Kiev, Technika, 1971. – 191 s
- [14] Verkhovin G.A. Handbook of the designer of precision instrumentation / G.A. Verkhovin, E.N. Goloveshkin, V.A. Golubkov, etc.; Under the general editorship of K.N. Yavlensky, B.P. Timofeev, E.E. Chaadaeva. – L.: Mechanical engineering. Leningr. department, 1989.

УДК 621.311.1

А.В. Смирнова, А.Б. Дарьенков, В.В. Соколов

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «ВИЕННА»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье реализован асинхронный алгоритм управления силовыми транзисторами. Контур напряжения, настроенный на модульный оптимум, стабилизирует выходное напряжение на уровне в (600-650) В. При спектральном анализе потребляемого тока суммарный коэффициент нелинейных искажений (*THD*) не превысил 2%. В ПО *Matlab* была разработана имитационная модель трехфазного ККМ на основе преобразователя «Виенна» с замкнутым контуром тока и напряжения. Выполнен анализ кривой потребляемого тока с помощью встроенной функции в ПО *Matlab* для быстрого преобразования Фурье, с помощью которого был определен параметр *THD*.

Ключевые слова: высшие гармонические составляющие тока, коррекция коэффициента мощности, электромагнитная совместимость, нелинейные искажения.

С момента появления электросетей и по сегодняшний день остается актуальной задача обеспечения качества, оптимизации и снижения стоимости в области электроснабжения. Эффективность электроснабжения зависит не только от источника энергии, но и от всех его потребителей. Если в электрической сети переменного тока есть потребители нелинейного характера, то токи принимают несинусоидальный вид. Эти процессы приводят к увеличению высших гармоник тока, что приводит к нежелательному росту реактивной мощности и искажений. Это приводит к нагрузке источника энергии дополнительными мощностями, увеличению потерь энергии в процессе передачи, искажению формы напряжения и даже уменьшению его амплитуды из-за перегрузки генераторов.

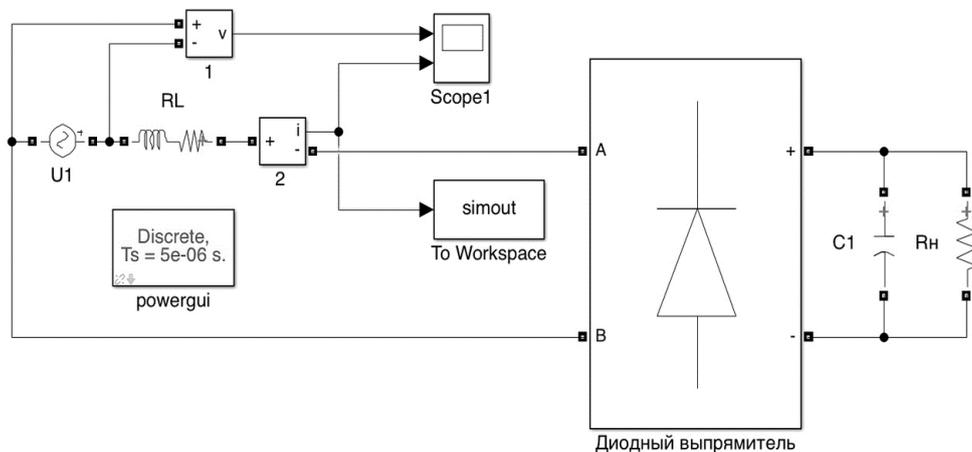


Рис. 1. Однофазный мостовой выпрямитель, работающий на активно-емкостную нагрузку

Типичным примером устройства, генерирующего высшие гармонические составляющие в питающую сеть, является однофазный диодный выпрямитель, работающий на активно-емкостную нагрузку. На рис. 1 показана схема однофазного диодного выпрямителя, работающего на активно-емкостную нагрузку.

Временные диаграммы, описывающие работу этого преобразователя, представлены на рис. 2.

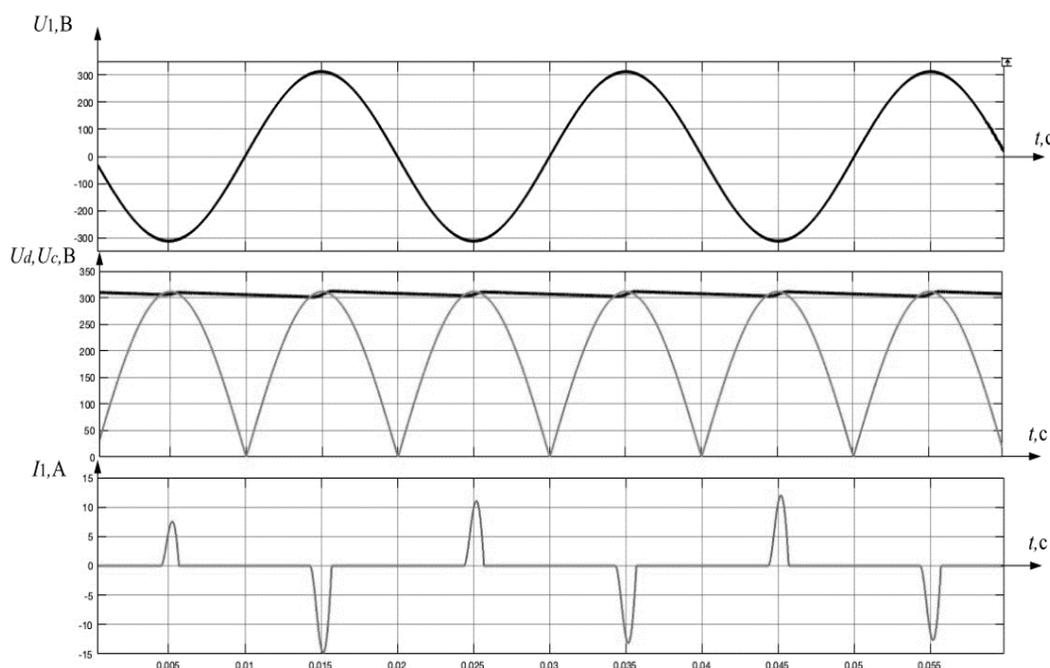


Рис. 2. Временные диаграммы кривой питающего напряжения и потребляемого тока однофазным мостовым выпрямителем, работающем на активно-емкостную нагрузку

Из данной временной диаграммы видно, что кривая потребляемого тока из сети имеет форму в виде «колов» тока. Это связано с тем, что ток может потребоваться из сети только в моменты, когда напряжение нагрузки u_n больше, чем напряжения конденсатора u_c , а так как выпрямленное напряжение изменяется по модулю синуса, то эти моменты достаточно малы.

Используя встроенную функцию быстрого преобразования Фурье блока «*powergui*», называемого в ПО *Matlab* «*FFT Analysis*» можно узнать значение параметра *THD*. Благодаря данному параметру можно судить о влиянии преобразователя на ЭМС устройств. Кривая потребляемого тока однофазным ККМ имеет значение $THD=200,16\%$. Данное значение не укладывается в значение 8% , предъявляемое ГОСТом [1] для напряжения $0,4\text{ кВ}$ в однофазной сети общего назначения. Поэтому для увеличения параметра *THD* необходимо применить один из способов улучшения электромагнитной совместимости.

В настоящее время распространенным методом улучшения качества электроэнергии является компенсация только реактивной мощности с помощью использования больших пассивных элементов, таких как конденсаторы.

Другим относительно новым методом улучшения качества электроэнергии является использование активных корректоров коэффициента мощности (ККМ).

Суть преобразователей с активной коррекцией коэффициента мощности заключается в потреблении электроэнергии в наиболее благоприятной форме, аналогичной активной нагрузке. Энергия затем передается потребителю с разнообразной нагрузкой.

На сегодняшний день для улучшения электромагнитной совместимости устройств с питающей сетью используют два основных метода: пассивную и активную коррекцию коэффициента мощности.

К пассивной коррекции коэффициента мощности можно отнести элементы, принцип которых основан на фильтрации кривой потребляемого тока. Данные элементы не содержат регулирующих напряжение или ток устройств. Простейшим примером данного вида коррекции является L фильтр [2].

Пассивная коррекция не позволяет добиться чистой синусоидальной формы кривой тока синфазно с питающим напряжением, поэтому на сегодняшний день всё чаще используют активную коррекцию коэффициента мощности. Данные преобразователи включают в себя полупроводниковые приборы, работающие по сигналам, которые формируются системой управления. К активной коррекции можно отнести два основных преобразователя: корректор коэффициента мощности (ККМ) и активный выпрямитель (АВ).

На рис. 3 представлен трехфазный корректор коэффициента мощности по схеме «Виенна» [1]. По принципу действия данный тип корректора подобен однофазному ККМ, так как фазные токи в нем формируются независимо друг от друга.

Данный корректор имеет ряд технологических особенностей: можно независимо управлять каждой фазой, низкий уровень напряжения на транзисторах, не превышающий половины выходного напряжения выпрямителя.

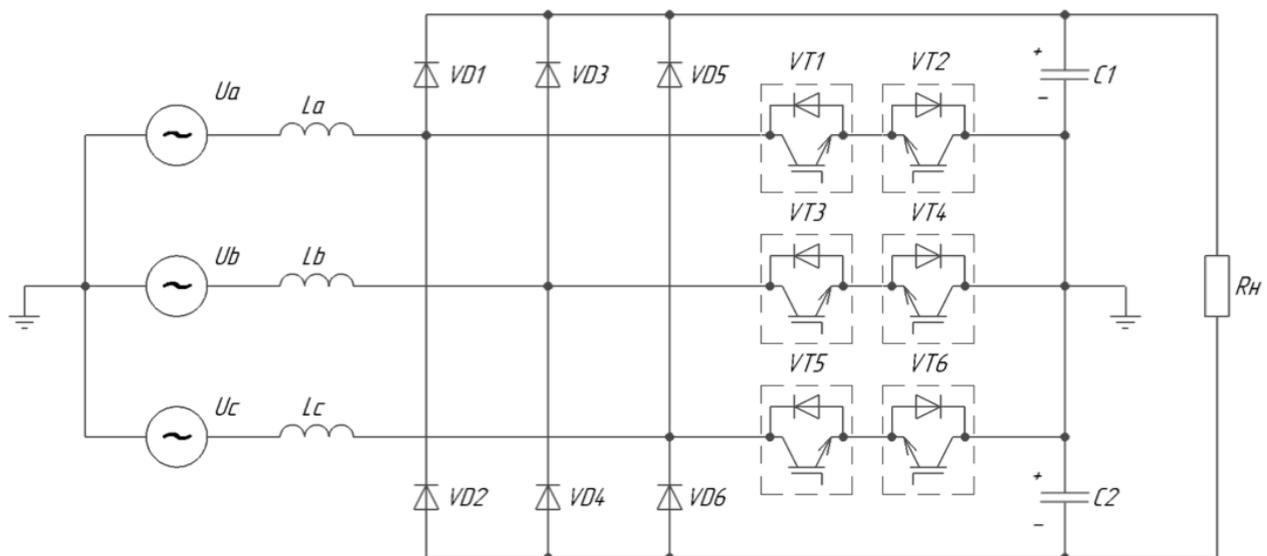


Рис. 3. Трехфазный корректор коэффициента мощности по схеме «Виенна»

Данное устройство реализует алгоритм асинхронного управления со следжением за фазным током (рис. 4).

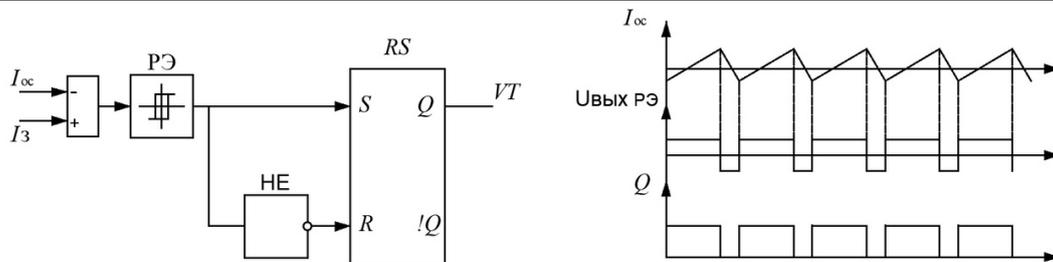


Рис. 4. Принцип асинхронного управления

На рис. 3 изображена силовая часть преобразователя по схеме «Виенна». Здесь L_a, L_b, L_c – сетевые накопительные дроссели, $VT1-6$ – силовые транзисторы. На схеме изображены *IGBT* транзисторы, однако также могут использоваться и *MOSFET* транзисторы, все зависит от результатов теплового расчета, производимого проектировщиком для конкретного устройства. Конденсаторы $C1,2$ – формируют фильтр для сглаживания пульсаций напряжения на выходе звена постоянного тока. Также они формируют нулевую точку, необходимую для правильной работы схемы. Принципиально эта схема представляет собой три однофазных ККМ, работающих параллельно, со сдвигом по фазе 120° эл. град. относительно друг друга. Поскольку в схеме присутствуют три однофазных ККМ, то для каждого используется своя независимая система управления.

Функциональная схема асинхронного алгоритма управления ККМ включает в себя:

- *RS* триггер, формирующий сигнал управления силовым транзистором $VT1$;

- сумматор, на вход «+» которого поступает сигнал задания $I_з$ нужный по амплитуде и форме потребляемого тока, на другой вход поступает сигнал с обратной связи по току $I_{ос}$, определяемый с помощью датчика тока, это реальное значение тока;

- «РЭ» – релейный элемент с заданной петлей гистерезиса;

- «НЕ» – Логический элемент «НЕ», необходимый для реализации *D* триггера. *D* триггер изменяется своё состояние аналогично сигналу с релейного элемента. Если на выходе РЭ появится сигнал логической 1, то на выходе *RS* триггера *Q* формируется логическая 1, при логическом 0 на выходе *Q* будет сформирован логический 0.

При данном алгоритме управления изменение состояния транзистора происходит с учетом ширины петли гистерезиса РЭ, т.е. когда значение заданного тока достигнет максимального отклонения от заданного в ту или иную сторону. В этом случае переключение транзистора может происходить в любой момент времени, из-за чего данный алгоритм управления и называется асинхронным. При таком алгоритме управления ККМ работает в следящем режиме [4].

С целью более детального рассмотрения и изучения электромагнитных процессов, происходящих при работе ККМ, была разработана имитационная модель в ПО *MATLAB/Simulink* (рис. 5).

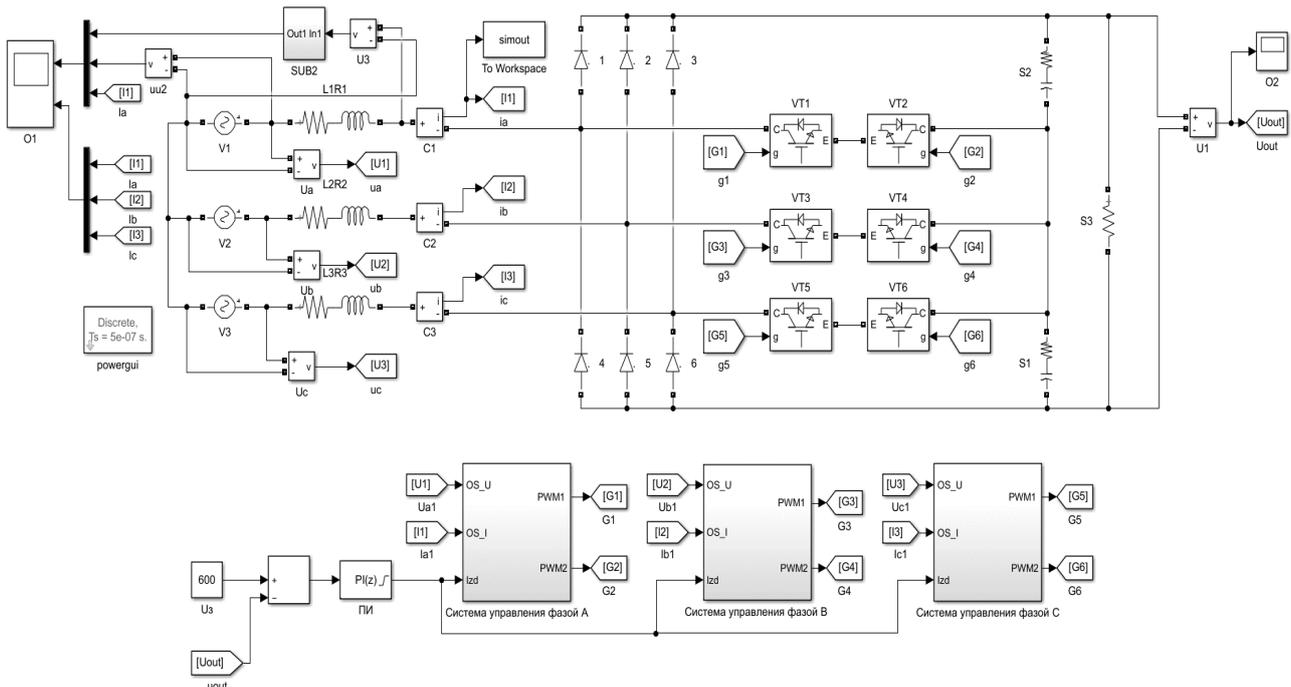


Рис. 5 Имитационная модель трехфазного ККМ на основе преобразователя «Виенна» с замкнутыми контурами тока и напряжения

В данной модели преобразователь состоит из трёх параллельно-независимо работающих однофазных ККМ на основе однофазного преобразователя «Виенна». Отличием данного ККМ является то, что вместо одного выходного конденсатора последовательно установлены два, общая точка которых соединена с транзисторной сборкой $VT1-VT6$.

Результатом моделирования разработанной электрической схемы и системы управления являются графики фазного напряжения и потребляемого тока, а также напряжение на ключе (рис. 6). Видно, что отсутствует сдвиг по фазе между током и напряжением, сама кривая тока практически повторяет синусоиду.

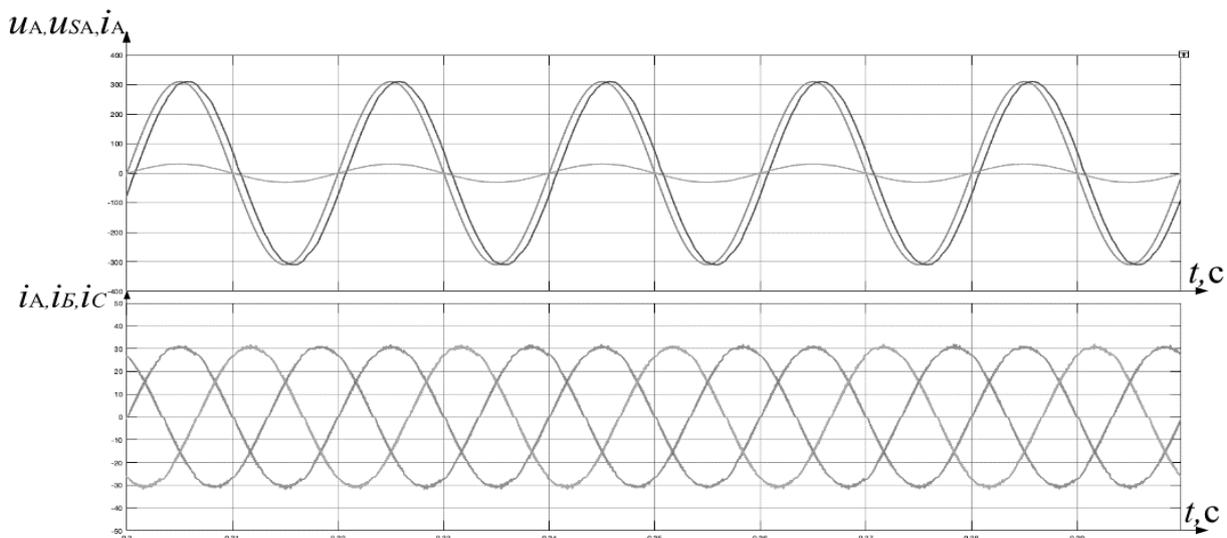


Рис. 6. Осциллограммы фазного напряжения, потребляемого тока, напряжения на ключе

Для данного преобразователя проведен спектральный анализ кривой потребляемого тока, используя быстрое преобразование Фурье в ПО *MATLAB/Simulink* (рис. 7) [3].

Видно, что кривая потребляемого тока одной фазы ККМ имеет значение $THD = 1,48\%$. Данное значение укладывается в значение 8% , предъявляемое ГОСТом.

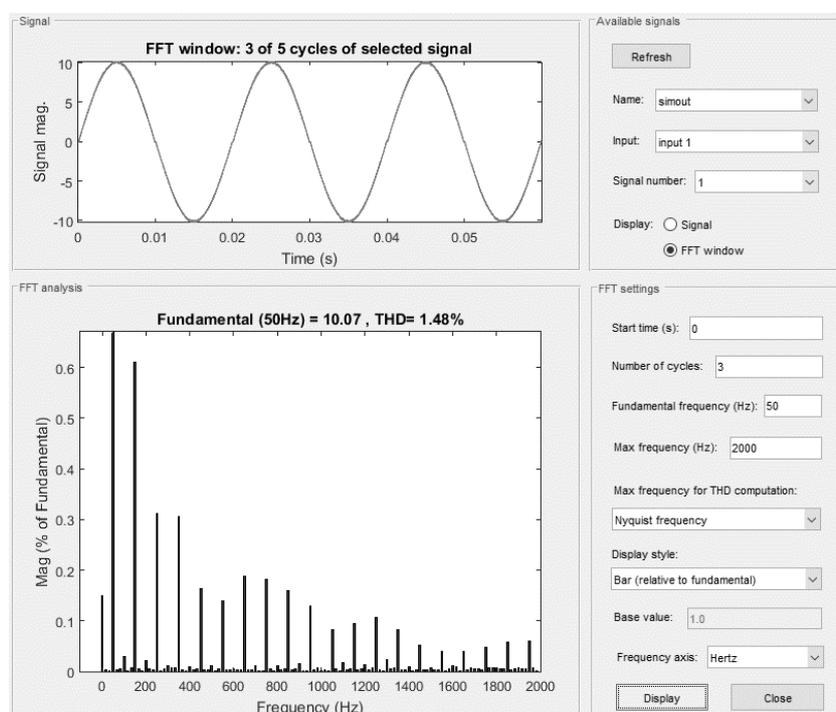


Рис. 7. Результаты анализа кривой потребляемого тока фазы А

Исследование выполнено при поддержке АНО «Нижегородский НОЦ» и ОАО «РЖД» в рамках договора от 31.07.2024 г. №5788514.

Библиографический список

1. **Ваняев, В.В.** Преобразовательная техника: учеб. пособие /В.В. Ваняев. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 135 с.
2. **Филипенков, И. В.** Корректор коэффициента мощности. Молодой ученый 2017, 90,87.
3. **Герман-Галкин, С.Г.** Школа MATLAB. // Силовая электроника, 2011, No 4.
4. **Семенов, Б. Ю.** Силовая электроника: от простого к сложному. / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.- 416 с.:ил.
5. **Забродин, Ю.С.** Промышленная электроника: Учебник для вузов. / Ю.С. Забродин – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
6. **Кулик, В.Д.** Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи: учебное пособие. / В.Д. Кулик ГОУВПО СП.ГТУРП. – СПб., 2010. -90с.
7. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
8. **Розанов, Ю.К.** Силовая электроника: учебник для вузов. / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. 2-е изд., стереотипное. — М. : Издательский дом МЭИ, 2009. — 632 с.: ил.
9. **Харлов, Н.Н.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие. /

Н.Н. Харлов – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.

10. **Gowthamraj, R.** Chockalingam, A. Voltage Oriented Controller Based Vienna Rectifier for Electric Vehicle Charging Stations. IEEE Access 2021, 9, 50798 – 50809, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068653>.

A.V. Smirnova, A.B. Dar'enkov, V.V. Sokolov

SIMULATION MODEL OF THREE-PHASE VIENNA CONVERTER

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

Abstract. The paper implements an asynchronous control algorithm for power transistors. The voltage circuit adjusted to the modular optimum stabilizes the output voltage at the level of V (600-650) V. In the spectral analysis of the current consumed, the total coefficient of nonlinear distortion (THD) did not exceed 2%. A simulation model of a three-phase CMC based on a Vienna converter with a closed circuit of current and voltage was developed in Matlab software. The analysis of the current consumption curve was performed using the built-in function in Matlab software for fast Fourier transform, which was used to determine the THD parameter.

Key words: higher current harmonics, power factor correction, electromagnetic compatibility, nonlinear distortion.

References

- [1] Vanyaev, V.V. Transformative technology: textbook. the manual / V.V. Vanyaev. – Nizhny Novgorod: NSTU named after R.E. Alekseev, 2020. – 135 p.
- [2] Filippenkov, I. V. Power factor corrector. *Young Scientist* 2017, 90.87.
- [3] Herman-Galkin S.G. MATLAB School. // *Power Electronics*, 2011, No. 4.
- [4] Semenov, B. Y. Power electronics: from simple to complex. / B.Y. Semenov. – M.: SOLON-Press, 2005. - 416 p.:ill.
- [5] Zabrodin, Yu.S. Industrial electronics: Textbook for universities. / Y.S. Zabrodin - M.: Vysshkola, 1982. - 496 c.
- [6] Kulik, V.D. Power electronics. Autonomous inverters, active converters: textbook. / V.D. Kulik GOUVPO SP.GTURP. - SPb., 2010. -90c.
- [7] Meleshin, V.I. Transistorized converter technique / V.I. Meleshin - M.: Tekhnosphere, 2005. - 632 c.
- [8] Rozanov, Yu.K. Power electronics: a textbook for universities. / Y.K. Rozanov, M.V. Ryabchitsky, A.A. Kvasniuk. 2nd edition, stereotype. - Moscow: MPEI Publishing House, 2009. - 632 p.: ill.
- [9] Kharlov, N.N. Electromagnetic compatibility in electric power engineering: A textbook. / N.N. Kharlov - Tomsk: TPU Publishing House, 2007. - 207 c. [10] Gowthamraj, R.; Chockalingam, A. Voltage Oriented Controller Based Vienna Rectifier for Electric Vehicle Charging Stations. *IEEE Access* 2021, 9, 50798 – 50809, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068653>.
- [10] Gowthamraj, R. Chockalingam, A. Voltage Oriented Controller Based Vienna Rectifier for Electric Vehicle Charging Stations. *IEEE Access* 2021, 9, 50798 – 50809, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068653>.

УДК 62-97/-98

Я.К. Старостина, Д.И. Сиразетдинов**ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРАНЗИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ГРУЗОПОДЪЁМНОГО
МЕХАНИЗМА**

Ульяновский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассмотрен транзисторный электропривод, в частности одни из основных его частей – электродвигатель и транзисторный регулятор напряжения, в различных режимах работы грузоподъемного механизма. Приведены возможные средства повышения производительности данной системы путём уменьшения потерь электродвигателя и повышения качества работы регулятора напряжения.

Ключевые слова: транзисторный электропривод, транзисторный регулятор напряжения, потери асинхронного двигателя, грузоподъемный механизм.

Электроприводы подъемного оборудования в большинстве случаев, оборудованы асинхронными двигателями. На данный момент такие электроприводы имеют моральный износ, но не выработанный физический ресурс, это связано с устаревшими системами управления электроприводов подъемного оборудования. Модернизация путем полной замены привода является затратной, поэтому более целесообразным является замена системы управления.

Большой вклад в развитие грузоподъемных электроприводов внесли ученые Р.П. Герасимьяк, И.И. Петров, В.И. Ключев, В.М. Терехов, С.А. Ковчин, А.Е. Козярук, В.Н. Мещеряков, Ю.В. Алексеев, А.Б. Масандилов, М. Шеффлер, А.Г. Яуре, Е.М. Певзнер, Р.Шёнфельд и др.

В составе электроприводов грузоподъемных механизмов используют следующие типы электродвигателей:

- 1) постоянного тока с последовательным или независимым возбуждением;
- 2) асинхронные с короткозамкнутым и фазным ротором, многоскоростные.

Электроприводы на базе двигателей постоянного тока в подъемных механизмах применяют редко (например в кранах с большой высотой подъема и самоходных кранах), где необходимо и важно глубокое и плавное регулирование скорости. Электроприводы постоянного тока обычно выполнены по системе тиристорный преобразователь – двигатель [1].

В механизмах подъема с небольшими тяговыми усилиями (например лебедки, тельферы) применяются электроприводы на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при управлении от магнитных пускателей, поскольку они имеют повышенные динамические нагрузки [1]. Этот тип электроприводов в данной статье не рассматривается.

Электроприводы на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с управлением от тиристорных преобразователей напряжения, установленных в цепях статора, применяются достаточно редко [2, 3], по причине того,

что такой способ управления в основном применяется для обеспечения необходимых пусковых режимов.

Электроприводы на основе асинхронного двигателя с фазным ротором с реостатным регулированием имеют широкое распространение. Система управления основана на кулачковых или магнитных контроллерах. Данные электроприводы обеспечивают ступенчатый пуск, регулирование скорости, торможение. Однако качество регулирования невысокое, так как регулирование скорости вниз возможно получить только в двигательном режиме с нагрузкой. При невысоких значениях нагрузки на валу и в тормозном режиме работы регулирование скорости вниз можно получить при периодическом наложении тормоза [4, 5].

Несмотря на необходимость применения в системе управления датчика скорости для регулирования частоты вращения, широкое распространение получили электроприводы механизмов подъёма на основе асинхронного двигателя с фазным ротором и тиристорными преобразователями напряжения в цепи статора, а также наличием добавочного сопротивления в цепи ротора. Однако энергетически показатели таких электроприводов несколько хуже, чем при реостатном регулировании, по причине того, что существует необходимость торможения противовключением, а также ухудшением $\cos\varphi$ и наличием высших гармоник из-за несинусоидальности тока статора [3].

При таком важном преимуществе, как высокий КПД, и возможной рекуперации энергия скольжения в сеть, асинхронные вентильные каскады не получили широкого распространения в электроприводах грузоподъемных механизмов, по причине того, что для согласования уровней напряжений роторной цепи и сети необходимо применение силового трансформатора, что в свою очередь приводит к увеличению массогабаритных показателей и, как следствие, увеличение его стоимости [6].

К современному технологическому оборудованию предъявляются требования по улучшению качества управления параметрами технологического процесса. Плавное нарастание и снижение скорости на механизме перемещения позволяет избежать раскачивания груза, а на механизме подъёма избежать рывков. Такой регулятор имеет небольшие весогабаритные показатели в сравнении с конкурентами (релейно-контакторными схемами), и при этом обладает более высокими показателями надёжности.

Грузоподъёмные механизмы (ГПМ) различного применения (лифты, краны, подъёмники) выдвигают идентичные требования к электроприводу, входящему в их состав: точное управление, обеспечение безопасности подъёма, эффективность подъёма грузов.

Транзисторные двигатели представляют собой электромеханические устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии в механическую. Такие электродвигатели получили широкое применение в различных областях, начиная с малой промышленности и заканчивая робототехникой и автомобилестроением.

В основе работы транзисторных двигателей лежит принцип управления потоком электрического тока с помощью полупроводниковых транзисторов.

Транзисторы, в свою очередь, регулируются специальными сигналами управления, что даёт возможность регулировать не только скорость, но и направление вращения электродвигателя.

Структурная схема транзисторного регулятора напряжения с коллекторной обратной связью приведена на рис. 1.

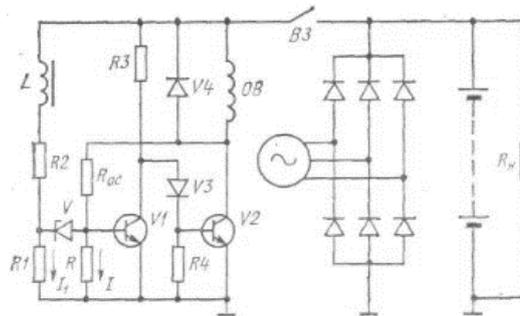


Рис. 1. Структурная схема ТрРН с коллекторной обратной связью

Использование такого транзисторного регулятора напряжения открывает возможность осуществлять плавный пуск, а также динамическое торможение АД.

Транзисторные двигатели на базе асинхронного двигателя (АД) способны не только отвечать этим требованиям, но и предоставлять другие преимущества их использования: точное регулирование скорости и направления, высокая эффективность и мощность, надёжность и долговечность, компактность и гибкость конструкции [7, 8].

Поэтому одним из актуальных вопросов при модернизации существующих электроприводов грузоподъёмных механизмов является повышение производительности.

Прежде чем перейти к рассмотрению производительности транзисторного двигателя при различных режимах работы грузоподъёмного механизма, нужно выделить эти самые режимы работы. Согласно ГОСТ 25825-83 устанавливаются следующие режимы работы ГПМ в зависимости от условий их эксплуатации (с машинным приводом):

Лёгкий режим (Л) подразумевает большие перерывы в работе механизма, редкую работу с номинальными грузами, малую скорость выполнения задач, малое число включений в час рабочего времени.

Средний режим (С) основан на работе с грузами различной величины (в основном с близкими к номинальным), средней скоростью передвижения, средним числом включений в час и средними перерывами в работе механизма.

Тяжёлый режим (Т) характеризуется непрерывной работой с грузами, вес которых близок к номинальному, а иногда достигает максимального, высокими скоростями передвижения, большим числом включений в час.

Рассмотрим возможные пути повышения производительности (КПД) на базе конкретного асинхронного двигателя малой мощности с транзисторным регулятором напряжения в тяжёлом режиме работы (с грузами максимально допустимой массы).

Принимаем следующие параметры режима работы:

$$V_H = 0.2 \frac{\text{М}}{\text{с}}; m_1 = 50 \text{ кг}; m_{\text{ГН}} = 100 \text{ кг},$$

где V_H – номинальная скорость, m_1 – масса механизма подъёма с грузозахватом, $m_{\text{ГН}}$ – номинальная масса груза.

Номинальная мощность требуемого АД должна удовлетворять условию:

$$P_H \geq K_3 \cdot P_{\text{max}} = K_3 \cdot F_{\text{max}} \cdot V_H = 1.1 \cdot 1470 \cdot 0.2 = 323.4 \text{ [Вт]} \quad (1)$$

где $K_3 = 1.1$ – коэффициент запаса.

Максимальное усилие, развиваемое при подъёме грузоподъёмным роботом-манипулятором максимального груза на максимальном ускорении:

$$F_{\text{max}} = g \cdot (m_1 + m_{\text{ГН}}) = 9.8 \cdot (50 + 100) = 1470 \text{ [Н]} \quad (2)$$

Выбираем асинхронный двигатель серии 4АА63В4У3 с синхронной частотой вращения 1500 об/мин с параметрами, приведёнными в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики асинхронного двигателя

Типоразмер АД	P_H , кВт	I_H , А	Электромагнитные нагрузки			Энергетические показатели	
			B_δ , Тл	A , А/м	J , А/мм ²	$\cos \varphi$	η , %
4АА63В4У3	0.37	1.195	0.87	18900	8.4	0.69	68

Мощность на выходе рассчитывается по следующей формуле:

$$P_2 = P_H - \sum P, \quad (3)$$

где P_H – номинальная мощность электродвигателя, $\sum P$ – сумма всех учитываемых потерь двигателя.

Под учитываемыми потерями понимаются следующие потери: в стали основные, добавочные в стали, полные в стали, механические, добавочные при номинальном режиме, электрические в обмотках статора и ротора. В качестве примера ниже приведена формула расчёта основных потерь в стали. Конкретные формулы для расчёта остальных потерь можно уточнить в специализированных учебных пособиях или учебниках.

Потери в стали основные:

$$P_{\text{ст.осн.}} = P_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}), \quad (4)$$

где $P_{1.0/50}$ – удельные потери стали, β – показатель степени в зависимости от вида стали, $k_{\partial a}$ и $k_{\partial z}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов, m_a и m_{z1} – масса стали ярма статора и масса стали зубцов статора соответственно, B_a и B_{z1} – расчётные значения индукции.

Сумма всех потерь в двигателе в номинальном режиме:

$$\sum P = P_{\text{ст}} + P_{\text{Э1}} + P_{\text{Э2}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{доб.н.}} \quad (5)$$

КПД электродвигателя можно найти по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_H} \cdot 100\% = \frac{P_H - \Sigma P}{P_H} \cdot 100\% = \frac{P_H - (P_{ст} + P_{Э1} + P_{Э2} + P_{МЕХ} + P_{доб.н})}{P_H} \cdot 100\%. \quad (6)$$

В таком случае мы получим КПД двигателя без учёта дополнительных возможностей снижения общих потерь асинхронного двигателя. Далее приведены некоторые из них: улучшение конструкции обмоток путём использования материалов с меньшими потерями и оптимизации формы обмоток является одним из путей снижения потерь в стали, в общем случае такой метод может привести к снижению потерь на 5-10%; механические потери возможно снизить также на 5-10% путём использования подшипников высокой точности; улучшение изоляции путём применения более совершенных материалов может привести к снижению электрических потерь обмоток статора и ротора на 3-6%.

С учётом рассмотренных вариантов снижения потерь формула КПД электродвигателя будет иметь следующий вид:

$$\eta = \frac{P_H - \left((P_{ст} \cdot (1 - \frac{7.5\%}{100\%})) + (P_{Э1} \cdot (1 - \frac{3\%}{100\%})) + (P_{Э2} \cdot (1 - \frac{3\%}{100\%})) + (P_{МЕХ} \cdot (1 - \frac{7.5\%}{100\%})) + P_{доб.н} \right)}{P_H} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где 7.5% – проценты снижения потерь в стали и механических потерь, 3% – проценты снижения потерь в обмотках статора и ротора.

Сравнивая формулы (6) и (7), можно прийти к заключению, что во втором случае КПД двигателя будет выше за счёт увеличения числителя дроби. Следует отметить, что повешенный КПД будет положительно сказываться на производительности грузоподъёмного механизма.

Также следует отметить, что формулы (1) – (7) справедливы для всех режимов работы грузоподъёмного механизма. Разница будет заключаться лишь в том, что какой массы грузы предстоит поднимать механизму и с какой скоростью он будет это делать.

Ещё одним способом повышения производительности транзисторного электропривода при различных режимах работы грузоподъёмного механизма является использование транзисторов, входящих в состав транзисторного регулятора напряжения, другой частоты. Следует отметить, что этот путь повышения производительности не является универсальным, т.к. частота транзисторов подбирается в каждом случае индивидуально. Рассмотрим ситуацию, когда такая возможность всё же присутствует.

Потери на транзисторном ключе, который работает в ключевом режиме, складываются из трёх составляющих: потери в статическом режиме (P_c); потери в динамическом режиме (P_d); потери на обратном диоде.

Для среднестатистического регулятора потери на обратном диоде составляют всего несколько процентов от общих потерь, а потому в дальнейших расчётах ими можно пренебречь.

Статические потери можно рассчитать по формуле:

$$P_c = U_{кэ} \cdot I_k, \quad (8)$$

где $U_{кэ}$ – падение напряжения коллектор-эмиттер при токе I_k , I_k – ток коллектора.

При расчёте динамических потерь появляются проблемы с большим количеством формул и интегралов. Выходом является использование графического метода, где интегралы превращаются в привычные площади.

Схема работы транзисторного ключа приведена на рис. 2.

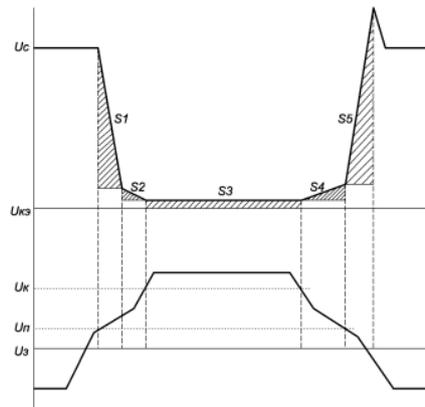


Рис. 2. Схема работы транзисторного ключа

Здесь U_c – коммутируемое напряжение; $U_{кэ}$ – напряжение коллектор-эмиттер; U_k – напряжение перехода транзистора в ключевой режим; U_n – пороговое напряжение транзистора; $U_з$ – напряжение на затворе транзистора.

$$S_1 = \frac{U_c \cdot t_r}{2}, \quad (9)$$

где t_r – длительность включения транзистора.

Аналогичным способом рассчитываются S_2, S_4, S_5 .

Для динамических потерь имеем:

$$S_{\text{сум}} = S_1 + S_2 + S_4 + S_5 = \frac{U_c \cdot t_r}{2} + \frac{0.1 \cdot U_c \cdot t_{\text{пф}}}{2} + \frac{0.1 \cdot U_c \cdot t_{\text{зф}}}{2} + U_c \cdot t_f, \quad (10)$$

$$S_3 = U_{кэ} \cdot t_c = \frac{P_c}{s}, \quad (11)$$

где t_c – длительность открытого состояния транзистора; s – скважность.

Относительный коэффициент k определяется по формуле:

$$k = \frac{S_{\text{сум}}}{S_3}. \quad (12)$$

Этот коэффициент показывает во сколько раз динамические потери больше или меньше статических потерь за один период. Следовательно, динамические потери выражаются:

$$S_{\text{сум}} = S_3 \cdot k. \quad (13)$$

Запишем выражение через мощность:

$$P_d = \frac{P_c}{s} \cdot k. \quad (14)$$

В качестве примера приведён расчёт для транзистора со следующими справочными данными (табл. 2)

Таблица 2

Технические характеристики транзистора

$V_{CE(ON)}, \text{В}$	$t_r, \text{мкс}$	$t_f, \text{мкс}$	$U_c, \text{В}$	$I_k, \text{А}$	$t_c, \text{мкс}$	
					При $f = 1 \text{ кГц}$	При $f = 50 \text{ кГц}$
2.5	0.02	0.03	500	10	500	10

Пользуясь формулами (8) – (14) получаем следующие результаты:

- при частоте 1 кГц мощность статических потерь составляет 12.5 Вт, динамических – 0.6 Вт;
- при частоте 50 кГц мощность статических потерь составляет 12.5 Вт, динамических 28.75 Вт.

Видно, что в первом случае потери транзистора, входящего в состав ТрРН, будут меньше, что положительно скажется на общей производительности регулятора напряжения.

Таким образом, был проведён анализ путей повышения производительности транзисторного электропривода в различных режимах работы грузоподъёмного механизма. Научная новизна заключается в создании эффективных систем управления электроприводов грузоподъёмных механизмов на базе транзисторных, диодно-транзисторных, трансформаторно-транзисторных регуляторах напряжения. Снижение потерь асинхронного двигателя и улучшение работы транзисторного регулятора напряжения положительно сказываются на работе всего транзисторного электропривода грузоподъёмного механизма. Это лишь два пути повышения оптимизации из множества других. Также следует ещё раз подчеркнуть, что данные методы не являются универсальными и следует исходить от требований конкретной системы.

Библиографический список

1. **Вайнсон, А.А.** Подъёмно-транспортные машины: [Учеб. для вузов по спец. "Подъём.-трансп., строит., дор. машины и оборуд."] / А. А. Вайнсон. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989. - 535 с.
2. **Петров Л.П.** Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами / Л.П. Петров, В.А. Ландензон, М.П. Обуховский, Р.Г. Подзолов. – М.: Энергия, 1970. – 128 с
3. **Яуре А.Г., Певзнер Е.М.** Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.
4. **Менский. Б.М.** Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении. М.: Машиностроение, 1972. -248 с.
5. **Мещеряков В.И.** Исследование системы АД, включенной по схеме МДП / В. И. Мещеряков, С.Г. Арчентов, Ю. В. Карих // Вестник ЛГТУ. 2001. – №1. – С. 77–84.
6. **Онищенко Г.Б.** Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
7. **Ткачёва Л.Т., Грищук В.М., Жаркова Н.Н., Грищук В.М.** Безопасность использования грузоподъёмных механизмов. - Минск: 2007. - 89 с.
8. **Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П.** Автоматизированный электропривод с частотным управлением. - Дубна: Гос. ун-т "Дубна", 2020. - 121 с.

Ya.K. Starostina, D.I. Sirazetdinov

PERFORMANCE OF THE TRANSISTOR ELECTRIC DRIVE IN VARIOUS MODES OF OPERATION OF THE LIFTING MECHANISM

Ulyanovsk State Technical University

Abstract. The article considers a transistor electric drive, and in particular one of its main parts – an electric motor and a transistor voltage regulator, in various modes of operation of the lifting mechanism. Possible means of increasing the performance of this system by reducing the losses of the electric motor and improving the quality of the voltage regulator are presented.

Key words: transistor electric drive, transistor voltage regulator, asynchronous motor losses, lifting mechanism.

References

- [1] Vainson, A.A. Lifting and transport machines: [Studies for universities on spec. "Rise.-transp., builds., door. machines and equipment."] / A. A. Vainson. - 4th ed., reprint. and additional - M.: Mechanical Engineering, 1989. - 535 p.
- [2] Petrov L.P. Asynchronous electric drive with thyristor switches / L.P. Petrov, V.A. Landenzon, M.P. Obukhovskiy, R.G. Podzolov. – M.: Energiya, 1970. – 128 s
- [3] Yaure A.G., Pevsner E.M. Crane electric drive: Handbook. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 344 p.
- [4] Mensky. B.M. The principle of invariance in automatic regulation and control. M.: Mashinostroenie, 1972. -248 p
- [5] Meshcheryakov V.I. Investigation of the blood pressure system included in the TIR scheme / V. I. Meshcheryakov, S.G. Archentov, Yu. V. Karikh // Bulletin of LGTU. 2001. – No. 1. – pp. 77-84.
- [6] Onishchenko G.B. Asynchronous valve cascades and dual-power motors / G.B. Onishchenko, I.L. Lokteva. – M.: Energiya, 1979. – 200 p.
- [7] Tkacheva L.T., Grischuk V.M., Zharkova N.N., Grischuk V.M. Safety of using lifting mechanisms. - Minsk: 2007. - 89 p.
- [8] Evsikov A.A., Kokovin V.A., Leonov A.P. Automated electric drive with frequency control. - Dubna: State University "Dubna", 2020. - 121 p.

УДК 621.313.333.1

Г.М. Тутаев, Е.С. Безбородов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА

Мордовский государственный университет им Н.П. Огарёва

Аннотация. При реализации энергоэффективного управления электроприводом по схеме двигателя двойного питания с двумя преобразователями частоты в статоре и роторе большое значение имеет соблюдение температурных режимов его элементов. Имеющиеся результаты анализа режимов работы при реализации энергоэффективных алгоритмов управления таким электроприводом основаны на электромагнитных параметрах и моделях. Это может привести к неадекватной оценке состояния машины. Для устранения данного недостатка в статье представлена модель асинхронного двигателя с фазным ротором 4AK250SB4Y3, полученная с использованием метода конечных элементов. Так же приведены результаты моделирования номинального режима работы в сравнение с расчётами.

Ключевые слова: алгоритм управления, двигатель двойного питания, математическая модель, метод конечных элементов.

Технические системы, к которым относится и регулируемый электропривод (ЭП), являются наиболее активными элементами производительных сил общества и постоянно совершенствуются и усложняются. При этом важным аспектом функционирования технической системы является организация ее управления. Алгоритмы управления системой направлены на достижение целевых показателей в условиях различных ограничений – технических, организационных, экономических и т.д. Эта задача может быть разрешена различными альтернативными методами, наличие которых обусловлено большим количеством факторов, влияющих на результат, а также принятыми критериями эффективности. Различные сочетания этих факторов образуют множество допустимых решений по управлению системой [1].

При разработке и эксплуатации регулируемого электропривода большое значение имеет обеспечение температурных режимов базовой электрической машины, являющихся основными факторами надежности функционирования всей системы в целом. Выбранные на этапе проектирования алгоритмы энергоэффективного управления приводом и стратегия ШИМ в выходном инверторном звене преобразователя частоты оказывают влияние на нагрев фазных обмоток двигателя и его элементов. Для оценки этого влияния необходимы адекватные тепловые модели, топология и подбор параметров в которых являются сложной зада-

чей и зависят от целого ряда факторов, таких как электрические параметры двигателя, диапазон рабочих скоростей и нагрузок, конструктивные особенности электрической машины.

В результате глубоких теоретических исследований ЭП на базе двигателя двойного питания (ДДП) были синтезированы алгоритмы энергоэффективного управления, исследовано влияние частоты возбуждения и способа аппроксимации кривой намагничивания на энергетические показатели двигателя [2]. Значения этих показателей существенно зависят и от режима работы двигателя. Результаты анализа эффективности возможных алгоритмов управления ДДП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Анализ эффективности алгоритмов управления электроприводом с ДДП

Алгоритмы энергоэффективного управления		$\min_{\omega_2} \Sigma \text{потери}$ ($-\omega_2 = \omega_e / 2$)	$\Psi_6 \perp I_s$ ($-\omega_2 = \omega_e / 2$)	$\varphi_1 = \text{const}$ ($-\omega_2 = \omega_e / 2$)	$\min I$ ($-\omega_2 = \omega_e / 2$)	$\min_{\omega_2} \Sigma \text{потери}$ $\omega_2 = f(M_{ЭМ})$	$\Psi_6 \perp I_s$ $\omega_2 = f(M_{ЭМ})$	$\varphi_1 = \text{const}$ $\omega_2 = f(M_{ЭМ})$	$\min I$ $\omega_2 = f(M_{ЭМ})$	$\min_{\omega_2} \Sigma \text{потери}$ $\omega_2 = 0$	$\Psi_6 \perp I_s$ $\omega_2 = 0$	$\varphi_1 = \text{const}$ $\omega_2 = 0$	$\min I$ $\omega_2 = 0$
Диапазон скоростей	Диапазон нагрузок												
0,25 $\omega_{ен}$	0,3 $M_{ЭМн} <$	+ x	- x	- x	+ x	- x	- x	- x	- x	- *	- x	- x	- *
	0,3 < $M_{ЭМ} < 1$	+ x	+ x	± x	+ x	- x	- x	- x	- x	- *	- *	- *	- *
	1 < $M_{ЭМ} < 2$	+ x	+ x	+ x	+ x	± x	± x	± x	± x	+ *	± x	± x	+ *
$\omega_{ен}$	0,3 $M_{ЭМн} <$	+ x	- x	- x	+ x	± *	- x	- x	- *	± *	- x*	- x*	- *
	0,3 < $M_{ЭМ} < 1$	+ x	+ x	+ x	+ x	± *	± *	± *	± *	± *	± *	± *	± *
	1 < $M_{ЭМ} < 2$	+ x*	+ x*	+ x*	+ x*	+ *	+ *	+ *	+ *	+ *	+ *	+ *	*
1,25 $\omega_{ен}$	0,3 $M_{ЭМн} <$	+ *	- x	- x	+ *	Данные алгоритмы нецелесообразно использовать для этого диапазона угловых скоростей							
	0,3 < $M_{ЭМ} < 1$	+ *	+ *	± *	+ *								
	1 < $M_{ЭМ} < 2$	+ *	+ *	± *	+ *								

Примечания

- «+» – алгоритм эффективен по суммарным потерям в двигателе,
- «-» – алгоритм неэффективен по суммарным потерям в двигателе,
- «±» – алгоритм обеспечивает приемлемую эффективность по суммарным потерям в двигателе,
- «*» – алгоритм эффективен по сочетанию КПД и $\cos\varphi_{\Sigma}$,
- «x» – алгоритм неэффективен по сочетанию КПД и $\cos\varphi_{\Sigma}$,
- «x*» – алгоритм обеспечивает приемлемую эффективность по сочетанию КПД и $\cos\varphi_{\Sigma}$.

Проведённого анализа алгоритмов управления ДДП может быть недостаточно для адекватной оценки состояния машины при реализации требуемого режима. Это связано с упрощением электрической машины до объекта управления, что позволило сделать следующие допущения:

- однородный и постоянный магнитный поток в воздушном зазоре машины;
- виртуализация фазных токов статора и ротора, для анализа ортогонального управления;
- упрощение или игнорирование конструкции машины.

Подобные допущения могут повлиять на адекватность анализа теплового состояния двигателя при реализации энергоэффективных алгоритмов управления. Проведение комплексного моделирования с развёртыванием машины из «объекта управления» до «исследуемого» позволит более точно определить эффективность алгоритмов относительно ДДП.

Большинство существующих тепловых моделей электрических машин основано на простом методе эквивалентных цепей с сосредоточенными параметрами. Применение этих моделей не вызывает затруднений, однако из-за упрощённого и/или недостаточного описания тепловой цепи ротора и представлением распределения температуры равномерным они могут предоставлять данные, не соответствующие действительности [3]. Ввиду своей простоты они могут быть интегрированы в систему защиты от перегрева двигателя [4, 5]. В качестве альтернативы для построения тепловой модели может использоваться метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет вычислять пространственное распределение тепла [6, 7].

Для проведения анализа состояния машины при реализации энергоэффективных алгоритмов управления была разработана двухмерная математическая модель двигателя 4AK250SB4Y3 с использованием МКЭ в программе COMSOL Multiphysics 6.0, которая показана на рис. 1. Выбор двигателя обусловлен наличием математической модели электропривода на его базе и известной конструкцией. В табл. 2 представлены данные используемого двигателя [8].

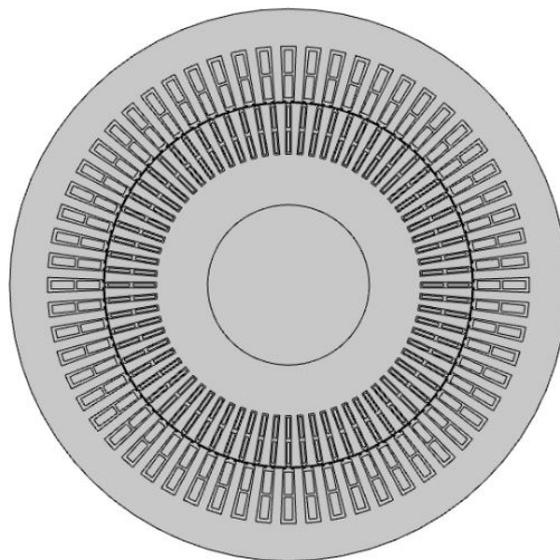


Рис. 1. Двухмерная модель двигателя 4AK250SB4Y3 в COMSOL

Таблица 2

Технические характеристики трёхфазного асинхронного двигателя

Тип двигателя	P_n , кВт	n_n , об/мин	К.п.д., %	$2p$	$\cos\varphi$	I_{2n} , А	S_n , %	S_k , %
4AK250SB4Y3	55	1500	90,5	4	0,9	170	2,3	19,6

Представленная модель использовалась для моделирования в стационарном режиме при электрической частоте статора 50 Гц, ротора — 2 Гц. Моделирование данного режима достаточно для оценки адекватности модели по электромагнитным и электрическим параметрам. Кроме того, данный режим прост для реализации в COMSOL – достаточно ввести значения фазных токов или напряжений и номинальную скорость вала с учётом скольжения. Результаты моделирования для оценки адекватности модели представлены в табл. 3. Полученные параметры двигателя сравнивались с рассчитанными по [9] и представленными в [2].

Таблица 3

Результат моделирования модели двигателя 4AK250SB4Y3 для оценки адекватности

Параметры	Модель МКЭ	Расчёт	Модель [5]	Погрешность Δ , %
Крутящий момент M , Нм	365	358,4	359,5	1,52
Потери в меди статора P_{scop} , кВт	0,810	0,814	0,783	3,44
Потери в стали статора P_{sst} , кВт	0,576	0,59	0,562	2,56
Потери в меди ротора P_{rcop} , кВт	1,341	1,259	1,324	1,2
Потери в стали ротора P_{rst} , Вт	21,82	22,44	21,6	1,03

Из таблицы 3 можно сделать вывод об адекватности представленной модели. Данная модель будет использована для дальнейших исследований в динамическом режиме. Кроме того, модель будет дополнена геометрией корпуса для проведения анализа теплового состояния машины при реализации энергоэффективных алгоритмов управления предложенных в [1].

Результаты будущих исследований позволят разработать методику подбора алгоритмов управления ДДП в качестве рекомендации проектировщикам ЭП. Разрабатываемая методика позволит более эффективно осуществлять выбор алгоритмов и двигателей под требуемые режимы работы ЭП.

Библиографический список

1. Тугаев, Г.М., Безбородов, Е.С. Теория принятия решений в задачах энергоэффективного управления электроприводом с двигателем двойного питания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». –2024. –Т. 24, –№ 1. –С. 51–58. DOI: 10.14529/power240106.
2. Тугаев, Г.М. Алгоритмы энергоэффективного управления асинхронизированным вентильным двигателем. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – 100 с.
3. Тугаев, Г.М., Безбородов, Е.С. Анализ возможности применения тепловых моделей асинхронных двигателей для оценки теплового состояния машины двойного питания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». –2023. –Т. 23, –№ 4. –С. 47–53. DOI: 10.14529/power230405.
4. Зюзев, А.М., Метельков, В.П. Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты // Электротехнические системы и комплексы. –

2018. –№ 2(39). –С. 4–11. DOI:10.18503/2311- 8318-2018-2(39)-4-11.
5. **Булычев, А.В.**, Тепловая модель асинхронного двигателя для целей релейной защиты / А.В. Булычев, Е.Ю. Ерохин, Н.Д. Поздеев, О.А. Филичев // *Электротехника*. 2011. №1. – С. 26-30.
 6. **Xuezhou Wang**, Tim Dave Strous, Domenico Lahaye, Henk Polinder, Jan Abraham Ferreira. Modeling and Optimization of Brushless Doubly-Fed Induction Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – IEEE Journals & Magazines. – Volume: 52, Issue: 6, 2016. – pp. 4525–4534.
 7. **Strous T.D.**, Wang X., Polinder H., Ferreira J.A. Finite element based multi-objective optimization of a brushless Doubly-Fed Induction Machine // (IEMDC). – IEEE Conference Publications. – 2015. – pp. 1689–1694.
 8. **Кравчик, А.Э.** Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. – М.: Энергоиздат, 1982
 9. **Копылов, И. П.** Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов, Ф.А. Горайнов, Б.К. Клоков и др. – М.: Энергия, – 1980. – 496 с.

G.M Tutaev, E.S. Bezborodov

MATHEMATICAL MODEL OF WRIM IN COMSOL MULTIPHYSICS FOR ASSESSING THE CONDITION OF A MACHINE WHEN IMPLEMENTING ENERGY-EFFICIENT MANAGEMENT

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

Abstract. When implementing energy-efficient control of an electric drive using a doubly-fed motor scheme with two frequency converters in the stator and rotor, it is important to adhere to the temperature regimes of its elements. The existing results of the analysis of operating modes when implementing energy-efficient control algorithms for such an electric drive are based on electromagnetic parameters and models. This can lead to an inadequate assessment of the machine's condition. To eliminate this drawback, the article presents a model of an asynchronous motor with a wound rotor 4AK250SB4Y3, obtained using the finite element method. Also, the results of modeling the nominal operating mode are compared with calculations.

Key words: control algorithm, doubly-fed electric motor, mathematical model, finite element method.

References

- [1] G.M. Tutaev, E.S. Bezborodov The theory of decision-making in problems of energy-efficient electric drive control with a double inverter-fed induction motor. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2024;24(1):51–58. (In Russian) DOI: 10.14529/power240106
- [2] G.M. Tutaev “Algoritmy energoeffektivnogo upravleniya asinkhronizirovannym ventil'nym dvigatelem [Algorithms for energy-efficient control of double inverter-fed induction motor]”. *Saransk: Ogarev Mordovia State University Publ.*, 2014. 100 p. (In Russian)
- [3] G.M. Tutaev, E.S. Bezborodov An analysis of the possibility of applying thermal models of asynchronous motors to assess the thermal state of a doubly fed machine. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(4):47–53. (In Russian) DOI: 10.14529/power230405
- [4] A.M. Ziuzev, V.P. Metelkov [Two-Channel Thermodynamic Model of the Induction Motor for the Heat Protection System]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]*, 2018, no. 2(39), pp. 4–11. (In Russian). DOI:10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11
- [5] A.V. Bulychev, E.Yu. Erokhin, N.D. Pozdeev, O.A. Filichev Thermal model of an asynchronous motor for relay protection purposes. *Electrical Engineering*, 2011, no. 1, pp. 26–30. (In Russian)
- [6] Xuezhou Wang; Tim Dave Strous; Domenico Lahaye; Henk Polinder; Jan Abraham Ferreira. Modeling and Optimization of Brushless Doubly-Fed Induction Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – IEEE Journals & Magazines. – Volume: 52, Issue: 6, 2016. – pp. 4525–4534.
- [7] T.D. Strous, X. Wang, H. Polinder, J.A. Ferreira Finite element based multi-objective optimization of a brushless Doubly-Fed Induction Machine // (IEMDC). – IEEE Conference Publications. – 2015. – pp. 1689–1694.
- [8] A.E. Kravchik Asinkhronnyye dvigateli serii 4A: Spravochnik / A.E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin, Ye. A. Sobolevskaya, M.: Energoizdat, 1982
- [9] I.P. Корулов Проектирование электрических машин: учебник для вузов. / I.P. Корулов, F.A. Goryainov, B.K. Klokov and others. M.:Energy, 1980. 496 p. (In Russian)

УДК 621.313.1

Д.А. Ульянов¹, А.Ю. Смирнов^{1,2}

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ПРИВОДА АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова²

Аннотация. В статье приведена конструктивная схема привода аварийной защиты и установлены особенности работы электродвигателя в составе данного электромеханического комплекса. Выяснено, что наиболее перспективным вариантом является индукторная машина с электромагнитным возбуждением в четырёхфазном варианте. Исследован пуск индукторного двигателя из неподвижного состояния под нагрузкой с помощью сеточной модели, сгенерированной в среде *ANSYS/Emag* с использованием встроенного пакета *APDL*. Получены расчётные осциллограммы движения ротора и температуры.

Ключевые слова: привод аварийной защиты, индукторный двигатель, асимметричный мост, электромагнитные и тепловые нагрузки.

Конструктивная схема привода аварийной защиты (АЗ) с использованием энергии от веса поднятого регулирующего органа представлена на рис. 1, а.

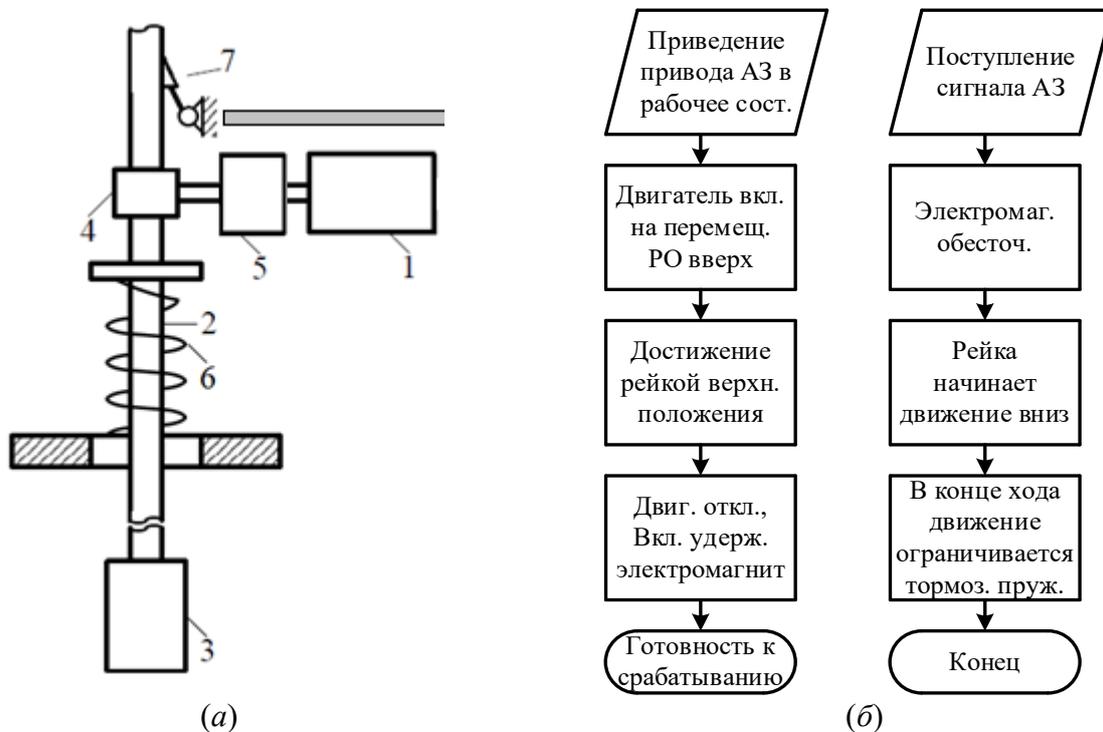


Рис. 1. Конструктивная схема привода АЗ (а), блок-схема алгоритма работы привода (б)

Она содержит двигатель 1, рейку 2, регулирующий орган 3, преобразователь движения 4, удерживающую электромагнитную муфту 5, тормозящую пружину 6, стопорное устройство в виде защёлки 7.

Поясняющая блок-схема принципа работы данного электромеханического комплекса приведена на рис. 1, б. Принцип действия привода АЗ основан на устройстве пассивной безопасности: аккумулирование и преобразование потенциальной энергии сжатой пружины и силы веса стержня поглотителя [1]. Для передачи энергии устройствам пассивной безопасности используются электродвигатели в составе привода АЗ.

Рабочим состоянием привода АЗ является поднятая вверх рейка 2 с регулирующим органом 3, удержание которых осуществляется за счёт электромагнитной муфты 5. Переход в данное состояние происходит за счёт работы электродвигателя, момент которого перемещает рейку 2 с регулирующим органом 3 вверх посредством преобразователя движения 4. Как только рейка 2 достигает верхнего положения, двигатель 1 отключается и включается удерживающий электромагнит 5.

При поступлении сигнала аварийной защиты электромагнит 5 выключается, и рейка 2 с регулирующим органом 3 под действием своего веса начинают движение вниз. Тормозящая пружина 6 ограничивает скорость их падения. Стопорное устройство 7 препятствует самопроизвольному движению рейки 2 вниз в конце хода. Чтобы устранить самопроизвольное движение рейки 2 вверх из-за случайных факторов, устанавливается обгонная муфта.

Учитывая принцип работы привода АЗ, можно выделить некоторые особенности электродвигателей, входящих в состав данного электромеханического комплекса [2]:

- 1) повторно-кратковременный режим работы с длительным обесточенным состоянием,
- 2) большая перегрузочная способность по моменту,
- 3) сильная отдача по моменту из-за увеличения тока,
- 4) надёжность.

Двигатели с постоянными магнитами не удовлетворяют последним двум пунктам, так как постоянные магниты подвержены старению в условиях длительной эксплуатации, воздействие тепла приводит к их размагничиванию [3]. Также отсутствует возможность кратно увеличить момент в случае рабочей необходимости из-за низких удельных магнитных характеристик данных материалов [4].

Большая перегрузочная способность по моменту достигается за счёт проектирования в больших габаритах, чем в номинальном режиме [5]. Электромагнитные и тепловые нагрузки могут быть повышены, задавая, в свою очередь, снижение массы и габаритов двигателя. Насыщение является определяющим параметром. То есть сечение двигателя с большим запасом по моменту должно быть значительно более «железным», чем «медным». Таким образом, следует отметить достоинство бесконтактного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением в сравнении с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ро-

тором. Последние достаточно давно применяются в приводах АЗ, однако их параметры при ограничении сечения стержней не дают создать необходимый момент без смещения его максимума в зону нулевых и отрицательных частот вращения.

Итак, наиболее удовлетворительным вариантом является индукторный двигатель в четырехфазном исполнении с электромагнитным возбуждением от преобразователя, собранного по схемотехнике асимметричного моста, как показано на рис. 2.

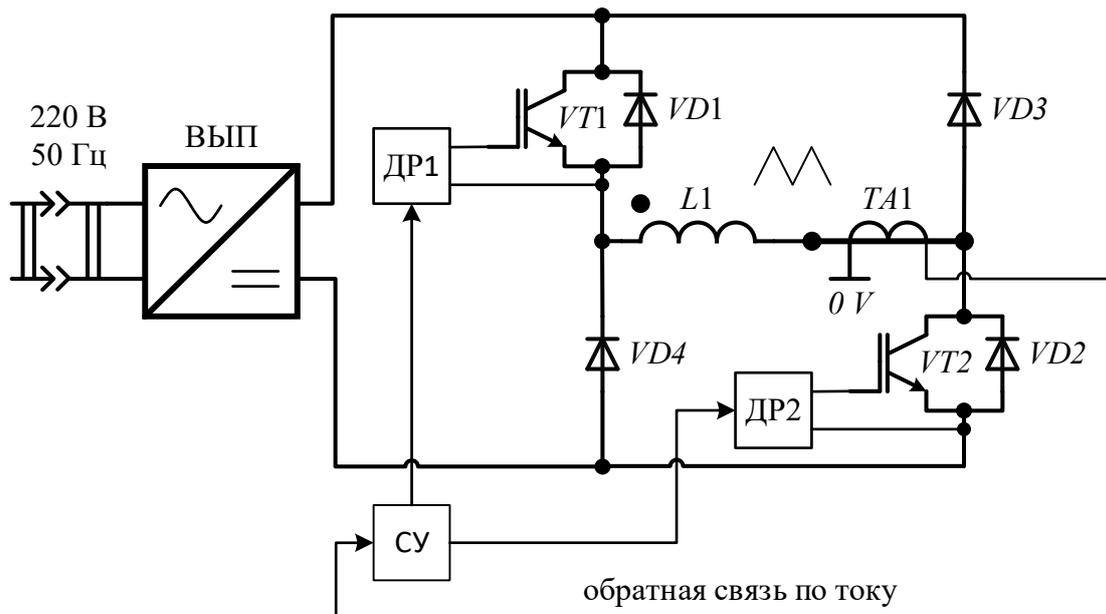


Рис. 2. Преобразователь по схемотехнике асимметричный мост

Достоинством схемы являются простота и надёжность, и широкие возможности для регулирования тока [6-8].

Так как индукторный двигатель работает с повышенными электромагнитными и тепловыми нагрузками, то его работоспособность должна быть проверена с использованием средств численного моделирования на основе сеточной модели, сгенерированной в среде *ANSYS/Emag* с использованием встроенного пакета *APDL*.

На каждом шаге работы модели определяется электромагнитный момент двигателя $M_{\text{Э}}$, который является функцией тока и углового положения ротора. Механическая нагрузка состоит из трех параметров: потенциальная нагрузка (вес регулирующего органа) M_G , трение $M_{\text{тр}}$, упругая деформация пружины $M_{\text{упр}}$. Алгебраическая сумма электромагнитного момента $M_{\text{Э}}$ и составляющих нагрузки даёт угловое ускорение:

$$J\ddot{\theta} = M_{\text{Э}} - M_G - M_{\text{тр}}\text{sign}(\dot{\theta}) - M_{\text{упр}}(x), \quad (1)$$

где J – суммарный момент инерции двигателя и подвижных частей привода на его валу.

Временные диаграммы движения ротора и изменения температуры при решении уравнения движения (1) на сеточной модели представлены на рис. 3.

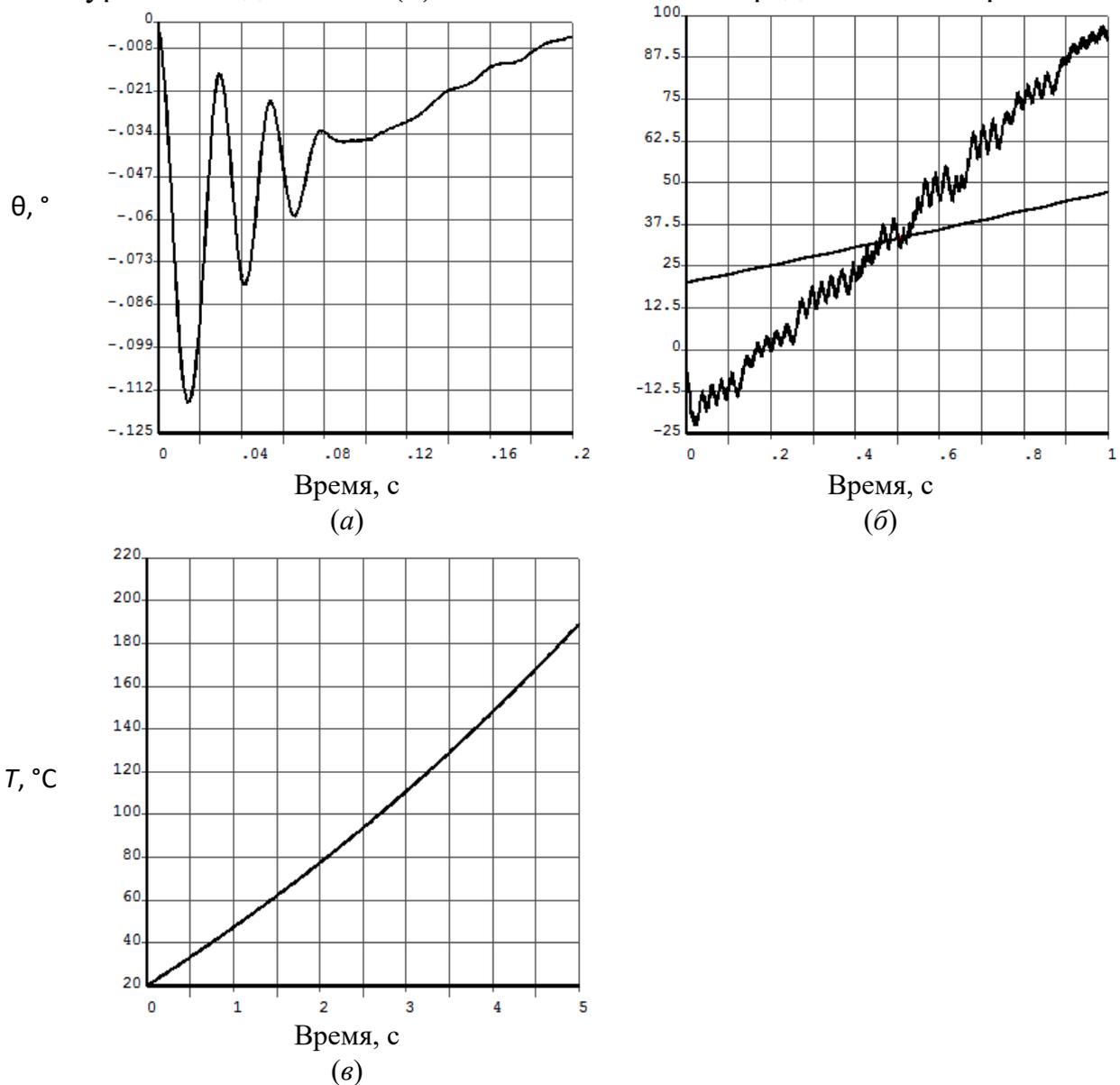


Рис. 3. Осциллограммы угла и температуры при пуске привода

На начальном этапе запуска при плохих начальных условиях по углу ротор получает отрицательный импульс в сторону движения вниз регулирующего органа, что показано на рис. 3, а. Затем, по мере протекания переходного процесса, движение ротора переходит в положительную область.

Далее при более длительном временном промежутке температура и угол нарастают линейно, как показано на рис. 3, б. Искажения во временной диаграмме угла поворота ротора вызваны колебаниями около синхронной скорости. Они смягчаются благодаря формированию треугольной формы импульсов тока преобразователем.

Наблюдается резкое нарастание температуры на более длительном интервале, как показано на рис. 3, в. Это объясняется ростом электрических потерь в

обмотке под влиянием возрастающего сопротивления меди. Отключение двигателя возможно только при достижении рейкой конечного положения и включения электромагнитного удерживающего устройства.

Таким образом, исследован запуск индукторного двигателя в составе привода АЗ из неподвижного состояния под нагрузкой и выявлено, что движение с максимальной скоростью, близкой к частоте приемистости двигателя, позволяет облегчить тепловой режим, сделать его наиболее благоприятным по нагреву и ресурсу изоляции.

Библиографический список

1. **Правила ядерной безопасности** реакторных установок атомных станций: НП-082-07: утв.от 10.12.2007: введен в действие 01.06.2008. – М.: Ростехнадзор, 2007. – 26 с.
2. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины: в 2 томах / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. **Смирнов, А.Ю.** Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями учебное пособие / А. Ю. Смирнов. – М.: Инфра-М, 2024. – 200 с.
4. **Смирнов, А.Ю.** Проектирование индукторных двигателей для привода механизмов аварийной защиты ядерных реакторов / А.Ю. Смирнов, Д.А. Ульянов // *Электротехника*. – 2024. – 10. – (14 с.).
5. **Смирнов, А.Ю.** Уточнение моделей расчёта момента при проектировании явнополюсных индукторных двигателей / А.Ю. Смирнов, Е.Н. Александрова, А.Ю. Зимин // *Электричество*. – 2020. - № 11. – 53 - 59 с.
6. **Мащенко, С.Е.** Специальные синхронные машины. Влияние конструкции машин на характеристики / С.Е. Мащенко, Юрковец Н.В. // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2015. – № 11. – 709 - 710 с.
7. **Савостеенко, Н.В.** Разработка синхронной реактивной машины с высокими удельными показателями для промышленных электроприводов / Н.В. Савостеенко, Н.М. Максимов, М.С. Благов и др. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: энергетика*. – 2022. – № 4 (22). – 60 - 66 с.
8. **Purhönen, J.** Design of rotating electrical machines /J. Purhönen, T. Jokinen, V. Hrabovokova – [s.l.]: John Wiley & Sons, 2008. – 512 p.

D. A. Ulyanov¹, A. Yu. Smirnov^{1,2}

INVESTIGATION OF STARTING AN INDUCTOR MOTOR AS PART OF AN EMERGENCY PROTECTION DRIVE

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva, Russia¹
2JSC «Afrikantov OKBM»²

Abstract. The article presents a design diagram of the emergency protection drive and establishes the features of the operation of the electric motor as part of this electromechanical complex. It was found out that the most promising option is an inductor machine with electromagnetic excitation in a four-phase version. The start of a stepper motor from a stationary state under load is investigated using a grid model generated in the *ANSYS/Emag* environment using the built-in *APDL* package. Calculated oscillograms of rotor motion and temperature are obtained.

Key words: emergency protection drive, inductor motor, asymmetric bridge, electromagnetic and thermal loads.

References

- [1] Rules of nuclear safety of reactor installations of nuclear power plants: NP-082-07: approved on 12/10/2007: put into effect on 06/01/2008. – Moscow: Rostekhnadzor, 2007. – 26 p.
- [2] Ivanov-Smolensky, A.V. Electric machines: in 2 volumes / A.V. Ivanov-Smolensky. – M.: Energiya, 1980. – 928 p.
- [3] Smirnov, A.Yu. Electric drive with contactless synchronous motors textbook / A. Yu. Smirnov. – M.: Infra-M, 2024. – 200 p.
- [4] Smirnov A.Yu. Design of inductor motors for the drive of emergency protection mechanisms of nuclear reactors / A.Yu. Smirnov, D.A. Ulyanov // *Electrical engineering*. – 2024. – 10. – (14 p.).
- [5] Smirnov A.Yu. Refinement of torque calculation models in the design of single-pole inductor motors / A.Yu. Smirnov, E.N. Alexandrova, A.Yu. Zimin // *Electricity*. – 2020. - № 11. – 53 - 59 p.
- [6] Mashchenko in S.E. Special synchronous machines. The influence of machine design on characteristics / S.E. Mashchenko v., Yurkovets N.V. // *Actual problems of aviation and cosmonautics*. – 2015. – № 11. – 709 - 710 p.
- [7] Savosteenko N.V. Development of a synchronous reactive machine with high specific characteristics for industrial electric drives / N.V. Savosteenko, N.M. Maksimov, M.S. Blagov, etc. // *Bulletin of the South Ural State University. Series: energy*. – 2022. – № 4 (22). – 60 - 66 p.
- [8] Purhönen, J. Design of rotating electrical machines / J. Purhönen, T. Jokinen, V. Hrabovokova – [s.l.]: John Wiley & Sons, 2008. – 512 p.

Секция 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

УДК 621.311.1

П.А. Алешин, А.А. Севостьянов, Н.А. Серебряков

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРИ АНАЛИЗЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье описан способ анализа качества электрической энергии для оценки допустимого уровня искажения напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий. Предлагается использование обобщенного показателя в виде пространственного вектора, позволяющего выполнить комплексный анализ степени искажения питающего напряжения. Введение обобщенного показателя обеспечивает оценку допустимого уровня помех для контроля качества выпускаемой продукции в режиме реального времени. Представлен принцип работы устройства, реализующего способ анализа качества электрической энергии.

Ключевые слова: пространственный вектор, качество электрической энергии, показатель качества электрической энергии, трехфазная система.

Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) являются одними из наиболее важных параметров электроэнергетики, при несоблюдении которых значительно снижается эффективность работы систем электроснабжения промышленных потребителей, а в отдельных случаях это может стать причиной аварийной остановки производственного процесса в целом [1-3].

Как правило, в сети присутствуют несколько видов электромагнитных помех, оказывающих комплексное воздействие на режим работы электроприемника, где последствиями являются сбои в его работе. При этом данные помехи могут иметь уровень, не превышающий допустимых нормативными документами значений. Для оценки данного уровня искажения напряжения в промышленных системах электроснабжения предлагается использование обобщенного показателя в виде пространственного вектора (ПВ), позволяющего выполнить анализ параметров напряжения в трехфазной системе электроснабжения при его искажении.

При вычислении ПВ используется метод, объединяющий три фазы напряжения в одну комплексную величину, изменяющуюся во времени [4, 5]. Математическая модель ПВ включает все флюктуации трехфазного напряжения, возникающие как в установившихся режимах, так и в переходных процессах. При этом принято считать, что ПВ является инструментом визуализации изменений ПКЭ

в комплексной плоскости, а его модуль следует использовать для фиксации факта появления возмущений в электрической сети, рис. 1 [5].

Для трехфазной системы дискретных напряжений $u_a(n)$, $u_b(n)$, $u_c(n)$ ПВ задается в виде

$$\underline{u}_s(n) = (2/3) \cdot [\underline{u}_a(n) + a \cdot \underline{u}_b(n) + a^2 \cdot \underline{u}_c(n)], \quad (1)$$

где $a = \{j2\pi/3\}$.

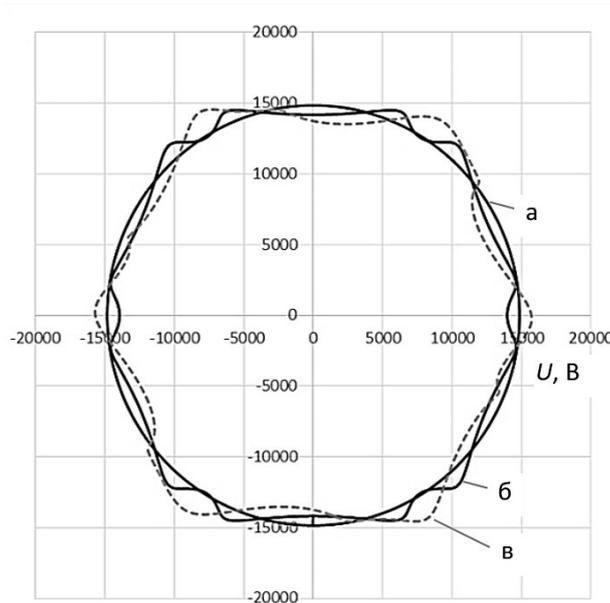


Рис. 1. Диаграмма значений пространственного вектора при анализе искажающего воздействия гармоник 3, 5, 7, 9 и 11 порядка на питающее напряжение при различных значениях начальных фаз: а – отсутствие высших гармонических составляющих, правильная окружность; б - $\varphi_1=0^\circ$, $\varphi_3=0^\circ$, $\varphi_5=0^\circ$, $\varphi_7=0^\circ$, $\varphi_9=0^\circ$, $\varphi_{11}=0^\circ$; в - $\varphi_1=0^\circ$, $\varphi_3=5^\circ$; $\varphi_5=12^\circ$; $\varphi_7=20^\circ$; $\varphi_9=32^\circ$; $\varphi_{11}=45^\circ$

Реальная и мнимая составляющие ПВ соответствуют компонентам преобразования Кларк

$$\underline{u}_s(n) = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)} [u_\alpha(n) + ju_\beta(n)], \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(n) \\ u_\beta(n) \\ u_0(n) \end{bmatrix} = \sqrt{(2/3)} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(n) \\ u_b(n) \\ u_c(n) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

ПВ содержит всю необходимую информацию об исходной трехфазной системе для анализа качества электроэнергии (КЭ). Если трехфазная система является сбалансированной (уравновешенной), то пространственный вектор описывает окружность на комплексной плоскости. Нарушение синусоидальности сигналов токов и напряжений приводит к деформации пространственного вектора, видимой на комплексной плоскости. Деформации позволяют характеризовать и количественно определять различные нарушения, влияющие на трехфазную электрическую сеть.

Для обеспечения эффективного функционирования способа анализа КЭ в трехфазной системе промышленного электроснабжения реализуется предварительное имитационное моделирование, целями которого являются:

- определение режимов функционирования системы промышленного электроснабжения, с учетом особенностей промышленной нагрузки, а также возможностей проведения ремонтно-эксплуатационных работ;
- выявление режимов, в которых возможны существенные отклонения параметров КЭ, требующих реализации мероприятий по восстановлению нормального функционирования системы промышленного электроснабжения;
- создание специальной базы данных формы токов и напряжений для каждого из режимов с существенными отклонениями параметров КЭ, которые характеризуют степень и источник искажающих воздействий.

На рис. 2 представлена структурная схема устройства, реализующего способ анализа КЭ в трехфазной системе промышленного электроснабжения.

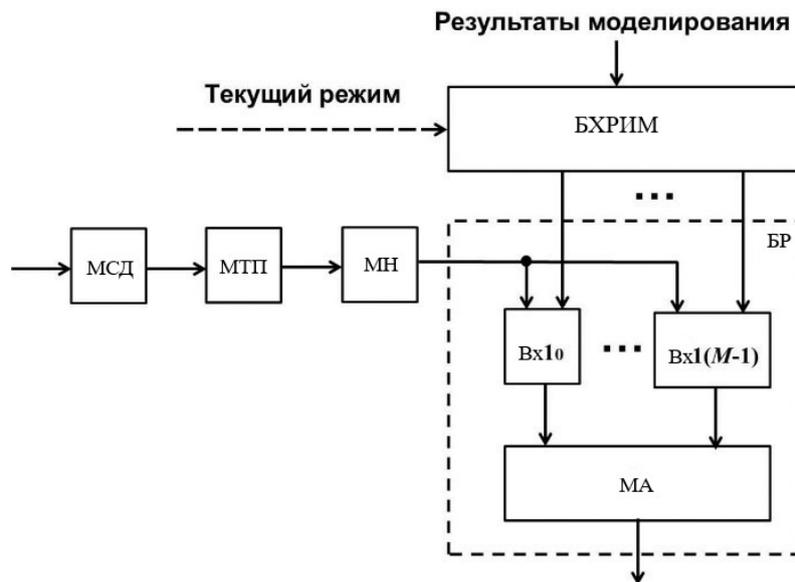


Рис. 2. Структурная схема устройства, реализующего способ анализа качества электрической энергии

Устройство (рис. 2) включает последовательно соединенные модуль сбора данных (МСД), модуль трехмерного преобразования (МТП), модуль нормировки (МН), блок распознавания (БР). Выходы под номером m ($m = 0, \dots, M-1$) блока хранения результатов имитационного моделирования (БХРИМ) подключены к соответствующим вторым входам по номерам m блока распознавания.

В результате трехмерного преобразования (1) по фазным мгновенным значениям получают также составляющую $x_s(n)$, которая является действительной величиной. Поскольку пространственный вектор содержит всю необходимую

информацию об искажениях токов и/или напряжений, составляющая нулевой последовательности может не использоваться при реализации предлагаемого способа анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения.

Мгновенные значения комплексного вектора из модуля МТП устройства поступают на модуль нормировки. В МН в скользящем окне данных, включающем, например, N комплексных отсчетов (мгновенных значений) пространственного вектора, производится их нормировка (приведение к нормированному виду) по энергии. Для этого вычисляется энергия совокупности N комплексных значений пространственного вектора в текущем скользящем окне, и каждое из комплексных мгновенных значений пространственного вектора этого текущего скользящего окна нормируется к рассчитанной энергии.

В последующем нормированные совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора из модуля нормировки поступают в блок распознавания. Рассмотрим принцип организации процедуры распознавания в БР искаженной совокупности комплексных мгновенных значений пространственного вектора (комплексного дискретного сигнала $\underline{x}(n)$) в скользящем окне данных, включающем N отсчетов.

Пусть на вход блока распознавания поступает дискретный комплексный сигнал $\underline{x}(n)$. Примем, что $\underline{x}(n)$ входит в совокупность из M дискретных сигналов $\{\underline{x}_m(n), m = 0, \dots, M-1\}$, характеризует возможные отклонения показателей КЭ конкретной системы электроснабжения в текущем режиме ее функционирования. Комплексные дискретные сигналы $\underline{x}_m(n)$ нормированы по энергии (имеют одинаковую энергию)

$$E = E_m = \sum_{i=0}^{N-1} x_m(i) \cdot x_m^*(i), \quad (4)$$

где $x_m^*(i)$ – коэффициент нормирования значения дискретного сигнала.

БР (рис. 2) решает задачу распознавания: какой из комплексных дискретных сигналов поступил на его вход. При решении задачи распознавания задействуется БХРИМ. В соответствии с текущим режимом функционирования системы промышленного электроснабжения (рис. 2) блок хранения результатов имитационного моделирования подает на вторые входы модулей сравнения $Vx_{10} \dots Vx_{1(M-1)}$ комплексные дискретные сигналы, соответствующие текущему режиму и характеризующие возможные искажения параметров КЭ трехфазной системы промышленного электроснабжения. На первые входы модулей сравнения поступает комплексный дискретный сигнал с выхода модуля нормировки. В модулях сравнения $Vx_{10} \dots Vx_{1(M-1)}$ блока распознавания реализуется сравнение комплексного дискретного сигнала, поступившего на вход БР, с каждым из хранящихся комплексных дискретных сигналов в БХРИМ, соответствующих текущему режиму системы электроснабжения. По результатам сравнения, модулем анализа (МА) блока распознавания принимается решение о том, какой комплексный дискретный сигнал действует на входе и, соответственно, какой вариант отклонений параметров КЭ характерен для текущего режима системы электроснабжения.

Поскольку при имитационном моделировании для текущего режима функционирования системы электроснабжения и варианта отклонений параметров КЭ задается степень и источник трехфазных искажений токов и напряжений, то на основе реализации процедуры распознавания можно выявить степень и источник искажений токов и напряжений в трехфазной системе промышленного электроснабжения.

В модулях сравнения БР при сравнении сигналов $\underline{x}(n)$ и $\underline{x}_m(n)$ устанавливается степень их взаимного соответствия по форме. В качестве меры соответствия нормированных по энергии комплексных дискретных сигналов может быть выбрана энергия разностного сигнала, определяемая выражением

$$E_p = \sum_{i=0}^{N-1} (x(i) - x_m(i)) \cdot (x(i) - x_m(i))^*. \quad (5)$$

В случае совпадения сигналов $\underline{x}(n)$ и $\underline{x}_m(n)$ их разность равна нулю, соответственно и $E_p = 0$. Следовательно, чем меньше энергия разностного сигнала, тем в большей степени сигналы $\underline{x}(n)$ и $\underline{x}_m(n)$ соответствуют (похожи) друг другу.

Производя вычисления по выражению (4), имеем, что

$$E_p = \sum_{i=0}^{N-1} (x(i) - x_m(i)) \cdot (x(i) - x_m(i)) = E + E_m - R - R^*, \quad (6)$$

где E и E_m – энергии комплексных дискретных сигналов,

$$R = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \cdot x_m(i) = (\sum_{i=0}^{N-1} x^*(i) \cdot x_m(i))^* = R^* \quad (7)$$

коэффициент взаимной корреляции между комплексными дискретными сигналами. В выражении (7) учтено, что коэффициент корреляции обладает сопряженной симметрией относительно своих индексов.

Таким образом, с учетом свойств коэффициента корреляции выражение для разностной энергии получим в виде

$$E_p = E + E_m - R - R^* = E + E_m - 2 \cdot \text{Re}(R). \quad (8)$$

Так как энергия разностного сигнала является положительной величиной $E_p \geq 0$, то действительная часть коэффициента корреляции не превосходит полусуммы энергии сравниваемых сигналов

$$\text{Re}(R) \leq (E + E_m) / 2. \quad (9)$$

Отметим, что чем больше значение действительной части коэффициента корреляции, тем меньше энергия разностного сигнала и тем больше сигналы подобны друг другу по форме. При совпадении сравниваемых комплексных дискретных сигналов коэффициент корреляции максимален и равен их энергии (7). Таким образом, сравнение комплексных дискретных сигналов может также осуществляться и на основе анализа значений коэффициента корреляции. При этом гарантируется, что максимальное значение действительной части коэффициента корреляции будет получено только в том модуле сравнения БР (рис. 1), где произошло совпадение по форме анализируемого и эталонного комплексных дискретных сигналов. Номер этого модуля сравнения блока распознавания может быть установлен модулем анализа по максимальному действительному значению коэффициента корреляции.

Отметим, что согласно (7) модуль коэффициента корреляции является симметричным относительно индексов, т.е. $|R| = |R^*|$, а использование неравенства Буняковского – Шварца приводит к выражению

$$|R| = \left| \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \cdot x_m^*(i) \right| \leq \sqrt{E} \cdot \sqrt{E_m}, \quad (10)$$

в котором равенство достигается при совпадении комплексных дискретных сигналов.

Таким образом, свойства модуля коэффициента корреляции аналогичны свойствам его действительной части, поэтому при организации процедуры распознавания в БР (рис. 2) может использоваться и модуль коэффициента корреляции.

В БХРИМ устройства (рис. 2), реализующего способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения, поступает информация о текущем режиме, выраженная, например, в виде номера режима. Такая информация может поступать, например, из SCADA-системы или из систем диспетчерско-технологического управления системой электроснабжения (оперативно-информационного комплекса – ОИК). Номер режима определяет текущий набор M комплексных дискретных сигналов, выдаваемых с выходов блока хранения результатов имитационного моделирования в блок распознавания. Информация о текущем режиме функционирования системы промышленного электроснабжения необходима для снижения вычислительной нагрузки на БР.

В случае отсутствия канала связи для передачи информации о текущем режиме или, например, отсутствии ограничений на быстродействие и вычислительную нагрузку БХРИМ возможна работа устройства (рис. 2) в автономном режиме, когда распознавание БР реализуется по всему массиву комплексных дискретных сигналов, в частности, путем последовательного перебора всех возможных режимов функционирования системы промышленного электроснабжения.

Предлагаемый способ, с учетом данных имитационного моделирования и распознавания комплексных дискретных сигналов, позволяет фиксировать факт отклонений параметров КЭ от значений, необходимых для функционирования конкретной системы промышленного электроснабжения, а также определять степень искажений токов и напряжений в трехфазной сети.

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

Библиографический список.

1. Добрусин, Л.А. Проблемы качества электроэнергии и электроснабжения в России [Текст] // Энергоэксперт. - 2008. - № 4 (9). – С.30-35.
2. Папков, Б.В. Задачи надежности современного электроснабжения: монография / Б.В. Папков, А.Л. Куликов, П.В. Илюшин. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 260 с.
3. Вагин, Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Требования к качеству электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию SMART GRID // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 4 (20). С. 43-52.
4. M. Canteli, A. Fernandez, L. Eguiluz, and C. Estebanez, “Three-phase adaptive frequency measurement based on Clarke’s transformation,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1101–1105, 2006.
5. Ignatova V., Granjon P., Bacha S. Space Vector Method for Voltage Dips and Swells Analysis. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, vol. 24, No. 4, pp. 2054–2061, DOI:10.1109/TPWRD.2009.2028787.

P.A. Aleshin, A.A. Sevostyanov, N.A. Serebryakov

**APPLICATION OF THE GENERALIZED INDICATOR
IN THE ANALYSIS OF THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY
IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES**

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva, Russia

Abstract. The article describes a method for analyzing the quality of electrical energy to assess the permissible level of voltage distortion in the power supply systems of industrial enterprises. It is proposed to use a generalized indicator in the form of a spatial vector, which allows performing a comprehensive analysis of the degree of distortion of the supply voltage. The introduction of a generalized indicator provides an assessment of the permissible level of interference for quality control of manufactured products in real time. The principle of operation of a device implementing a method for analyzing the quality of electrical energy is presented.

Key words: spatial vector, electric energy quality, electric energy quality indicator, three-phase system.

References

- [1] Dobrusin, L.A. Problems of the electric power quality and power supply in Russia / L.A. Dobrusin // *Energoekspert*. - 2008. - № 4 (9). - p.30-35.
- [2] Papkov, B.V. Problems of the modern power supply reliability: monograph (in Russian) / B.V. Papkov, A.L. Kulikov, P.V. Ilyushin. - Moscow: Vologda: Infra-Engineering, 2022. - 260 p.
- [3] Vagin, G.Ya.; Kulikov, A.L.; Sevostyanov, A.A. Requirements to the power supply quality of the industrial enterprises in connection with the transfer of the Russian electric power industry to the SMART GRID technology (in Russian) // *Intellectual electrical engineering*. 2022. No. 4 (20). pp. 43-52.
- [4] M. Canteli, A. Fernandez, L. Eguiluz, and C. Estebanez, "Three-phase adaptive frequency measurement based on Clarke's transformation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1101-1105, 2006.
- [5] Ignatova, V., Grangeon, P., and Bacha, S. "Spatial vector method for analyzing voltage sags and surges. - *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, vol. 24, No. 4, pp. 2054-2061, DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2028787.

УДК 621.311.1

А.Д. Ахметбаев

ЦЕНТРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КАК ЭНЕРГООБЪЕКТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

АО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями» («Kegoc»), г. Алматы

Аннотация. В связи с развитием *IT* индустрии в электроэнергетической системе появились Центры обработки данных (ЦОД) или *IDC* (*Internet Data Centre*). Характерная особенность данных объектов — это наличие собственных автономных источников электроснабжения – дизель-генераторных устройств. ЦОДы в нормальном режиме получают электроснабжение от распределительных сетей, обычно РЭС, но при очень больших мощностях подключаются к сетям 110 кВ и выше. Данные виды объектов постоянно увеличиваются как количественно, так и по мощности в сети с распределенной генерацией.

Ключевые слова: ЦОД (центр обработки данных), ДГУ (дизель-генераторная установка), надежность, резервирование, отказоустойчивость, электроэнергетическая система (ЭЭС).

Особенностью данных объектов является высокое требование к отказоустойчивости. Под отказоустойчивостью данных объектов понимается непрерывная работа, т.е. 8760 часов в году, причем нагрузка не снижается в течение суток или сезона. Отказоустойчивость или степень надежности должна соответствовать уровням системы классификации (сертификации) *Uptime Institute*. Опишем уровни требований к этим системам.

Уровни (I-IV) являются прогрессивными, т.е. каждый последующий уровень включает в себя требования всех нижних уровней.

Уровень I: Базовый. *Tier I* это центр обработки данных, который обеспечивает инфраструктуру для поддержки функционирования *IT* оборудования.

Tier I инфраструктура включает в себя специально выделенное пространство для *IT*-систем; источник бесперебойного питания (ИБП) для фильтрации всплесков напряжения, перекосов и кратковременных отключений; специальное оборудование охлаждения и генератор для защиты ИТ-функции при длительных перебоях в подаче электроэнергии.

Уровень II: Резервные компоненты ЦОД *Tier II* включают в себя излишки мощности электроснабжения и компонентов системы охлаждения для обеспечения возможности проведения технического обслуживания и повышения запаса прочности в отношении ИТ-процессов, для исключения сбоев, которые могут произойти в результате сбоев оборудования инфраструктуры ЦОД. Избыточные компоненты включают в себя блоки питания и охлаждения оборудования, такие как модули ИБП, чиллеры, насосы, генераторы и т.п.

Уровень III: Центр обработки данных *Tier III* не требует никаких отключений для замены и технического обслуживания оборудования. Избыточность

оборудования электропитания и охлаждения добавляется к резервированию критических компонентов *Tier II*, так что каждый компонент инженерного оборудования, необходимый для поддержки среды ИТ-оборудования, может быть остановлен и обслужен без влияния на работу системы в целом.

Уровень IV: Увеличена устойчивость к авариям. *Tier IV* повторяет *Tier III*, добавив концепцию отказоустойчивости инфраструктуры. Это означает, что при возникновении неисправности отдельных единиц и узлов оборудования или обрыва пути распределения последствия аварий не затрагивают ИТ структуры ЦОД [1].

В любом случае любой ЦОД или IDC должен иметь в составе своего энергооборудования ДГУ (дизель-генераторную установку), то есть генерирующую установку (ГУ). Энергообъекты такого типа используют работу ГУ в островном режиме, то есть в нормальном режиме электроснабжение получают от ЭЭС. Обычно при наличии одной или двух ДГУ проблем не возникает. Схема подключения для энергообъекта представлена на рис. 1.

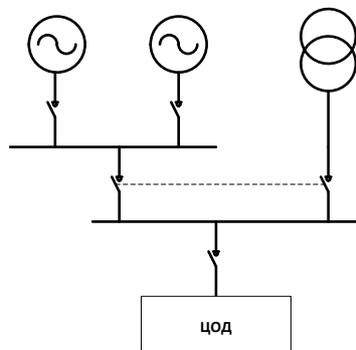


Рис. 1. Структурная схема ЦОД

В случае, когда для ЦОД установлен один или ДГУ, проблем обычно не возникает, если расчетная мощность ДГУ была выбрана верно, то есть с учетом конструктивных особенностей ИБП (схема выпрямителя), мощности систем кондиционирования. Проблемы, возникающие с неправильным выбором мощности ДГУ, описаны в [2].

ЦОДы сравнительно небольшой мощности имеют структурную схему, показанную на рис.1. Но существуют ЦОД, состоящие из N количества так называемых контейнерных ЦОД с большой удельной мощностью потребления, например, от 200 кВт нагрузки ИТ (от 20 *Rack* стоек с мощностью 10 кВт на стойку). Данные контейнерные решения снабжены ИБП и системой охлаждения, таким образом потребляемая мощность может достигать 260 кВт и более. Таких контейнерных ЦОД может быть установлено N количество. В процессе эксплуатации машинные залы заполняются не сразу. Фактически проектная мощность может быть и не достигнута по тем или иным причинам. Здесь возникает проблема, чтобы соответствовать минимальному требованию по резервированию в части ДГУ $N+1$, необходимо построить схему таким образом, чтобы в процессе наращивания ИТ нагрузки до проектной не было избыточности по мощности ДГУ и недостаточности нагрузки для ДГУ, так как обе проблемы одинаково губительно

для надежности работы объекта, ДГУ при превышении нагрузки и для работы первичного двигателя ДГУ в случае низкой нагрузки ДГУ.

Нагрузка ЦОД имеет активно-емкостной характер по следующим причинам.

1. ИБП (источник бесперебойного питания) и ЭПУ (электропитающие установки – выпрямители), обеспечивающие питанием ИТ нагрузку, имеют входной $\cos \varphi$ емкостной характер. Для примера приведены входные характеристики ИБП *RIELLO* 60кВА и ЭПУ *ELTECO NTX48V/97.2kW/A* на рис. 2. и рис. 3.

Общая информация	
Частота	49.987 Гц
I _{Ср.Знач.}	35.535 А
V(LL) _{Ср.Знач.}	387.81 В
V(LN) _{Ср.Знач.}	224.28 В
KM(cos φ) _{Сумм.}	0.9447 (Емк)
Чередование Фаз	123

Состояние синхронизации		
По времени	Self	Нет синхронизации
По DSP		Вкл

Рис. 2. ИБП *RIELLO* 60кВА

Общая информация	
Частота	50.014 Гц
I _{Ср.Знач.}	47.565 А
V(LL) _{Ср.Знач.}	388.46 В
V(LN) _{Ср.Знач.}	224.72 В
KM(cos φ) _{Сумм.}	0.9678 (Емк)
Чередование Фаз	123

Состояние синхронизации		
По времени	Self	Нет синхронизации
По DSP		Вкл

Рис. 3. ЭПУ *ELTECO NTX48V/97.2kW/A*

2. Для обеспечения температуры и влажности в машинном зале устанавливаются прецизионные кондиционеры, коэффициент энергоэффективности *EER* ($EER = \text{коэффициент энергоэффективности} = \text{общая хладопроизводительность} / \text{потребляемая мощность компрессоров} + \text{потребляемая мощность вентиляторов}$) в среднем может быть 3,5. При этом $\cos \varphi$ климатехники на рис. 4. активно-индуктивная.

The screenshot shows a web-based monitoring interface for an ESPEC G4500 BLACK BOX. The page title is 'Общая информация' (General Information). The interface displays several key electrical parameters in a table format.

Общая информация	
Частота	49.982 Гц
I _{ср.знач.}	31.041 А
V(LL)ср.знач.	389.31 В
V(LN)ср.знач.	225.20 В
КМ(cos φ) _{сумм.}	0.9490 (Инд)
Чередование Фаз	123

Состояние синхронизации		
По времени	Self	Нет синхронизации
По DSP		Вкл

Рис. 4. Cosφ климатехники

При достижении проектных значений нагрузки ЦОД или серверные имеют входной cosφ активно-емкостной, так как ИБП (ЭПУ) с нагрузками будут превышать нагрузку климатехники как минимум в 3 и более раз.

В островном режиме работы от автономных ДГУ необходима решать установка реакторов для продольной компенсации емкостной составляющей нагрузки. Работа синхронных генераторов (СГ), оптимальная по всем параметрам, возможна лишь в небольшом секторе, ограниченном значениями cosφ, близкими к номинальному значению $\cos\varphi_{\text{ном}}$, т.е. при активно-индуктивном характере нагрузки в диапазоне $\cos\varphi = 0,8...0,9$.

Ограничения по работе СГ:

1. По нагреву обмоток статора;
2. По нагреву обмоток ротора;
3. По максимальной мощности первичного двигателя;
4. По нагреву торцевых частей и крайних пакетов стали статора;
5. По устойчивости генератора при параллельной работе с энергосистемой.

Для оптимальной работы ДГУ разработана схема, обеспечивающая резервирование и надежную работу ЦОД,

Данная схема даст следующие преимущества:

1. Разработанная схема позволит подключать нагрузки, в данном случае ЦОДы, обеспечивая работу ДГУ как в параллельной работе, так и отдельно.

2. При этом любой из ДГУ может быть выведен в ремонт без потери надежности автономной работы объекта.

3. Переключая коммутационные аппараты, можно обеспечить работу ДГУ под нагрузкой не менее 40% его номинальной мощности, что обеспечит оптимальный режим для первичного двигателя ДГУ.

4. Схема позволяет вводить в работу ДГУ для обеспечения равномерной наработки часов ДГУ.

5. По мере роста ИТ нагрузки резервирование по ДГУ будет уменьшаться, но не превысит предельного N+1.

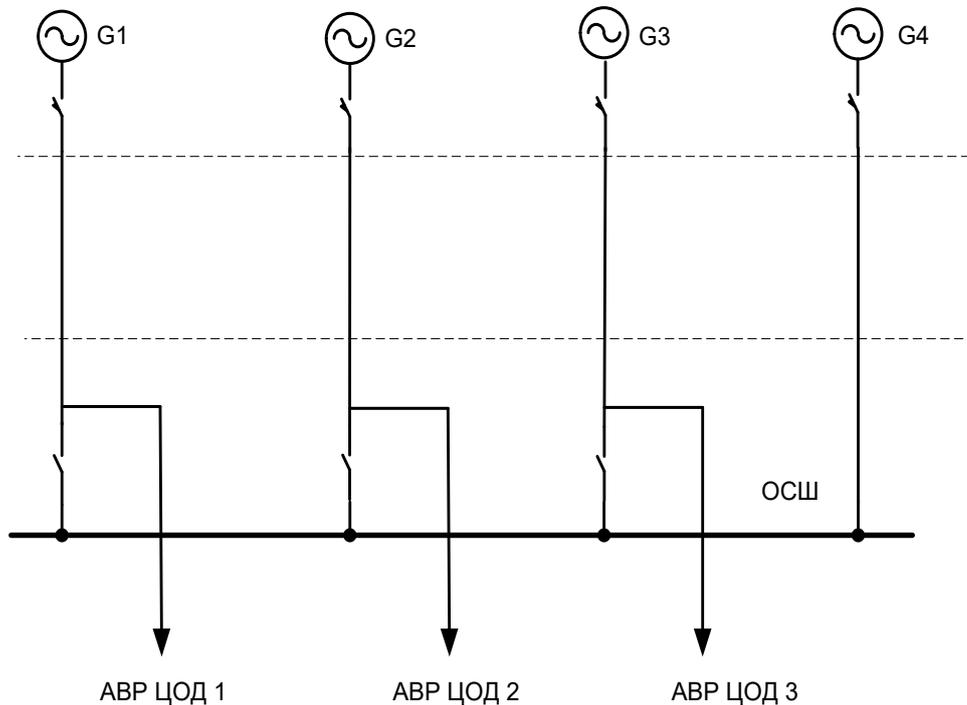


Рис. 5. Структурная схема ЦОД

Библиографический список

1. Документ SP-3-0092: (Стандарт ТИА-942, редакция 7.0, февраль 2005).
2. **Кузьмина, О.** О совместной работе ДГУ и ИБП. // Сети и бизнес. - 2002 – С.18-21.
3. ГОСТ Р 53174-2008 Национальный стандарт Российской Федерации. Установки электрогенераторные с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания.
4. Нормы технологического проектирования дизельных электростанций (ДЭС) СН РК 3.02-09-2001.
5. **Илюшин, П.В.** Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. М./ П.В. Илюшин, А.Л. Куликов, 2019.

A.D. Akhmetbaev

DATA PROCESSING CENTERS AS AN ENERGY OBJECT ELECTRIC POWER SYSTEM

Kazakhstan Electric Grid Management Company JSC (“Кегос”), Almaty.

Abstract. Due to the development of *IT* industry in the electric power system, Data Processing Centers (*DPC*) or *IDC* (*Internet Data Centre*) have appeared. A characteristic feature of these facilities is the presence of their own autonomous power supply sources - diesel generators. Data centers in the normal mode receive power supply from distribution networks, usually from *RES*, but in case of very large capacities they are connected to 110 *kV* and higher networks. This type of facility is constantly increasing both quantitatively and in terms of capacity in the network with distributed generation.

Key words: data center (data processing center), *DGU* (diesel generator set), reliability, redundancy, fault tolerance, electric power system (*EPS*).

References

- [1] Document SP-3-0092: (TIA-942 Standard, Revision 7.0, February 2005).
- [2] On the joint operation of the *DGU* and *UPS*. O. Kuzmina.
- [3] GOST R 53174-2008 National Standard of the Russian Federation. Electric-generator sets with diesel and gas internal combustion engines.
- [4] Norms of technological design of diesel power stations (*DPS*) SN RK 3.02-09-2001.
- [5] Automation of control of normal and emergency modes of power districts with distributed generation. Monograph. P.V. Ilyushin, A.L. Kulikov. Nizhny Novgorod, 2019.

УДК 621.384.3

А.Б. Власов, С.А. Буев

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Мурманский арктический университет

Аннотация. В статье рассмотрены некоторые аспекты термографической диагностики электрического оборудования 0,4 кВ, приведен анализ нормативных документов, которые применяются при проведении аудита оборудования с помощью тепловизора. Актуальным является вопрос о разработке стандартов для оценки дефектов электрооборудования потребителей класса 0,4 кВ и ниже методом инфракрасной диагностики с обязательным учетом токовой нагрузки, температуры среды, ветра (на открытых подстанциях) в период обследования. В связи с пробелами в нормативных документах затруднена экспертная оценка при обнаружении дефектов, что увеличивает вероятность аварийной ситуации в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: тепловизионная диагностика, электрооборудование, техническое состояние, неразрушающий контроль, влияние токовой нагрузки

В 2022 г. на одной из подстанций города Мурманска оценивалось техническое состояние секций распределительного устройства 0,4 кВ (далее РУ) электрического оборудования методом инфракрасной диагностики. Был обнаружен (рис. 1; слева направо фазы А, В, С) дефект контактного соединения (далее КС) фазы В.

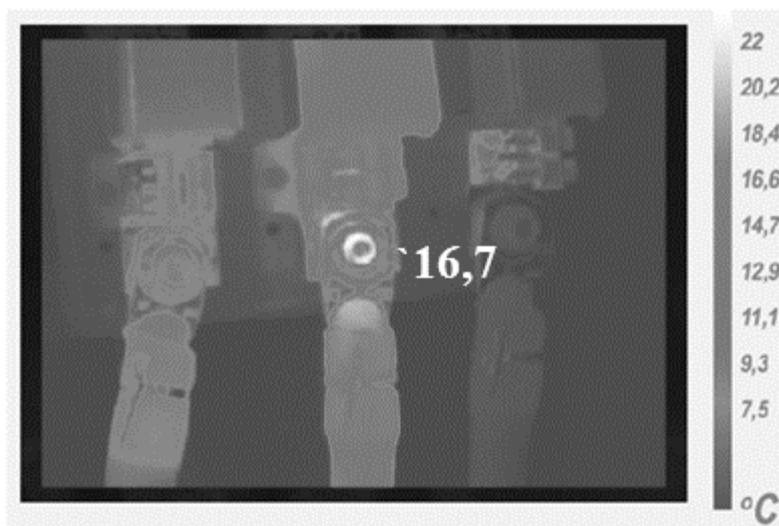


Рис. 1. Термограмма секции шин РУ (2022 г.)

С помощью анализатора качества электрической энергии *POWERQ4* произведен контроль токовой нагрузки, результаты которой приведены в табл. 1.

Для оценки теплового состояния электрооборудования руководствовались действующими нормативными документами СТО 34.01-23.1-001-2017 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [4] и РД 153-34.0-20.363-99 «Основные

положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ» [5]. Одновременно пересчёт на номинальный ток выполнялся с помощью Программы приведения результатов тепловизионной диагностики к единому критерию [2]. Обоснованность использования Программы вместо упрощенных формул пересчёта, предложенных в руководящих документах [4, 5], изложена в материалах [1, 3].

Таблица 1

Данные, полученные в ходе тепловизионной диагностики РУ (2022 г.)

Параметры	ФАЗА А	ФАЗА В	ФАЗА С
Среднее действующее значение силы тока, А	27,3	25,2	9,5
Температура контактного соединения $T_{п}$, °С	6,35	16,61	4,96
Температуры окружающей среды T_0 , °С	4,8		
Превышение температуры объекта при испытании $\Delta T_{раб} = T_{п} - T_0$, °С	1,55	11,81	0,16
Превышение температуры дефекта при пересчёте на номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 100$ А по Программе приведения [2] $\Delta T_{ном}$, °С	15,7	152,1	11,3

Совокупные результаты расчётов приведены в таблице 1. Значение номинального тока $I_{ном}$ для шин анализируемого оборудования выбрано 100 А.

Согласно требованиям нормативных документов [4, 5] в связи с тем, что значение токов нагрузки (0,3-0,6) $I_{ном}$, экспертная оценка (категория) выявленного дефекта должна вестись по значению избыточной температуры, т.е. за счет сравнения температуры выявленного дефекта (фаза В) с температурой соседних фаз (фазы А и С). По нашему мнению, в связи с разной токовой нагрузкой на всех фазах данный выбраковочный норматив не может быть выбран в качестве адекватного экспертного решения.

Фактически, с учетом значения принятого номинального тока, обнаруженный дефект должен быть признан «аварийным», и продолжение длительной эксплуатации оказывается возможным только из-за невысокой токовой нагрузки данного оборудования.

Несмотря на выявленный дефект (2022 г.), плановый ремонт данного дефектного оборудования не производился в связи с необходимостью обеспечения непрерывного электроснабжения потребителей. Через два года (в 2024 г.) нами был произведён повторный осмотр выявленного дефектного контактного соединения с помощью тепловизора (рис. 2) и одновременным контролем токовой нагрузки с помощью прибора *POWERQ4*.

На рис. 2 представлена термограмма секции шин с различной нагрузкой по фазам с одновременным контролем токовой нагрузки. График действующего значения силы тока по фазам представлен на рис. 3.



Рис. 2. Термограмма КС секции шин РУ (2024 г.)

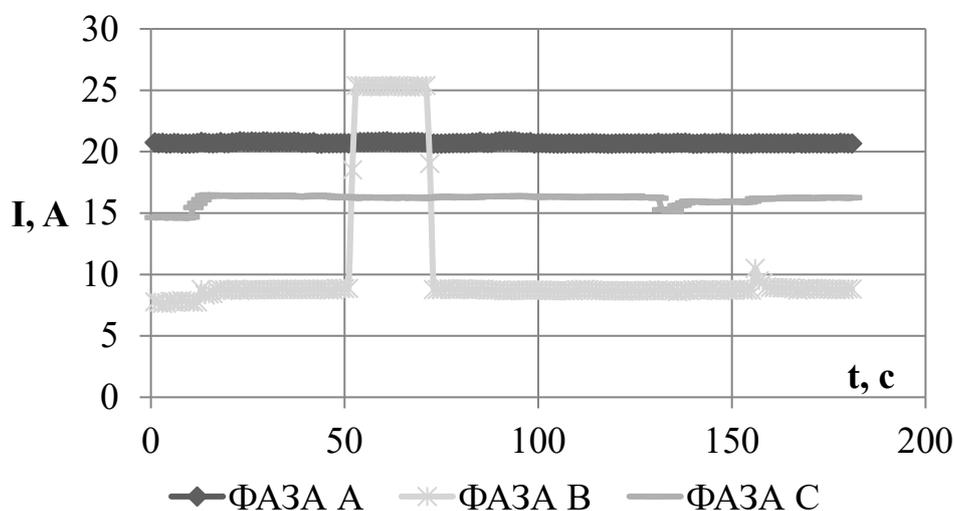


Рис. 3. Действующее значение силы тока на секции шин РУ (2024 г.)
 В табл. 2 приведены результаты расчета данных, полученных в 2024 г.

Таблица 2

Данные, полученные в ходе тепловизионной диагностики РУ (2024)

Параметры	ФАЗА А	ФАЗА В	ФАЗА С
Среднее действующее значение силы тока, А	20,7	10,5	16,1
Температура контактного соединения $T_{п}$, °С	18,5	7	3,8
Температуры окружающей среды T_0 , °С	0		
Превышение температуры объекта при испытании $\Delta T_{раб} = T_{п} - T_0$, °С	18,5	7	3,8
Превышение температуры дефекта при пересчёте на номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 100$ А по Программе приведения [2] $\Delta T_{ном}$, °С	332,2	407	106,5

Применение Программы приведения данных тепловизионного контроля к единому критерию [2] позволяет сравнивать результаты испытаний, полученных при разнообразных условиях токовой нагрузки, температуры среды и т.п.

Сравнение данных, полученных с интервалом в два года, позволяет проанализировать развитие дефекта без проведения ремонта. Если при измерении в 2022 г. дефект был явно выражен только на контактном соединении фазы *B*, то при втором измерении контактные соединения на всех трёх фазах являются дефектными.

В частности, через два года эксплуатации превышение температуры на КС фазы *B* при пересчёте на номинальный ток увеличилось в 2,5 раза, несмотря на уменьшение среднего значения тока нагрузки в данной фазе в два раза.

Необходимо отметить, что действующие нормативные документы в области инфракрасной диагностики [4, 5] в основном ориентированы на потребителей класса напряжения выше 1000 В, для которых фазовая токовая нагрузка относительно идентична.

При оценке избыточной температуры в нормативных документах [4, 5] не учитывается несимметричность нагрузки фаз, что наиболее характерно для сетей напряжением 0,4 кВ.

В связи с этим полагаем, что актуальным является вопрос о дальнейшей разработке стандартов для оценки дефектов электрооборудования потребителей класса 0,4 кВ и ниже методом инфракрасной диагностики с обязательным учетом токовой нагрузки, температуры среды, ветра (на открытых подстанциях) в период обследования.

Указанные пробелы в нормативных документах не дают возможности потребителям, эксплуатирующим оборудование класса 0,4 кВ, производить адекватную экспертную оценку при обнаружении дефектов, что увеличивает вероятность аварийной ситуации в процессе эксплуатации.

Исследование выполнено в рамках инициативной НИОКР №124041100064-1 в ЕГИСУ НИОКТР.

Библиографический список

1. **Власов, А.Б.** Модели и методы количественной термографии в электроэнергетике. – Вологда : Инфра-инженерия, 2024. – 296 с.
2. **Власов, А.Б.** Программа приведения результатов тепловизионного контроля к единому критерию. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2023664798 регистр. 2023 Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Россия, 2023 г.
3. **Власов, А. Б.** и др. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 484–495. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495.
4. **СТО 34.01-23.1-001-2017** Объем и нормы испытаний электрооборудования. Утвержден распоряжением ПАО "Россети" от 29.05.2017 № 280р [Электронный ресурс]. – URL: <https://stds.ru/document/СТО%2034.01-23.1-001-2017.pdf> (дата обращения 15.05.2024).

5. РД 153-34.0-20.363-99 Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.thermoview.ru/pdf/rd.pdf> (дата обращения 15.05.2024).

A.B. Vlasov, S.A. Buev

IMPROVING THE RELIABILITY OF THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT

Murmansk arctic university

Abstract. The article discusses some aspects of thermographic diagnostics of 0.4 kV electrical equipment, provides an analysis of regulatory documents that are used when conducting an audit of equipment using a thermal imager. An urgent issue is the development of standards for the assessment of defects in electrical equipment of consumers of class 0.4 kV and below by infrared diagnostics with mandatory consideration of current load, ambient temperature, wind (at open substations) during the examination period. Due to gaps in regulatory documents, expert assessment is difficult when defects are detected, which increases the likelihood of an emergency during operation.

Key words: thermal imaging diagnostics, electrical equipment, technical condition, non-destructive testing, influence of current load

- [1] Vlasov, A.B. Models and methods of quantitative thermography in electric power engineering. - Vologda : Infra-Engineering, 2024. - 296 с.
- [2] Vlasov, A.B. Programme of bringing the results of thermal imaging control to the unified criterion. Certificate of official registration of computer programme No. 2023664798 registr. 2023 Federal Service for Intellectual Property, Russia, 2023.
- [3] Vlasov, A. B. et al. Features of realisation of method of quantitative thermographic diagnostics at introduction of digital technologies. Vestnik MSTU. 2019. T. 22, № 4. С. 484-495. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495.
- [4] STO 34.01-23.1-001-2017 Scope and norms of testing of electrical equipment. Approved by the order of PJSC ROSSETI dated 29.05.2017 No. 280p [Electronic resource]. - URL: <https://stds.ru/document/CTO%2034.01-23.1-001-2017.pdf> (date of circulation 15.05.2024).
- [5] RD 153-34.0-20.363-99 Basic provisions of the methodology of infrared diagnostics of electrical equipment and overhead power lines [Electronic resource]. - URL: <http://www.thermoview.ru/pdf/rd.pd> (date of circulation 15.05.2024).

УДК 621.311, 621.331

Е.В. Воронина¹, А.В. Крюков^{1,2}

УЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР ПОРТАЛЬНОГО ТИПА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ 25 кВ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

Иркутский государственный университет путей сообщения¹
Иркутский национальный исследовательский технический университет²

Аннотация. Рассмотрены вопросы электромагнитной безопасности (ЭМБ) в тяговых сетях (ТС) 25 кВ железных дорог. Условия ЭМБ вблизи ТС определяют напряженности электромагнитных полей (ЭМП). Значительные уровни ЭМП возникают в аварийных режимах. На характер распределения ЭМП в пространстве оказывают влияние металлические опоры, вблизи которых поля приобретают сложную, трехмерную структуру. Этот фактор значительно усложняет задачу определения их напряженностей. Предложена методика и цифровые модели для расчета ЭМП с учетом жестких поперечин, представляющих собой металлические конструкции portalного типа. Модели реализованы в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.4.1 -2024, разработанном в ИргУПС.

Ключевые слова: электромагнитные поля, учет проводящих порталных конструкций, моделирование.

Тяговые сети 25 кВ железных дорог являются источником электромагнитных полей, которые оказывают негативное влияние на персонал и окружающую среду. При пробоях изоляторов и других повреждениях ТС могут возникать короткие замыкания (КЗ), сопровождающиеся генерацией магнитных полей высокой интенсивности. Несмотря на небольшую продолжительность они негативно влияют на электронные устройства, а также приводят к появлению значительных наведенных напряжений на смежных линиях электропередачи и связи. Поэтому при формировании интеллектуальных электрических сетей задачи обеспечения ЭМБ и снижения влияния ЭМП на персонал и оборудование приобретают особую актуальность.

Так, вопросы воздействия ЭМП, формирующихся около высоковольтного электрооборудования, на здоровье человека рассмотрены в [1, 2]. Анализ способов защиты от ЭМП с большими величинами напряженностей, воздействующих на персонал при обслуживании ТС с передвижных изолирующих конструкций – лейтеров, представлен в [3]. Задача моделирования ЭМП, генерируемого ТС решена в [4]. Метод прогнозирования ЭМП в эксперименте по короткому замыканию тяговой сети представлен в [5].

Анализ описанных публикаций показал, что особое внимание в них уделяется вопросам расчета ЭМП плоско-параллельного типа, создаваемых сложными ТС, с большим числом токоведущих частей. Однако вопросы моделирования ЭМП при наличии металлических конструкций, например, опор контактной

сети, в указанных работах не рассматриваются. Метод, позволяющий определять ЭМП сложной структуры вблизи опор КС, может быть реализован на основе подхода, предложенного в [6] и алгоритмов, реализованных в программном комплексе (ПК) Fazonord [7, 8].

Далее представлены результаты определения напряженностей электромагнитного поля, создаваемого тяговой сетью вблизи конструкции порталного типа в виде жесткой поперечины (рис. 1, а) при коротком замыкании (КЗ). Фрагмент визуального представления модели, сформированный в ПК *Fazonord*, версия 5.3.4.1-2024, показан на рис. 1, б.

Так как трехмерное электромагнитное поле имеет сложную пространственную структуру, необходимо использовать алгоритм [6], включающий следующие этапы:

- формирование цифровой модели ТС, в состав которой наряду с протяженными элементами (контактная сеть и рельсы) включается набор проводников ограниченной длины, моделирующих жесткую поперечину;
- расчет режима КЗ тяговой сети;
- вычисление вертикальных и горизонтальных составляющих напряженностей ЭМП и определение на их основе амплитуд напряженностей E_{\max} и H_{\max} ;
- формирование графических зависимостей $E_{\max} = E_{\max}(x)$; $H_{\max} = H_{\max}(x)$; $E_{\max} = E_{\max}(z)$; $H_{\max} = H_{\max}(z)$;
- построение объемных диаграмм ЭМП.

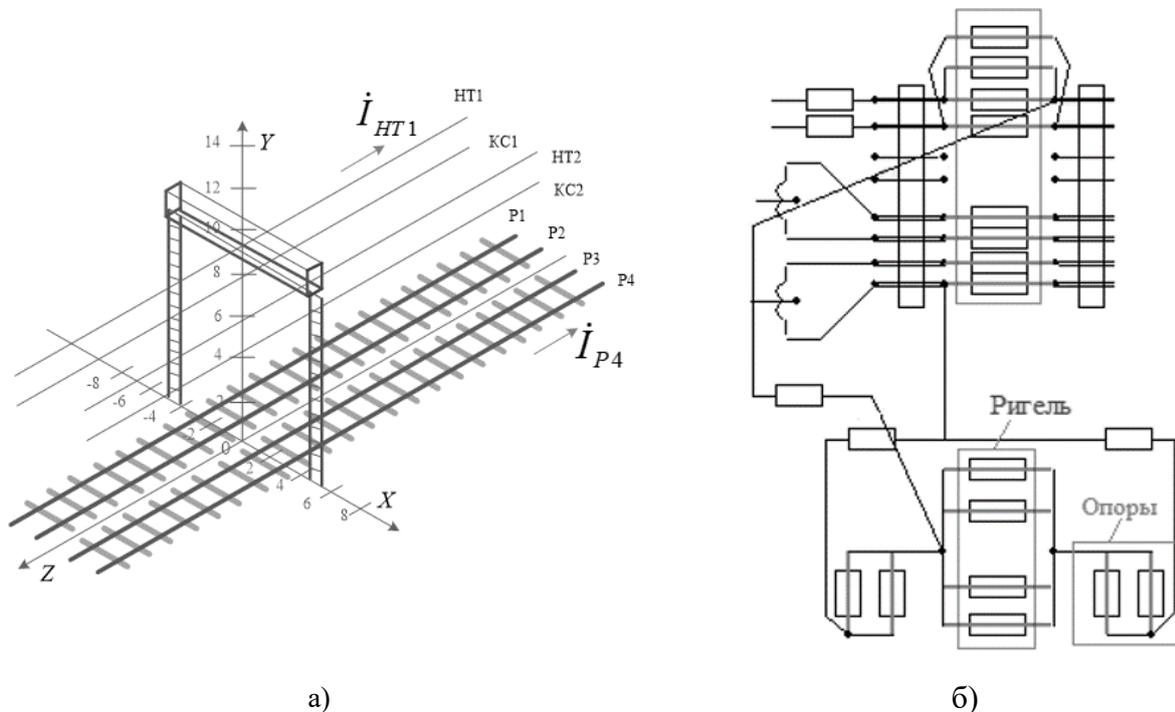


Рис. 1. Схема (а) и фрагмент отображения модели (б)

Расчеты ЭМП выполнены при замыкании контактного провода на жесткую поперечину и построены зависимости $E_{\max} = E_{\max}(x)$; $H_{\max} = H_{\max}(x)$; $E_{\max} = E_{\max}(z)$; $H_{\max} = H_{\max}(z)$, отвечающие вертикальной координате $y = 1,8$ м

(рис. 2 – 5). Пространственная структура распределения этих параметров показана на рис. 6.

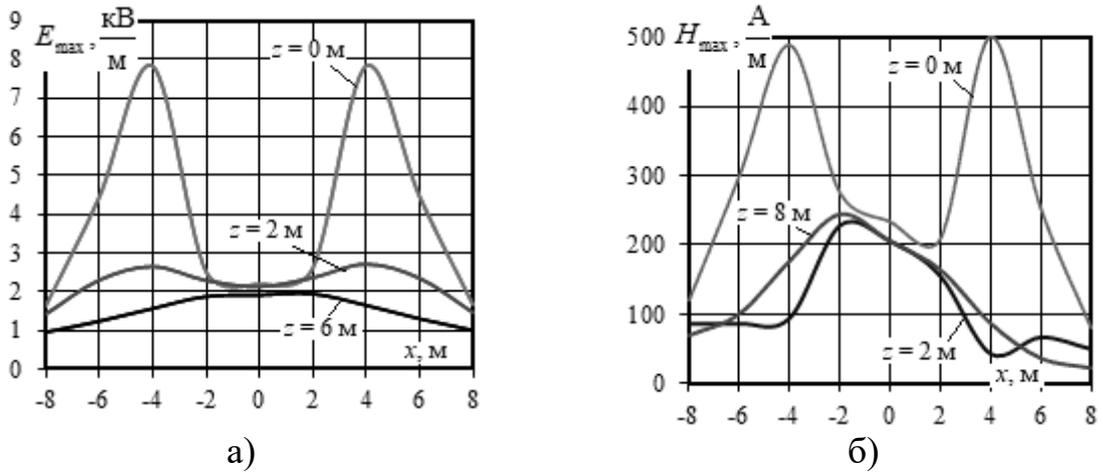


Рис. 2. Зависимости амплитуд $E_{\max} = E_{\max}(x)$; $H_{\max} = H_{\max}(x)$ напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей при КЗ

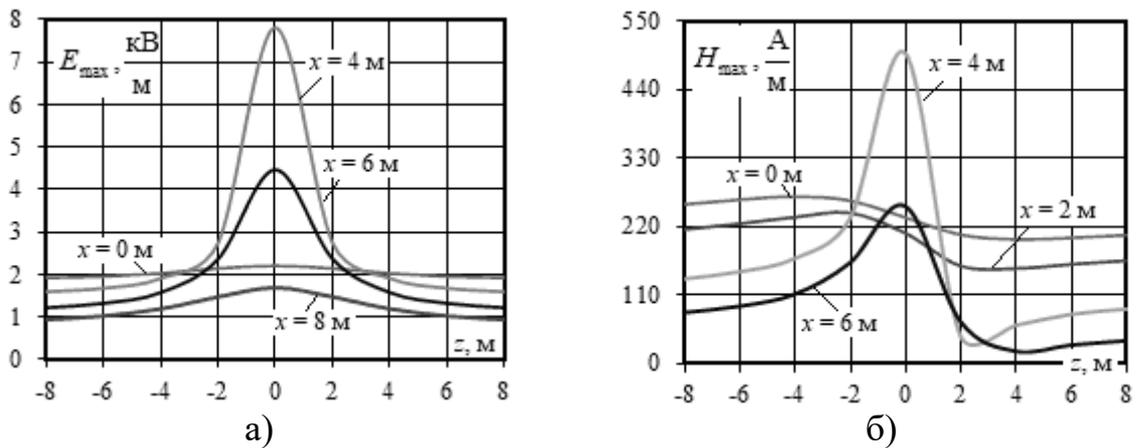


Рис. 3. Зависимости амплитуд $E_{\max} = E_{\max}(z)$; $H_{\max} = H_{\max}(z)$ электрического (а) и магнитного (б) полей при КЗ

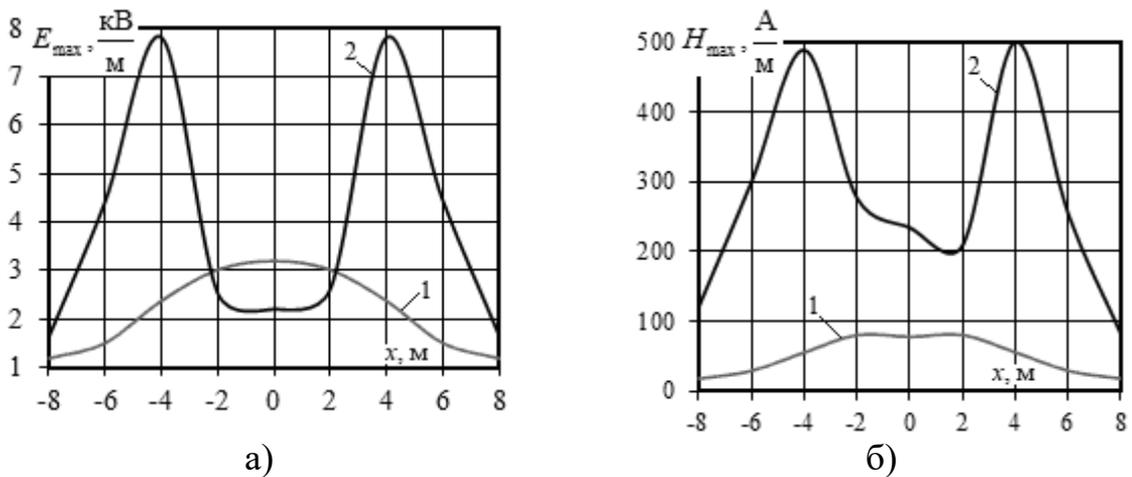


Рис. 4. Сравнительные графики амплитуд электрического (а) и магнитного (б) полей от координаты x при $z = 0$: 1 – при отсутствии КЗ; 2 – при КЗ

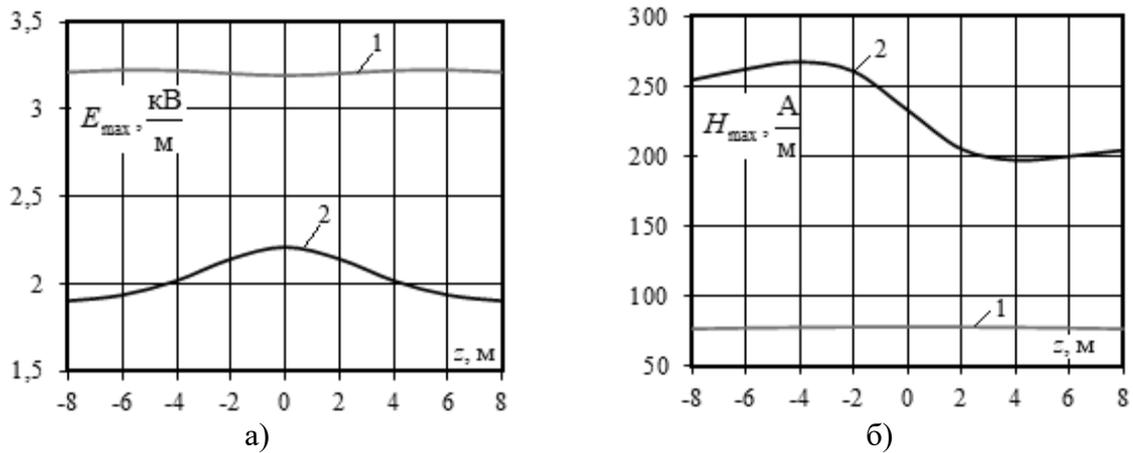


Рис. 5. Сравнительные графики амплитуд электрического (а) и магнитного (б) полей от координаты z при $x = 0$: 1 – при отсутствии КЗ; 2 – при КЗ

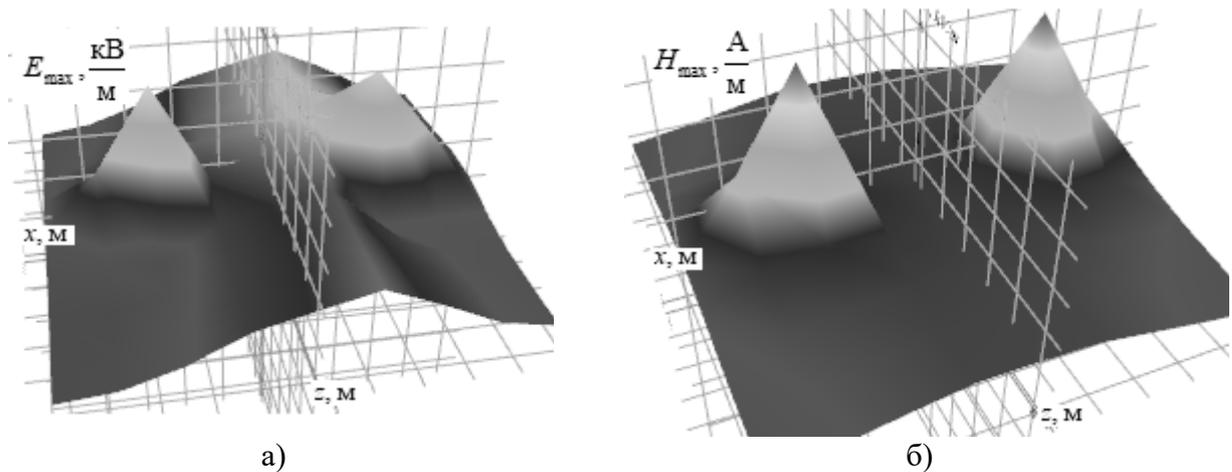


Рис. 6. Пространственная структура распределения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- максимальное значение амплитуды напряженности магнитного поля при замыкании контактной подвески на жесткую поперечину достигает 500 А/м; аналогичный параметр для электрического поля равен 7,8 кВ/м;
- наблюдается значительное увеличение E_{\max} и H_{\max} вблизи стоек поперечины; так, например, $E_{\max} = 7,8$ кВ/м, а $H_{\max} = 500$ А/м (рис. 2);
- наблюдается рост E_{\max} и H_{\max} на оси жесткой поперечины при $z = 0$ м; например, $E_{\max} = 2,2$ кВ/м, а $H_{\max} = 268$ А/м (рис. 3);
- трехмерное электромагнитное поле при замыкании контактной подвески через жесткую поперечину имеет сложную пространственную структуру (рис. 6);
- уровни H_{\max} значительно превышают допустимые значения в 80 А/м;
- кратковременное воздействие повышенных напряженностей ЭМП может негативно влиять на электронное оборудование устройств сигнализации, централизации и автоблокировки, которое может размещаться близи опор контактной сети.

Заключение. Представленная методика позволяет выполнять корректный учет влияния порталных металлических конструкций при расчете ЭМП тяговых сетей. В ее основу положена концепция проводников ограниченной длины, имитирующих стержни опор и ригель жесткой поперечины, а также систему коротких проводов, отвечающих контактной подвеске и рельсам. Они рассматриваются как объединенный объект, генерирующий поле. Определение напряженностей производится на основе расчета режима в фазных координатах.

Методика может использоваться при формировании информационного компонента киберфизических систем электроснабжения [9], отвечающего за анализ ЭМБ, для учета любых проводящих конструкций, расположенных вблизи тяговой сети.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Библиографический список

1. **Шарафиев, Н. И.** Влияние величины электромагнитного поля на здоровье человека / Н. И. Шарафиев, Т. И. Афанасьева // Вестник современных исследований. – 2018. – № 6.1(21). – С. 549-550.
2. **Анисимов, П.Н.** О влиянии электромагнитных полей на окружающую среду / Вестник магистратуры – №11-1 (50). – 2015 г. С. 64-65.
3. **Середкин, Д.А.** Электромагнитная безопасность в местах пересечения тяговых сетей и линий электропередач при работе на высоте // Современные технологии и научно – технический прогресс. Ангарск, 2021 г. – С. 237-238.
4. **L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen and D. Zhang,** "Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network," 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
5. **N. Lu, F. Zhu, C. Yang, Y. Yang, H. Lu and Z. Wang,** "The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 2029-2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
6. **Закарюкин, В.П., Крюков А.В.** Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей // System analysis and mathematical Modeling. – № 2. – 2021. С. 145-163.
7. **Закарюкин, В.П., Крюков А.В.** Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
8. **Закарюкин, В.П., Крюков А.В.** Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. Москва: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
9. **Yuri Bulatov, Andrey Kryukov, Konstantin Suslov, Pio Lombardi, Przemysław Komarnicki.** A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. 2022. 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). Advances in Engineering Research.

E.V. Voronina¹, A.V. Kryukov^{1,2}

MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF 25 KV TRACTION NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT A RIGID CROSSBAR IN EMERGENCY MODE

Irkutsk State Transport University Irkutsk, Russia¹
Irkutsk National Research Technical University²

Abstract. The issues of electromagnetic safety in traction networks of 25 kV railways are considered. Safety conditions near traction networks determine the strength of electromagnetic fields. Significant levels of tension arise in emergency conditions. The nature of the distribution of electromagnetic fields in space is influenced by metal supports, near which the fields acquire a complex, three-dimensional structure. This factor significantly complicates the task of determining their tensions. A methodology and digital models are proposed for calculating electromagnetic fields taking into account rigid crossbars, which are portal-type metal structures. The models are implemented in the Fazonord software package, version 5.3.4.1 -2024, developed at the Irkutsk State Transport University.

Key words: electromagnetic fields, accounting for conductive portal structures, modeling.

References

- [1] Sharafiev, N. I. The influence of the magnitude of the electromagnetic field on human health / N. I. Sharafiev, T. I. Afanasyeva // Bulletin of Modern Research. – 2018. – № 6.1(21). – Pp. 549-550.
- [2] Anisimov P.N. On the influence of electromagnetic fields on the environment / Bulletin of the magistracy No.11-1 (50) 2015 pp. 64-65.
- [3] Seredkin D.A. Electromagnetic safety at the intersection of traction networks and power lines when working at height / Modern technologies and scientific and technical progress. Angarsk, 2021, pp. 237-238.
- [4] L. Zhang, Y. Zhu, S. Chen and D. Zhang, "Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network," 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
- [5] N. Lu, F. Zhu, C. Yang, Y. Yang, H. Lu and Z. Wang, "The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 2, pp. 2029-2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
- [6] Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electromagnetic fields created by a system of short current-carrying parts // System analysis and mathematical Modeling. No. 2. 2021. pp. 145-163/
- [7]. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk, 273 p.
- [8]. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 156 p.
9. Yuri Bulatov, Andrey Kryukov, Konstantin Suslov, Pio Lombardi, Przemysław Komarnicki. A Cyber-physical Approach to Control and Management of Railway Power Supply Systems. 2022. 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). Advances in Engineering Research.

УДК 621.31

Е.И. Губская, В.В. Колобов, А.С. Карпов, В.В. Ярошевич

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук (ЦЭС КНЦ РАН)

Аннотация. В статье описан опыт выполнения сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН исследования качества электроэнергии в сети металлургического предприятия и разработки рекомендаций по компенсации негативного влияния дуговых сталеплавильных печей (ДСП), функционирующих на площадке промышленного объекта, на данную электросеть. Представлен краткий обзор наиболее широко распространённых устройств компенсации реактивной мощности и проведен анализ эффективности их применения для сглаживания колебаний питающего напряжения. Приведена статическая модель, выполненная в среде *АТР-ЕМТР*, которая имитирует режим компенсации реактивной мощности ДСП на участке исследуемой системы электроснабжения.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, фликер, компенсация реактивной мощности, *АТР-ЕМТР*

Введение

Надежность и эффективность энергообеспечения потребителей требуют обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) высоковольтных установок. Соблюдение требований ЭМС напрямую зависит от соответствия значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) нормам действующего в РФ ГОСТ [1], поскольку качество электроэнергии (КЭ) позволяет выявить проблемные участки электросети и, следовательно, потенциальные сбои в работе электрооборудования (выход из строя отдельных установок, возникновение аварийных режимов и т.п.).

В ЦЭС КНЦ РАН мониторинг ПКЭ на различных объектах энергосистемы Мурманской области ведется с 2004 года. При этом научные исследования электромагнитной совместимости на промышленных предприятиях были произведены на основании запросов индустриальных партнеров, поступивших по причине появления на объектах электроэнергетики серьезных нарушений или аварий.

На основе накопленной базы данных (протоколы регистраций ПКЭ) в рамках работы над проектом РНФ № 24-29-20051 решается проблема выявления причинно-следственных связей искажений КЭ для дальнейшего определения наиболее эффективных точечных мероприятий по сглаживанию возмущений на проблемных участках энергосистемы. Это, в свою очередь, позволит повысить безаварийность и устойчивость систем электроснабжения как промышленных, так и бытовых потребителей, что является одним из важнейших условий устойчивого развития Арктической зоны РФ.

Анализ КЭ в сети металлургического предприятия

В 2022 году ЦЭС КНЦ РАН получил запрос на исследование качества электроэнергии на одном из предприятий тяжелой промышленности. Полученные данные легли в основу отработки методики исследования действующих подстанций по выявлению причин возникновения аварийных режимов электросетей.

Мониторинг ПКЭ в сети объекта был произведен посредством сертифицированных анализаторов *Metrel* типа *MI 2893* (класс А по ГОСТ [2]) в соответствии с ГОСТ [1–3]. По результатам измерений выявлено отклонение ряда показателей от нормированных значений. Среди зафиксированных искажений КЭ наиболее выделяется многократное превышение кратковременной и длительной доз фликера установленных норм.

Высокий уровень колебаний напряжения и, соответственно, фликера в сети металлургического цеха обусловлен главным образом работой, нескольких дуговых сталеплавильных печей (ДСП), нагрузка которых изменяется резко, скачкообразно в широком диапазоне (рис. 1).

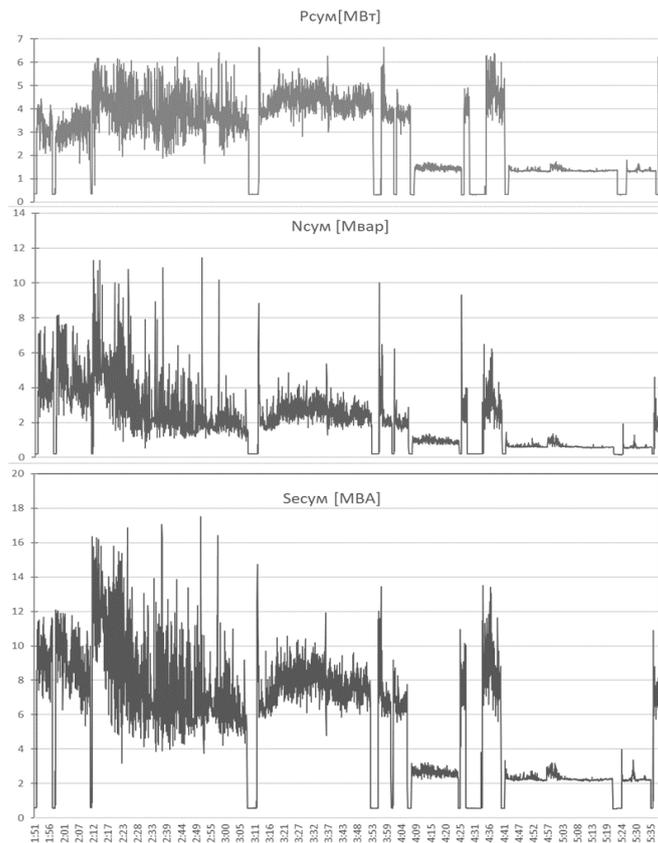


Рис. 1. Зарегистрированные графики мощности (активной P , МВт; реактивной Q , Мвар и полной Se , МВА), потребляемой ДСП

Вследствие этой особенности ДСП оказывают мощное негативное воздействие на других потребителей, подключенных к той же системе электроснабжения. Наиболее чувствительны к фликеру осветительные приборы, электрические вращающиеся машины, устройства на основе силовой электроники, а также электротермические и другие установки. Кроме того, высокий уровень фликера отрицательно влияет не только на другое электрооборудование, но и непосредственно на работу ДСП. Это связано с тем, что эффективность технологического процесса плавки вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики электрической дуги напрямую зависит от поддержания стабильного напряжения электросети.

Для сглаживания этих возмущений, а следовательно, стабилизации напряжения питающей сети эффективной и достаточной мерой является компенсация реактивной мощности.

Краткий обзор устройств компенсации реактивной мощности ДСП

В настоящее время на практике наиболее часто встречается использование следующих компенсирующих устройств.

Статический тиристорный компенсатор (*static VAR compensator*, сокр. *SVC*) включает основные элементы двух типов: тиристорно-реакторные группы (ТРГ) и тиристорно-конденсаторные группы (ТКГ) – а также фильтро-компенсирующие цепи (ФКЦ), которые предназначены в основном для подавления гармоник низкого порядка, генерируемых самим компенсатором [4]. Исполнение схемы SVC встречается в двух видах, как показано на рис. 2.

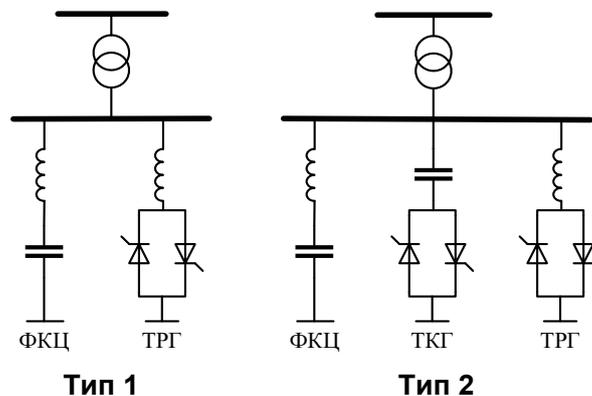


Рис. 2. Схема статического тиристорного компенсатора

Тиристорный компенсатор позволяет поддерживать высокий коэффициент мощности независимо от колебаний реактивной мощности, вызванных работой ДСП, а также подавлять высшие гармоники, генерируемые в сеть печью. Использование данной установки является наименее дорогостоящим из возможно допустимых способов компенсации. Однако необходимо отметить, что *SVC* позволяет снизить кратковременную дозу фликера максимум в 2–2,5 раза [5]. Достижение более высоких показателей ограничено временными задержками, которые

составляют до 100 мс [6] (в зависимости от производителя), и динамическим взаимодействием ФКЦ в составе SVC с электрической сетью.

Статический синхронный компенсатор (static synchronous compensator, сокр. STATCOM), известный также как *статический генератор реактивной мощности* (static VAR generator, сокр. SVG), конструктивно состоит из тонкопленочных конденсаторов постоянного тока, управляемого инвертора напряжения на базе IGBT транзисторов и реактора или трансформатора, через который устройство подключается к сети [7], как показано на рис. 3.

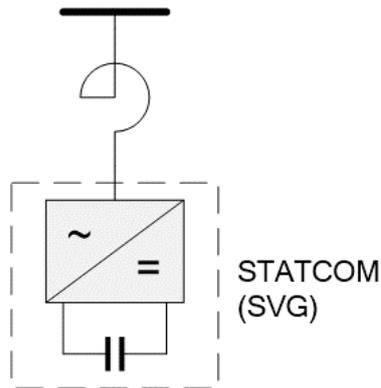


Рис. 3. Схема статического синхронного компенсатора

STATCOM (SVG) формирует выходное напряжение по принципу многоуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ): фазное напряжение генератора образовано суммарным выходным напряжением всех силовых ячеек. В сравнении с SVC статический синхронный компенсатор отличается, во-первых, меньшим на порядок временем отклика на изменения контролируемого параметра, которое составляет не более 5 мс [8]; во-вторых, возможностью снизить кратковременную дозу фликера минимум в 4 раза [9]. Дополнительным достоинством STATCOM (SVG) является компактность конструкции за счет отсутствия высокомошных конденсаторов.

Сравнительный анализ применения технологий SVC и STATCOM (SVG) для компенсации реактивной мощности дуговых электропечей приведен в исследованиях [9–13]. Авторы выражают единое мнение, что STATCOM (SVG) наиболее эффективно решает проблему колебаний питающего напряжения и фликера. Это обосновано следующими выводами.

1. За счет существенно сокращенных временных задержек STATCOM (SVG) значительно лучше снижает уровень фликера относительно SVC той же мощности. При этом эффект сглаживания возмущения может быть усилен путем увеличения мощности устройства, что невозможно в случае с тиристорным компенсатором.

2. При низком напряжении сети STATCOM (SVG) также обеспечивает сглаживание фликера лучше, чем SVC, так как с уменьшением напряжения реактивная мощность, генерируемая STATCOM (SVG), сокращается линейно, в то время

как реактивная мощность на выходе SVC , пропорциональная квадрату величины напряжения, стремительно падает, что нарушает стабильность напряжения электросети.

3. Другими преимуществами статического генератора являются более плавное регулирование реактивной мощности и значительно меньшая генерация высших гармоник в сеть.

Недостатком $STATCOM$ (SVG) по отношению к SVC следует указать более высокую стоимость устройства.

Моделирование режима компенсации реактивной мощности на участке действующей сети 10 кВ

В качестве решения проблемы колебаний напряжения и фликера в сети исследуемого объекта также предлагается подключение параллельно с потребителем (электропечной трансформатор (ЭПТ) + ДСП) компенсирующего устройства (КУ), как показано на рис. 4.

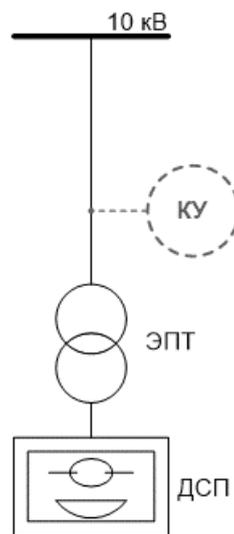


Рис. 4. Упрощенная схема электроснабжения ДСП

Это КУ является, по сути, синхронным компенсатором, работа которого аналогична работе синхронного двигателя без нагрузки на валу [14,15]. Компенсация реактивной мощности не производится, если ЭДС компенсатора \dot{E}_k численно равна напряжению сети \dot{U}_c (рис. 5, а). Когда ЭДС устройства достигает значения \dot{E}_k' , превышающего \dot{U}_c на величину падения напряжения $\Delta\dot{E}$ (рис. 5, б), под действием $\Delta\dot{E}$ в сети возникает реактивный ток \dot{I}_p' , который опережает напряжение сети на 90° (емкостной ток). Синхронный компенсатор в этом случае выдает реактивную мощность в сеть. Если же $\dot{E}_k'' < \dot{U}_c$ (рис. 5, в) генерируется ток \dot{I}_p'' , отстающий от напряжения сети на 90° (индуктивный ток), – компенсатор при этом потребляет реактивную мощность.

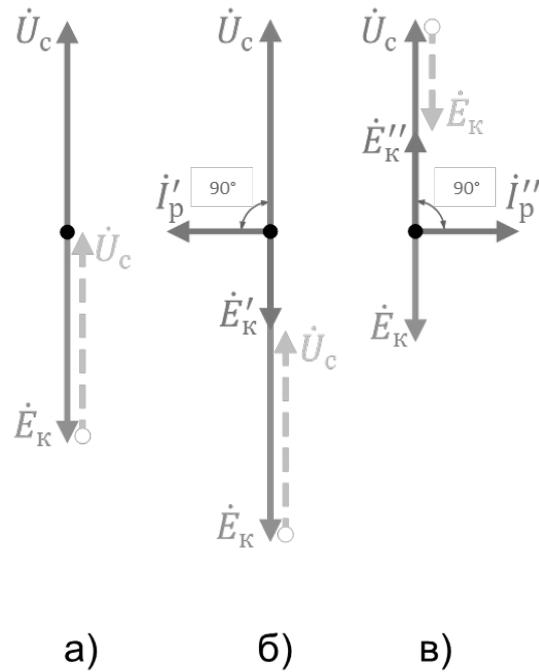


Рис. 5. Векторные диаграммы синхронного компенсатора: а – компенсация отсутствует; б – емкостной режим; в – индуктивный режим

Работу электросети в режиме компенсации реактивной мощности ДСП демонстрирует статическая модель, выполненная в среде *АТР-ЕМТР*, как показано на рис. 6.

Использованные для создания модели элементы, а также их назначение сведены в табл. 1. Представленная модель отражает конфигурацию исследуемого участка сети, заданные параметры включают реальные паспортные данные электропечного трансформатора.

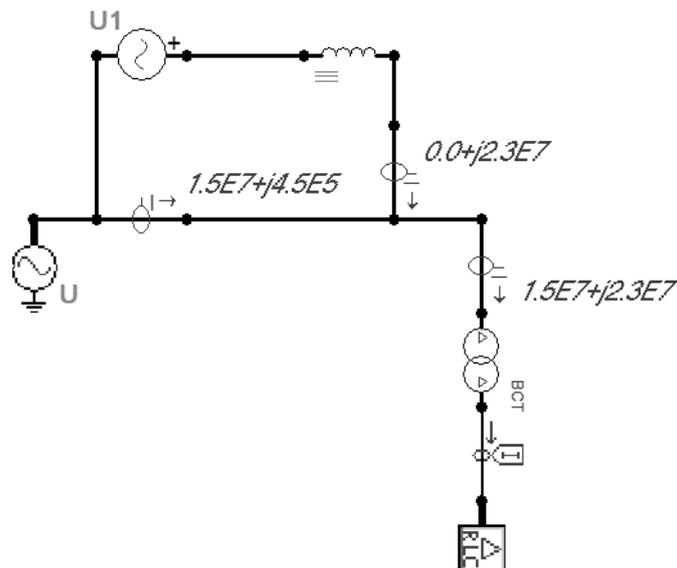
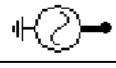
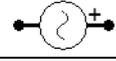
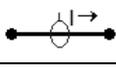
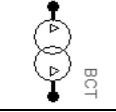


Рис. 6. Общий вид модели рассматриваемого участка сети 10 кВ в АТР-ЕМТР

Описание элементов модели

Элемент	Описание
	Трехфазный источник переменного напряжения.
	
	Элемент для моделирования трёхфазной цепи, состоящий из трёх параллельных RLC цепей.
	Элемент, измеряющий ток, А
	Модель двухобмоточного трансформатора. Задаются паспортные данные электропечного трансформатора.
	Элемент для моделирования трёхфазной цепи, состоящий из трёх RLC цепей, соединённых по схеме «треугольник». Имитирует нагрузку ДСП.

Модель имитирует работу исследуемой системы в момент, когда нагрузка печи максимальна (режим горения электрических дуг). При этом источник ЭДС U_1 выдает чисто реактивный ток, который накладывается на реактивную составляющую тока в сети. Таким образом компенсатор обеспечивает сглаживание резких колебаний реактивной мощности в сети.

Применение компенсирующего устройства позволит поддерживать баланс реактивной мощности в системе электроснабжения и, следовательно, снизить колебания питающего напряжения и уровень фликера.

Заключение

Вследствие нелинейного и резкопеременного характера нагрузки ДСП в сетях металлургических предприятий актуальной является проблема значительных колебаний питающего напряжения, что приводит к возникновению фликера. В настоящее время этот вопрос не имеет универсального стандартизированного (закрепленного нормами) решения.

Радикальные способы сглаживания искажений, вызванных работой ДСП, включают замену силового трансформатора на более мощный, а также реорганизацию действующей схемы электроснабжения в целом (в том числе организация питания ДСП от отдельного источника). Однако существенный недостаток перечисленных мер заключается в требовании от предприятий высоких финансовых затрат. В связи с этим общепринятым способом является применение устройств компенсации реактивной мощности, таких как SVC и STATCOM (SVG). При этом STATCOM (SVG) считается более эффективным за счет ряда технических преимуществ.

Тем не менее, стоит отметить, что использование этих устройств часто не позволяет удовлетворить в полной мере требования к качеству электроэнергии,

поскольку настройки, заложенные заводом-изготовителем, не оптимизированы для каждого отдельного случая.

Таким образом, достичь наиболее полного соответствия качества электроэнергии в сети, обеспечивающей питание ДСП, установленным нормам теоретически возможно с помощью «умного» компенсирующего устройства, действующего по принципу технологии *STATCOM (SVG)*. Такое устройство индивидуально настраивается для работы на конкретном промышленном объекте и должно обеспечивать практически мгновенное изменение вырабатываемой реактивной мощности. Для этого необходимо минимизировать временные задержки между обработкой входного сигнала и генерированием выходного, в связи с чем требуется определение оптимальной конфигурации схемы устройства, а также разработка алгоритма для блока управления. Решение этой проблемы требует проведения отдельного специализированного исследования, в основу которого может лечь представленная модель, параметры которой соответствуют реальному объекту.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 24-29-20051.

Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
2. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. – 60 с.
3. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2015. – 46 с.
4. **Eremia, M.** et al. *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*. Hoboken, New Jersey: Wiley & IEEE Press, 2016. – P. 271-338.
5. Static Var Compensator The key to better arc furnace economy // ABB Group. Leading digital technologies for industry [Электронный ресурс]. URL: https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004faee9/A02-0102_E.pdf (дата обращения: 20.05.2024).
6. Статические тиристорные компенсаторы СТК // Группа СВЭЛ [Электронный ресурс]. URL: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/staticheskie-tiristornye-kompensatory-stk/> (дата обращения: 20.05.2024).
7. Статические генераторы реактивной мощности СТАТКОМ // Группа СВЭЛ [Электронный ресурс]. URL: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-statkom/> (дата обращения: 20.05.2024).
8. Статические генераторы реактивной мощности (СТАТКОМ, СГРМ, SVG) // НИИ «РУ-ИНЖИНИРИНГ» [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-drive.com/products/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (дата обращения: 20.05.2024).
9. Static synchronous compensator (STATCOM) for arc furnace and flicker compensation. Report prepared by Working Group B4.19, published by CIGRE as “Technical Brochure No 237” in 2003. – 170 p.

10. **Zhang Z.**, Fahmi N.R., Norris W.T. Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey) // 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 10-13 September, 2001, Porto, Portugal. IEEE, 2001. P. 508-513.
11. **Schauder C.** STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations // 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meet, Conference Proceedings, 18-22 July, 1999, Edmonton, AB, Canada. IEEE, 1999. P. 1109-1112.
12. **Samet H.**, Jarrahi M.A. A comparison between SVC and STATCOM in flicker mitigation of electric arc furnace using practical recorded data // 2015 30th Power System Conference (PSC), 23-25 November, 2015, Tehran, Iran. IEEE, 2015. P. 300-304.
13. **Kashani M.G.**, Babaei S., Bhattacharya S. SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement // 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 08-11 July, 2013, Rogers, AR, USA. IEEE, 2013. P. 1-7.
14. **Кацман, М.М.** Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 496 с.
15. **Кабышев, А.В.** Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.

E.I. Gubskaya, V.V. Kolobov, A.S. Karpov, V.V. Yaroshevich

COMPENSATION OF THE ELECTRIC ARC FURNACE IMPACT ON ELECTRICAL NETWORKS

Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences
Apatity, Russia

Abstract. The article describes experience of the NERC KSC RAS staff in conducting investigation of power quality in a smelter network and developing recommendations to compensate for the negative impact of electric arc furnaces (EAF) of this industrial enterprise on the network. A brief review of the most widespread reactive power compensation devices is presented, and the efficiency of their application for voltage fluctuation mitigation is analysed. A static ATP-EMTP model which simulates the EAF reactive power compensation at the section of the power supply system under study is given.

Key words: electric arc furnace, electromagnetic compatibility, power quality, flicker, reactive power compensation, ATP-EMTP

References

- [1] Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems. Introduced Jul. 1, 2014. Moscow: Standartinform GOST 32144-2013., pp. 20, 2014 (in Russian).
- [2] Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices. Introduced Jan. 1, 2014. Moscow: Standartinform GOST 30804.4.30-2013., pp. 60, 2014 (in Russian).
- [3] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Control and monitoring of electric power quality in the public power supply systems. Introduced Jan. 1, 2015. Moscow: Standartinform GOST 33073-2014., pp. 46, 2015 (in Russian).
- [4] M. Eremia, Ch. Liu, A. Edris, *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*. Hoboken, New Jersey: Wiley & IEEE Press, 2016, pp. 271-338.
- [5] Static Var Compensator The key to better arc furnace economy [Online]. Available at: <https://library.e.abb.com/public/6c4608703c0e7760832577bb004faee9/A02-0102E.pdf> (Accessed: May 20, 2024).
- [6] Statische tiristorne kompensatory STK [Static thyristor compensators SVC]. [Online]. Available at: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/statische-tiristorne-kompensatory-stk/> [Accessed: May 20, 2024] (In Russian).
- [7] Statische generatory reaktivnoj moshchnosti STATKOM [Static VAR generator STATCOM]. [Online]. Available at: <https://svel.ru/catalog/ustroystva-uluchsheniya-kachestva-elektricheskoy-energii/statische-generatory-reaktivnoj-moshchnosti-statkom/> [Accessed: May 20, 2024] (In Russian).
- [8] Statische generatory reaktivnoj moshchnosti (STATKOM, SGRM, SVG) [Static VAR generator (STATCOM, SVG, SVG)]. [Online]. Available at: <https://ru-drive.com/products/statische-generatory-reaktivnoj-moshchnosti-6-35-kv/> [Accessed: May 20, 2024] (In Russian).
- [9] Static synchronous compensator (STATCOM) for arc furnace and flicker compensation. Report prepared by Working Group B4.19, published by CIGRE as “Technical Brochure No 237” in 2003, 170 p.

-
- [10] Z. Zhang, N.R. Fahmi, W.T. Norris, Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey), 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 10-13 September, 2001, Porto, Portugal, pp. 508-513.
- [11] C. Schauder, STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations, 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meet, Conference Proceedings, 18-22 July, 1999, Edmonton, AB, Canada, pp. 1109-1112.
- [12] H. Samet, M.A. Jarrahi, A comparison between SVC and STATCOM in flicker mitigation of electric arc furnace using practical recorded data, 30th Power System Conference (PSC), 23-25 November, 2015, Tehran, Iran, pp. 300-304.
- [13] M.G. Kashani, S. Babaei, S. Bhattacharya, SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement, 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 08-11 July, 2013, Rogers, AR, USA, pp. 1-7.
- [14] M.M. Kacman, *Jelektricheskie mashiny: uchebnik dlja stud. uchrezhdenij sred. prof. obrazovanija [Electric machines: textbook for students of secondary professional education institutions]*. Moscow: Izdatel'skij centr "Akademija", 2017 (in Russian).
- [15] A.V. Kabyshev, *Kompensacija reaktivnoj moshhnosti v jelektroustanovkah promyshlennyh predpriyatij [Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises]*. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2012 (In Russian).

УДК 621.316

М.С. Каретников, Е.М. Шишков**ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА СТЕН МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ
НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ В КВАРТИРАХ**

Самарский государственный технический университет

Аннотация. В статье проведен анализ влияния материала стен зданий на электропотребление жилых помещений с помощью применения метода машинного обучения кластеризации *K-means* для анализа данных электропотребления жилых помещений в периоды различных экстремумов температуры внешней среды. Произведено сравнение двух типов зданий высотой пять этажей с разным материалом стен: железобетонные и кирпичные.

Ключевые слова: кластеризация *K-means*, энергоэффективность зданий, теплоизоляция, электропотребление, факторы влияния.

Изучение факторов, влияющих на потребление электроэнергии в жилых помещениях, является актуальной темой в современном обществе. Одним из основных факторов, влияющих на электропотребление, является энергоэффективность здания. Энергоэффективность дома зависит от множества факторов, среди которых первостепенную важность имеет материал конструкции [1]. Классы энергоэффективности многоквартирных домов, утвержденные приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 06.06.2016 №399/пр определяются исходя из определения величины отклонения фактических или расчетных значений показателя удельного годового расхода энергетических ресурсов от базовых значений [2]. В домах с высокими классами энергоэффективности собственники платят меньше за коммунальные услуги за счет меньшего потребления энергоресурсов.

Исследования влияния материала стен на электропотребление в жилых помещениях имеют практическую ценность для различных заинтересованных сторон:

– Для застройщиков и архитекторов эти исследования могут помочь в выборе оптимальных материалов для строительства многоквартирных домов с учетом энергоэффективности и улучшения комфортности жилья для будущих жильцов, так как помещения будут лучше сохранять тепло зимой и прохладу летом. Такие исследования могут придать преимущество застройщикам и архитекторам на рынке недвижимости. Дома, построенные с использованием наиболее энергоэффективных материалов, могут больше привлекать покупателей и арендаторов, так как обладают более низкими коммунальными платежами и экологической устойчивостью.

– Для жильцов эти исследования могут служить руководством при выборе жилья, позволяя учесть комфортность жилья и потенциальные затраты на электроэнергию при проживании в различных типах домов.

– Исследования также могут быть полезными для государственных органов и экологических организаций, которые стремятся снизить энергопотребление и улучшить энергоэффективность зданий в целом. Исследования электропотребления зданий помогают разрабатывать энергетическую политику, направленную на снижение потребления электроэнергии и улучшение энергоэффективности зданий в целом, внедрять правила и регуляции, направленные на снижение энергопотребления и повышение энергоэффективности в строительстве и эксплуатации зданий, поддерживать инициативы, направленные на улучшение экологической устойчивости зданий, такие как использование устойчивых материалов с низким содержанием углерода, пропагандировать экологически чистое строительство и повышать осведомленность об энергоэффективности зданий. Это может включать проведение образовательных кампаний, разработку субсидий и стимулов для застройщиков, а также создание сертификационных программ для энергоэффективных зданий.

Внедрение гарантирующим поставщиком электроэнергии интеллектуальной системы учета в исследуемых домах позволило получить данные с приборов учета, на которых был применен метод машинного обучения без учителя – кластеризация *K-means* для оценки влияния теплоизоляционных свойств стен здания на электропотребление.

Самыми распространенными многоквартирными домами в стране являются 5-этажные панельные, а также, в меньшей степени, кирпичные [3].

В данном исследовании рассматривались два типа домов одной этажности (5 этажей) но различные по материалу стен: панельные (железобетон) и кирпичные. Чем больше теплопроводность материала, тем худшими теплоизоляционными свойствами он обладает. Железобетон обладает коэффициентом теплопроводности $2,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ \text{C})$, а кирпич $0,3\text{-}0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ \text{C})$. Толщина дома из кирпича достигает 40-50 см, что тоже способствует лучшей теплоизоляции, чем толщина панельного дома: от 30 до 35 см. Поэтому кирпичные дома считаются более комфортными по поддержанию температуры внутри, чем панельные [4]. Стены панельных домов сильнее нагреваются в жаркую погоду, и теряют тепло в холодную, из-за чего может чаще использоваться климатическое оборудование для поддержания оптимальной температуры в помещении. Поэтому можно предположить, что потребление в таких домах в жаркие или холодные периоды может быть выше, чем в кирпичных.

Данные для исследования были получены из интеллектуальной системы учета гарантирующего поставщика и представляют собой потребление электроэнергии жилых помещений в исследуемых многоквартирных домах за определенный период по 48 бытовым потребителям.

Для анализа влияния теплоизоляции дома на месячное потребление электроэнергии в жилых помещениях можно рассмотреть различные методы, такие как иерархическая кластеризация, *t-SNE*, *DBSCAN* и *K-means*. Однако для того чтобы выяснить, в каком из двух типов домов жилые помещения имеют высокое

или низкое потребление относительно другого дома, нужно задать два кластера. K-means является методом кластеризации, который разделяет данные на заранее заданное количество кластеров. Алгоритм итеративно перераспределяет точки данных между кластерами, минимизируя сумму квадратов расстояний между точками и центроидами кластеров. Это позволяет выделить группы схожих объектов и провести анализ энергопотребления зданий.

Для интерпретации кластеризации применяется оценка силуэта (*silhouette score*). Эта метрика оценивает качество кластеризации и позволяет оценить, насколько объекты внутри кластера схожи друг с другом и насколько они отличаются от объектов в других кластерах. Оценка силуэта рассчитывается по следующей формуле:

$$s(i) = \frac{b(i)-a(i)}{\max\{a(i),b(i)\}}, \tag{1}$$

$$-1 \leq s(i) \leq 1$$

где $a(i)$ – среднее внутрикластерное расстояние, $b(i)$ – среднее расстояние до ближайшего кластера. Чем ближе значение коэффициента силуэта к 1, тем лучше кластеризация. Значение близкое к -1 указывает на неправильную кластеризацию, а значение близкое к 0 может указывать на перекрывающиеся кластеры или наличие выбросов.

Для выполнения кластеризации взято суточное потребление электроэнергии жилых помещений 09.09.2023 с минимальной среднесуточной температурой перед началом отопительного сезона (+5.6 C°). Результаты кластеризации K-means представлены на рис.1.

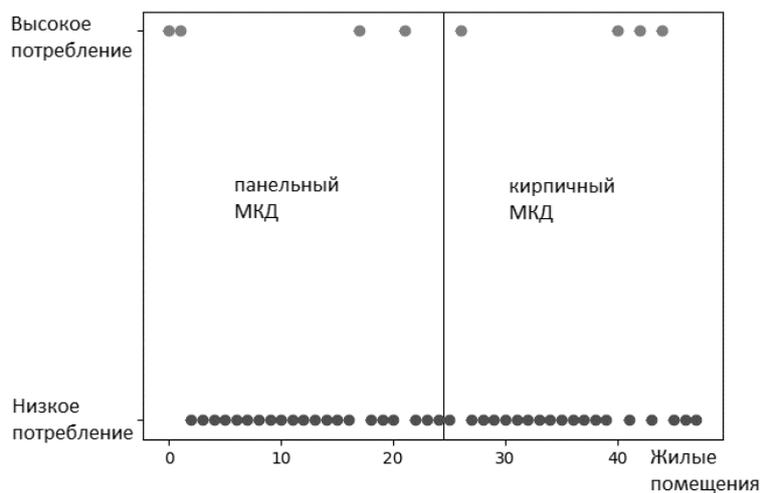


Рис. 1. Результаты кластеризации суточного потребления электроэнергии жилых помещений при среднесуточной температуре +5.6 C°

В данном случае оценка силуэта равна 0.709 что указывает на хорошее качество кластеризации.

Как видно из рис.1, бытовые потребители из обоих типов домов распределены по величине электропотребления одинаково. Отсюда следует, что данная температура за сутки не оказала влияния на разницу электропотребления жилых помещений в данных домах.

Аналогично проведен анализ после окончания отопительного сезона 08.05.2023 (+3.1 C°), результаты которого представлены на рис.2.

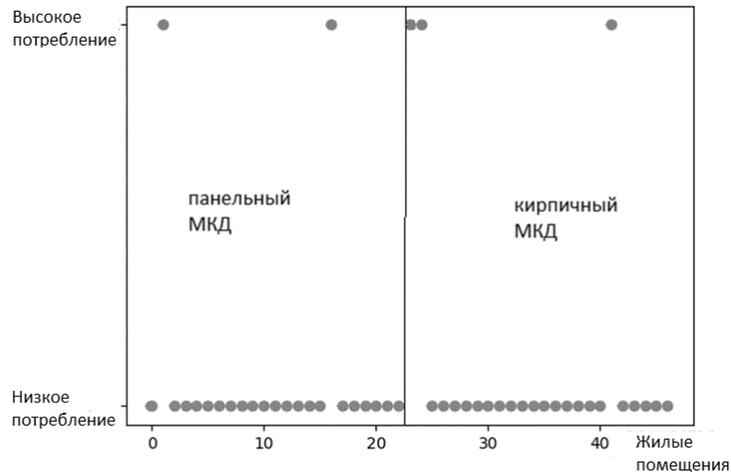


Рис. 2. Результаты кластеризации суточного электропотребления жилых помещений при среднесуточной температуре +3.1 C°

Оценка силуэта равна 0.724 что свидетельствует о хорошем качестве кластеризации.

Как видно на рис.2, суточное электропотребление жилых помещений в панельном многоквартирном доме и кирпичном при температуре +3.1 C° существенно не отличаются.

Далее произведена кластеризация потребления электроэнергии жилыми помещениями в рассматриваемых домах при минимальной среднесуточной температуре воздуха -22.0 C° 13.01.2024. Результаты кластеризации приведены на рис. 3.

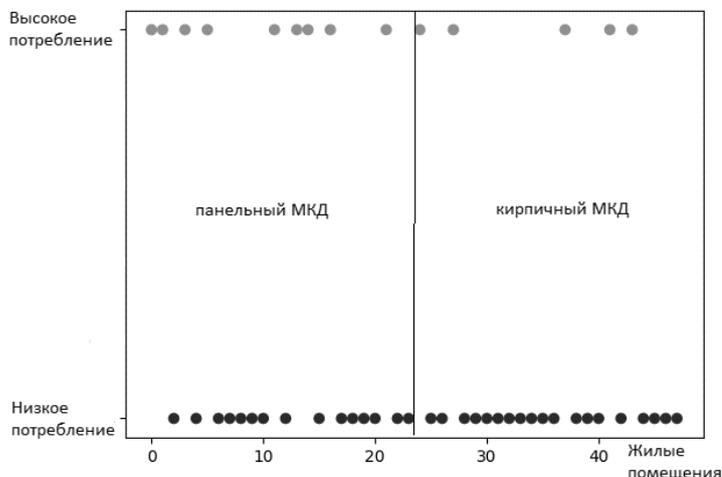


Рис. 3. Результаты кластеризации суточного электропотребления жилых помещений при среднесуточной температуре -22.0 °C

Оценка силуэта равна 0.588, что является хорошим показателем кластеризации.

На рис. 3 видно, что большинство жилых помещений, принадлежащих панельному многоквартирному дому, попало в кластер 2, характеризующимся высоким потреблением. Это может быть обусловлено значительными теплотерями в панельных домах под воздействием значительно низкой температуры из-за высокой теплопроводности железобетона и недостаточной толщины внешних стен.

Кроме того, изменение электропотребления в связи с изменением температуры происходит не сразу, а постепенно, что обуславливается тепловой инерционностью домов [5]. Учитывая это, было принято решение расширить период до 1 месяца. Месячные затраты на электроэнергию в жилых помещениях в начале и конце отопительного сезона не показали значительной разницы между выбранными типами домов.

Далее была проведена кластеризация этих же многоквартирных домов за самый жаркий месяц 2023 года – июль (среднее значение температуры воздуха составляет +22.6 °C). Полученные результаты показаны на рис. 3.

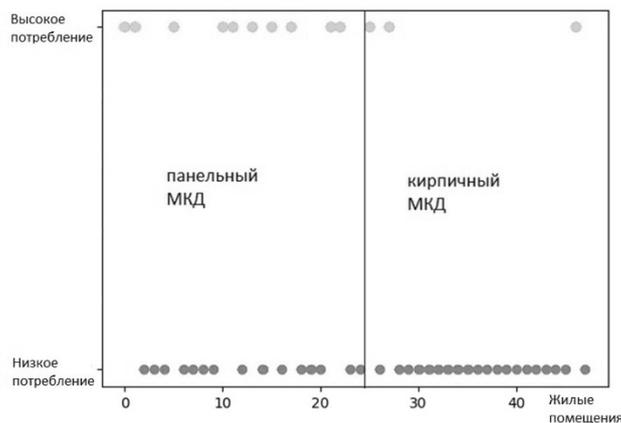


Рис. 4. Результаты кластеризации при среднемесячной температуре +22.6 °C

В данном случае оценка силуэта равна 0,628, что означает хорошее качество кластеризации.

По полученным результатам видно, что в июле жилые помещения из панельного дома имели более высокое электропотребление, чем жилые помещения в кирпичном доме, что может быть обусловлено частым использованием климатического оборудования (кондиционеры, вентиляторы) вследствие сильного нагрева стен из-за более высокой теплопроводности железобетона.

На этапе разработки методики исследовано влияние материала стен на электропотребление в жилых помещениях только 2-х типов домов, однако в дальнейшем предложенный метод можно применить и к другим типам. Также стоит отметить, что K-means является универсальным методом кластеризации, который может использоваться для разделения данных электропотребления жи-

лых помещений на группы на основе их характеристик, например: возраст и износ здания, географическое расположение, качество строительства, конструктивные особенности, площадь жилых помещений, количество комнат, расположения и размера оконных проемов, уровня освещенности, метеорологические условия и социальные факторы. Этим факторам будут посвящены дальнейшие исследования.

Множество мероприятий по повышению энергоэффективности зданий приведено в работе [6].

Таким образом, с помощью предложенного метода кластеризации *K-means* установлено наличие зависимости между потреблением электроэнергии жилых помещений и материалом внешних стен рассматриваемых типов многоквартирных домов: большинство бытовых потребителей в домах панельного типа отличается более высоким потреблением от потребителей в домах с кирпичными стенами как при высоких температурах, так и при низких. В межсезонные неотапительные периоды существенной разницы между ними не наблюдается, что свидетельствует о том, что изменение электропотребления наблюдается только в периоды значительных температурных колебаний.

В связи с вышеизложенным, рекомендуется улучшать теплоизоляцию в панельных домах для обеспечения комфортной температуры в помещениях. Это может привести к снижению электропотребления в жилых помещениях и, как следствие, к снижению затрат на электроэнергию для жильцов.

В целом, метод кластеризации *K-means* является перспективным решением для проведения энергоаудита зданий. Применение метода *K-means* при энергоаудите зданий позволяет выявить группы зданий с похожими характеристиками потребления энергии. Это может помочь в определении энергетической эффективности зданий, выявлении проблемных зон и разработке рекомендаций по оптимизации энергопотребления.

Библиографический список

1. **Гамаюнова, О. С.** Выбор оптимального варианта утепления жилых домов в различных климатических зонах / О. С. Гамаюнова // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 16(68). – С. 89-97. – EDN ANXMJJ.
2. Приказ Минстроя России от 06.06.2016 N 399/пр "Об утверждении Правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов" (Зарегистрировано в Минюсте России 08.08.2016 N 43169)
3. **Пономаренко, К. А.** Особенности советских «хрущевок» / К. А. Пономаренко, А. П. Бодякова, Т. Н. Слепынина // Молодежь и наука : Материалы международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов, Нижний Тагил, 26 мая 2023 года. – Нижний Тагил: Нижнетагильский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2023. – С. 144-146. – EDN WFWKFR.
4. **Воронов, И. Ю.** Энергетическая эффективность типовых серий панельных домов / И. Ю. Воронов // Инженерные исследования. – 2023. – № 1(11). – С. 20-30. – EDN PEZEVC.
5. **Серебряков, Н. А.** Анализ факторов, влияющих на совокупное электропотребление гарантирующего поставщика / Н. А. Серебряков // Вестник Иркутского государственного

технического университета. – 2020. – Т. 24, № 2(151). – С. 366-381. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-2-366-381. – EDN QIEFSF.

6. **Горшков, А. С.** Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий / А. С. Горшков // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 1(11). – С. 9-13. – EDN MZJCQP.

M.S. Karetnikov, E.M. Shishkov

THE IMPACT OF THE MATERIAL OF THE WALLS OF APARTMENT BUILDINGS ON ELECTRICITY CONSUMPTION IN APARTMENTS

Samara State Technical University

Abstract. In the article, an analysis of the influence of building wall materials on the electricity consumption of apartments was conducted using the K-means clustering machine learning method to analyze apartment electricity consumption data during periods of different temperature extremes in the external environment. A comparison was made between two types of five-story buildings with different wall materials: reinforced concrete and brick.

Key words: K-means clustering, energy efficiency of buildings, thermal insulation, electricity consumption, influencing factors.

References

- [1] Gamayunova, O. S. Vybór optimal'nogo varianta utepleniya zhilyh domov v razlichnyh klimaticheskikh zonah / O. S. Gamayunova // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. – 2019. – № 16(68). – S. 89-97. – EDN ANXMJJ. (in Russian)
- [2] Prikaz Ministroya Rossii ot 06.06.2016 N 399/pr "Ob utverzhdenii Pravil opredeleniya klassa energeticheskoy effektivnosti mnogokvartirnyh domov" (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 08.08.2016 N 43169)
- [3] Ponomarenko, K. A. Osobennosti sovetskih «hrushchevok» / K. A. Ponomarenko, A. P. Bodyakova, T. N. Slepynina // Molodezh' i nauka : Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii starsheklassnikov, studentov i aspirantov, Nizhnij Tagil, 26 maya 2023 goda. – Nizhnij Tagil: Nizhnetagil'skij tekhnologicheskij institut (filial) federal'nogo gosudarstvennogo avtonomnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya Ural'skij federal'nyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina, 2023. – S. 144-146. – EDN WFWKFR. (in Russian)
- [4] Voronov, I. Yu. Energeticheskaya effektivnost' tipovyh serij panel'nyh domov / I. Yu. Voronov // Inzhenernye issledovaniya. – 2023. – № 1(11). – S. 20-30. – EDN PEZEVC. (in Russian)
- [5] Serebryakov, N. A. Analiz faktorov, vliyayushchih na sovokupnoe elektropotreblenie garantiruyushchego postavshchika / N. A. Serebryakov // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – T. 24, № 2(151). – S. 366-381. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-2-366-381. – EDN QIEFSF. (in Russian)
- [6] Gorshkov, A. S. Energoeffektivnost' v stroitel'stve: voprosy normirovaniya i mery po snizheniyu energopotrebleniya zdaniy / A. S. Gorshkov // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2010. – № 1(11). – S. 9-13. – EDN MZJCQP. (in Russian)

УДК 621.314

А.А. Кокорев, Е.Н. Соснина

СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрена классификация систем диагностики силовых трансформаторов по типу контролируемых параметров, способу измерений, периодичности контроля и степени автоматизации. Рассмотрены основные аспекты проведения диагностики. Указаны достоинства и недостатки рассматриваемых методик. Проведен сравнительный анализ методов диагностики витковых замыканий обмотки – наиболее вероятного вида повреждения силовых трансформаторов. Показана необходимость разработки новых методик диагностики, учитывающих температуру активной части трансформатора.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, система диагностики, классификация, витковые замыкания, температура активной части трансформатора.

Введение

Силовой трансформатор (СТ) – один из главных элементов систем электроснабжения, от технического состояния которого зависит качество и бесперебойность электроснабжения потребителей. В России срок службы трансформаторов в среднем больше нормативного [1], что негативно влияет на качество электроснабжения. Как показывает эксплуатация СТ, реальный срок службы трансформатора может превышать нормативный в 2-3 раза.

В последнее десятилетие наблюдается тенденция перехода к эксплуатации трансформаторного оборудования по его фактическому техническому состоянию. В таких условиях особое место занимает диагностика состояния СТ. Применяемые методы проактивной диагностики СТ можно классифицировать по различным критериям. В статье предложена классификация по четырем критериям: тип контролируемых параметров; способ измерений; периодичность контроля; степень автоматизации (рис. 1).

Контролируемыми параметрами СТ являются физико-химические показатели масла (для масляных СТ), электрические, механические и тепловые параметры.

Физико-химический контроль состояния трансформаторного масла

Для физико-химического контроля состояния масла проводят анализы растворенных газов, влагосодержания и др. [2]

Анализ растворенных газов. В трансформаторном масле анализируются стандартные газы: H_2 – водород; CH_4 – метан; C_2H_6 – этан; C_2H_4 – этилен; C_2H_2 – ацетилен; CO – окись углерода; CO_2 – двуокись углерода; O_2 – кислород; N_2 – азот [3, 4].

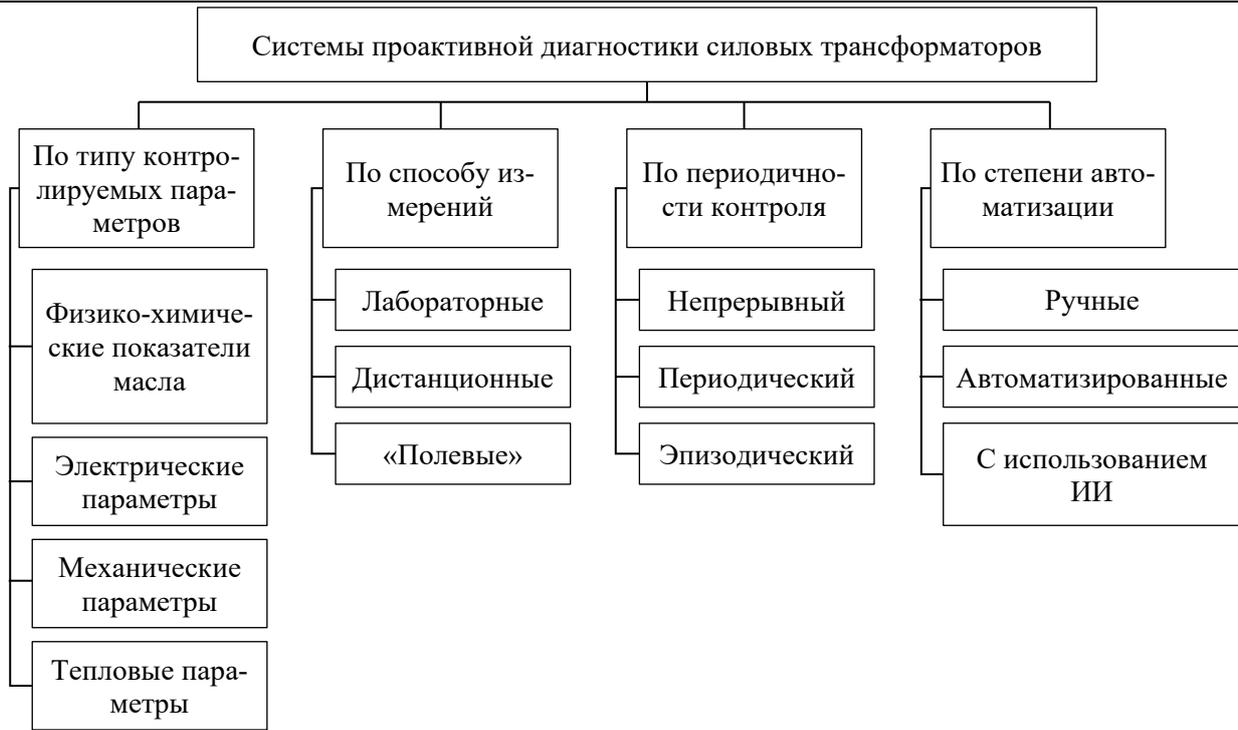


Рис. 1. Классификация методов диагностики

Причины образования растворенных газов в трансформаторном масле СТ приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Причины образования стандартных газов в трансформаторном масле

Газы	Характеристика состояния
H_2	Частичные разряды (ЧР) малой энергии. Специфический газ при воздействии температуры (особенно на масло, приготовленное методом гидроочистки)
C_4H_8 бутен-1	Ключевой газ при температуре 200–300 °С, может составлять свыше 90 % общего количества газов
C_3H_6 , C_2H_6 , CH_4	Ключевые газы при пиролизе масла при 300–500 °С
C_2H_4	Симптом перегрева выше 500 °С; возможно образование углерода
C_2H_2	Возникновение перегрева с температурой 800–1200 °С (сопровождается выделением этилена и других углеводородов). Образование пузырьков газа. Сильные разряды или дуга в масле (сопровождается выделением водорода)
СО	Пиролиз целлюлозной изоляции
СО ₂	Окисление масла (сопровождается поглощением кислорода)

В нормально функционирующем СТ не должно быть газов, появляющихся при температуре свыше 130 °С. В МЭК 60599-97 [6] указывается нормальный уровень образования газов в виде ограниченной скорости выделения (табл. 2).

Анализ причин и уровня образования (табл. 1 и 2) в нормальных условиях стандартных газов в трансформаторном масле при эксплуатации СТ свидетельствует о зависимости скорости газообразования от температуры.

Таблица 2

Уровень образования стандартных газов в трансформаторном масле

Газы	Нормальный уровень образования, мл/сутки
H ₂	< 5
CH ₄	< 2
C ₂ H ₆	< 2
C ₂ H ₄	< 2
C ₂ H ₂	< 0,1
CO	< 50
CO ₂	< 200

Согласно [7] предельная погрешность средств измерения для большинства стандартных растворенных газов составляет не более 50 % (для CO и CO₂ – не более 10 %). Это свидетельствует о низком техническом уровне развития средств измерений растворенных газов.

Анализ влагосодержания. Вода присутствует как в масле, так и в твердой изоляции (целлюлозе) в СТ. При повышении температуры растворимость воды в масле увеличивается, а в целлюлозе практически не меняется, поэтому вода начинает мигрировать из целлюлозы в масло. При снижении температуры идет обратный процесс, однако диффузия воды в масле происходит медленно, поэтому при резком снижении температуры вода может не «успеть» вернуться в целлюлозу. Если количество влаги в масле превышает растворимость, ее излишки переходят в эмульгированное состояние. Появление эмульгированной влаги недопустимо, так как снижает электрическую прочность масла.

Непосредственно влагосодержание не оказывает влияние на работу СТ, но неучет изменения свойств масла твердой изоляции при изменении влагосодержания и температурного режима СТ может привести к недопустимому снижению пробивного напряжения, возникновению разрядных процессов и преждевременному износу изоляции.

Следует отметить, что витковые замыкания сопровождаются значительными токами в поврежденной части обмотки и незначительным увеличением тока во внешней сети. Ток в поврежденной части приводит к нагреву обмотки. Избыточная теплота передается маслу и далее к системе охлаждения СТ. В результате нагрева происходит изменение физико-химических свойств масла, но за счет конвекции происходит перемешивание масла и снижение концентрации растворенных газов. Поэтому данный вид диагностики имеет малую чувствительность к данному виду повреждения.

Системы диагностики по электрическим параметрам СТ

К основным методам диагностики электрических параметров изоляции СТ относятся:

- измерение сопротивления изоляции с помощью мегомметра;
- испытание изоляции оборудования повышенным напряжением;
- определение тангенса угла диэлектрических потерь;
- определение коэффициента абсорбции;

- изменение тока проводимости и частичные разряды (ЧР) основной изоляции вводов;
- определение параметров холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ).

Большинство методов применяется только при отключенном СТ. При этом на электрические параметры СТ оказывает влияние множество внешних факторов: отклонение температуры и влажности окружающего воздуха, чистота и увлажненность поверхности, длительность проведения испытания и др.

Измерение сопротивления изоляции проводят как между обмотками, так и между каждой из обмоток и заземленной частью СТ. На сопротивление изоляции влияют характеристики трансформаторного масла (для масляных СТ). В табл. 3 приведены наименьшие допустимые значения сопротивлений изоляции R_{60} обмоток СТ [8].

Таблица 3

Наименьшие допустимые сопротивления изоляции R_{60} обмоток СТ

Тип трансформаторов	Номинальное напряжение обмотки ВН, кВ	Значения R_{60} , МОм, при температуре обмотки, °С						
		10	20	30	40	50	60	70
масляные	до 35	450	300	200	130	90	60	40
масляные	110	900	600	400	260	180	120	80
масляные	свыше 110	Не нормируется						
сухие	до 1 кВ	–	100	–	–	–	–	–
сухие	более 1 кВ до 6 кВ	–	300	–	–	–	–	–
сухие	более 6 кВ	–	500	–	–	–	–	–

Как видно из табл. 3, нормируемое значение сопротивления изоляции зависит от температуры. Погрешность определения состояния СТ будет складываться из погрешности измерения температуры обмотки и масла и измерения сопротивления изоляции. При непрерывном мониторинге СТ данный метод диагностики неприменим.

Определение тангенса угла диэлектрических потерь и коэффициента абсорбции. Возникновение любого дефекта основной изоляции вводов приводит к увеличению активных потерь, т.е. к увеличению тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции $\text{tg}(\delta)$. На начальной стадии развития дефекта изоляции $\text{tg}(\delta)$ изменяется незначительно. Как видно из табл. 4, нормируемое значение $\text{tg}(\delta)$ зависит от температуры. На результаты измерений влияют токи утечки и внешние электростатические поля, а также активное сопротивление измерительных проводов.

Таблица 4

Наибольшие допустимые значения $\text{tg}(\delta)$ изоляции обмоток в масле

Трансформаторы	Значения $\text{tg}(\delta)$, отн.ед., при температуре обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
35 кВ мощностью более 10 МВ·А и 110 кВ всех мощностей	1,8	2,5	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0
220 кВ всех мощностей	1,0	1,3	1,6	2,0	2,5	3,2	4,0

Коэффициент абсорбции DAR отражает степень увлажнённости изоляции. Метод измерения основан на сравнении значений сопротивления изоляции, измеренных через 15 и 60 с после начала испытаний. Данному методу диагностики присущи те же проблемы, что и при измерении сопротивления изоляции.

Изменение тока проводимости и частичные разряды основной изоляции вводов. Изолятор ввода можно представить цепью из последовательно соединенных конденсаторов, образованных проводящими обкладками ввода [7]. Первая (начальная) стадия развития дефекта (рис. 2, а) приводит к изменению параметров изоляции одного из concentрических изоляционных слоев. Возникают ЧР, регистрируемые на измерительном выводе ввода. Уровень ЧР зависит от типа дефекта и степени его развития, а суммарная интенсивность ЧР определяется объемом зоны его возникновения. При этом ток проводимости через ввод практически не изменится. Это также приводит к увеличению активных потерь и незначительному увеличению $\text{tg}(\delta)$.

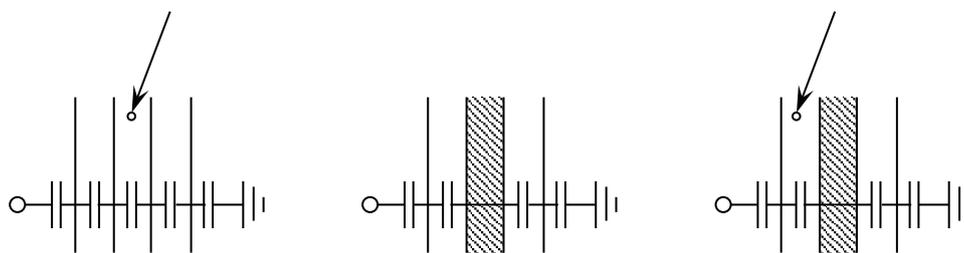


Рис. 2. Этапы развития дефекта изоляции ввода:

а) первый; б) второй; в) третий

Вторая стадия развития дефекта (рис. 3, б) связана с перекрытием одного изоляционного промежутка между обкладками одного из конденсаторов. К поврежденной зоне прикладывается почти нулевое напряжение, что приводит к уменьшению $\text{tg}(\delta)$ и исчезновению ЧР. Уменьшение количества последовательно включенных конденсаторов приводит к скачкообразному увеличению емкости цепи и увеличению тока проводимости через изоляцию ввода. Дальнейшее развитие дефекта изоляции ввода (третий и последующие этапы) проходит с чередованием первого и второго этапов и возрастанием тока проводимости и напряжения на единичном конденсаторе. Повышенное напряжение на обкладках ввода приводит к увеличению скорости развития дефекта до лавинообразного процесса.

Из табл. 5 видно, что ЧР являются чувствительным индикатором состояния вводов. Однако возникновение ЧР только на нечетных этапах развития снижает информативность данного индикатора при проведении периодических замеров состояния СТ. Также возникают сложности из-за низкой помехозащищенности измерительных приборов.

Другим чувствительным индикатором является ток проводимости изоляции вводов, монотонно возрастающий по мере развития дефекта. На его значение

может оказывать влияние влагосодержание масла и *PIR*-изоляции.

Таблица 5

Индикаторы состояния изоляции вводов

Индикатор	Нормальное состояние изоляции	Этап развития дефекта		
		1	2, 4, 6, ...	3, 5, 7, ...
$\text{tg}(\delta)$	низкое значение	незначительно возрастает	снижается почти до уровня нормального состояния	незначительно возрастает
ЧР	отсутствуют	имеются в зависимости от степени дефекта	почти отсутствуют	имеются в зависимости от степени дефекта
Ток проводимости	отсутствует	почти отсутствует	возрастает	возрастает

Определение параметров ХХ и КЗ. Параметры ХХ и КЗ СТ, как правило, определяются в специализированных лабораториях, что требует отключения и транспортировки СТ. Однако существуют методики, позволяющие определять эти параметры по результатам замеров токов и напряжений «с двух сторон» СТ. По характеру изменения параметров ХХ и КЗ можно судить о возможных внутренних повреждениях СТ. В табл. 6 показана связь внутренних дефектов активной части СТ с его параметрами.

Таблица 6

Влияние дефектов СТ на его параметры

Дефект	Изменение параметра
межвитковое замыкание	уменьшение потерь и напряжения КЗ
деформация обмоток после КЗ	увеличение напряжения КЗ
замкнутый контур в магнитопроводе	увеличение потерь и тока ХХ
изменение свойств ферромагнитного материала	изменение потерь и тока ХХ

Параметры ХХ и КЗ зависят от температуры активной части СТ [9–11], поэтому при определении степени развития дефекта требуется их корректировка.

Системы диагностики по механическим параметрам СТ

К основным методам диагностики СТ по механическим параметрам относят вибрационную диагностику и контроль деформации активной части.

Вибрационная диагностика. Вибродиагностика позволяет определить качество крепления элементов СТ, состояние механизмов охлаждения. Основным источником вибрации является активная часть СТ. Вибрация передается на бак через масло и твердые элементы конструкции.

Измерения проводят в режиме ХХ и под нагрузкой [12]. В режиме ХХ ос-

новным источником вибрации является магнитная система. Вибрация магнитопровода вызывается магнитострикцией в магнитопроводе. Основная частота колебаний при качественной прессовке магнитопровода равна удвоенной частоте питающей сети (100 Гц). При недостаточной прессовке увеличивается как амплитуда, так и частота колебаний – появляются высшие нечетные гармоники (300, 500, 700 Гц). В нагрузочном режиме вибрация вызывается совместным действием магнитопровода и обмоток. Совместный анализ амплитуд и спектра вибраций в режиме ХХ и под нагрузкой позволяет выделить вибрационный сигнал, создаваемый обмотками [13].

Материалы активной части СТ имеют разный коэффициент линейного расширения. У меди и алюминия обмоток коэффициент больше, чем у стали магнитопровода, поэтому при нагревании усилие прессовки обмотки возрастает, а при охлаждении – снижается [12]. Данный факт свидетельствует о наличии зависимости вибрации от температуры активной части СТ.

Контроль деформации активной части. Токи КЗ по обмоткам СТ вызывают значительные усилия, приводящие к изменению геометрических размеров обмоток. Возникают потери электродинамической стойкости обмоток [14]. С целью контроля геометрии применяется метод низковольтных импульсов (НВИ). По различиям осциллограмм НВИ обмоток разных фаз можно судить об изменении геометрии обмоток и целесообразности ремонтпригодности.

При относительно малых механических перемещениях в обмотках могут существенно меняться емкости отдельных элементов обмотки (межвитковые и межкатушечные емкости, а также емкости на соседний концентр или магнитопровод), а при существенных деформациях – и индуктивности деформированных элементов (рис. 3). Поэтому переходный импульсный ток, амплитуда и частота которого зависят от емкостных и индуктивных связей в обмотке и между обмотками, является более чувствительным индикатором к механическим деформациям, чем измерение сквозного сопротивления Z_k СТ (табл. 7) [15, 16].

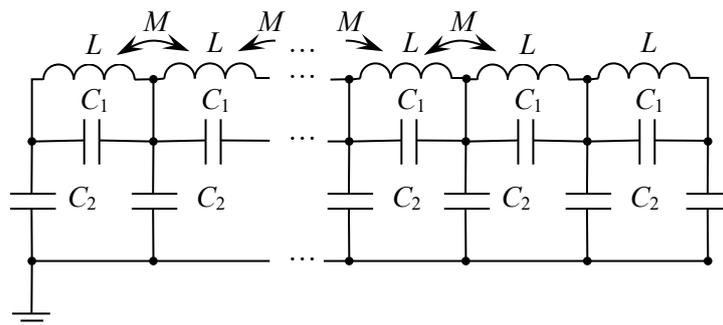


Рис. 3. Упрощенная схема замещения обмотки трансформатора

Как отмечалось ранее, под воздействием внутренних и внешних источников теплоты происходит изменение геометрических размеров активной части СТ, что снижает чувствительность метода НВИ на начальной стадии развития дефектов.

Таблица 7

Чувствительность методов контроля деформации обмоток

Вид повреждения	Чувствительность метода	
	Измерение Z_k	НВИ
Электрические повреждения (КЗ, обрыв)	+	+
Потеря радиальной устойчивости внутренних обмоток	+	+
Потеря прочности наружных обмоток	+	+
Частичная потеря радиальной устойчивости в локальной зоне обмотки	–	+
Взаимные осевые смещения обмоток	–	+
Потеря осевой прочности	–	+
Полегание проводов из-за воздействия осевых сил	–	+
Скручивание и поворот обмоток из-за воздействия тангенциальных сил	–	+
Распрессовка обмоток	–	+

Примечание: (+) хорошая чувствительность, (–) – слабая чувствительность.

Системы диагностики по тепловым параметрам СТ

Основными методами диагностики СТ по тепловым параметрам являются контроль температуры обмоток, масла и тепловизионный контроль.

Контроль температуры обмоток. Обмотки СТ являются источником теплоты, поэтому контролю их нагрева уделяется особое внимание. Важное значение имеет температура наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки СТ. Контроль температуры ННТ может быть косвенным и непосредственным. При косвенном контроле используются: температура верхних слоев масла или окружающей среды, параметры ХХ и КЗ, коэффициент загрузки фаз. Косвенный метод имеет меньшую точность, но позволяет оценить скорость старения изоляции для всех типов СТ без конструктивных изменений внутри бака. Непосредственный контроль более точный, но требует конструктивных изменений СТ.

Контроль температуры масла. Одним из важных параметров, характеризующим состояние СТ, является температура верхних слоев масла. По этим данным проводится расчет температуры ННТ обмоток, определяется эффективность системы охлаждения, скорость старения СТ и др. Достоинством метода является возможность установки датчиков температуры на действующий СТ (на крышке бака) без существенных конструктивных изменений.

Измерение перепада температуры масла в области верхней и нижней части обмотки каждой фазы позволяет определять возникновение внутренних повреждений СТ.

Тепловизионный контроль. Тепловизионный контроль является вспомогательным методом диагностики СТ, позволяющим выявить ухудшение контактных соединений, витковые замыкания в обмотках, нарушение циркуляции масла в баке и охлаждающей системе, нарушение изоляции прессующих элементов магнитопровода. Особенность метода – большой объем подготовительных работ, связанных с выравниванием излучательной способности поверхностей СТ

(удаление грязи, следов масла, окраски поверхностей, подвергнувшихся окислению, и др.).

На качество тепловизионного контроля влияет как естественная, так и принудительная циркуляция масла. Циркуляция масла «размазывает» тепловую картину СТ, что отрицательно сказывается на распознавании повреждений на начальных стадиях развития. Для проведения более информационного тепловизионного контроля СТ необходимо знать и учитывать особенности конструкции СТ, его системы охлаждения, срок службы и т.д.

Сравнительный анализ методов диагностики СТ

В соответствии с классификацией (рис. 1) проведена сравнительная оценка часто применяемых методов диагностики в СТ в системах мониторинга (табл. 8), позволяющая определить их достоинства и недостатки (табл. 9). В ряде случаев результаты диагностики СТ, полученные различными методами, дублируются, и при совмещении методов могут либо подтверждаться, либо опровергаться.

Различные методы диагностики СТ, согласно [7], рекомендовано применять в зависимости от напряжения обмотки высшего напряжения (ВН) СТ (табл. 10).

Таблица 8

Характеристики методов диагностики СТ

Методы диагностики	Способ измерений			Периодичность			Степень автоматизации			Зависимость от температуры
	Лабораторные	Дистанционные	«Полевые»	Непрерывный	Периодический	Эпизодический	Ручные	Автоматизированные	С использ. ИИ	
Анализ растворенных газов в масле	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+
Анализ влагосодержания в масле	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+
Контроль эл. параметров изоляции	-	-	+	-/+ ¹	+	-	+	-/+ ¹	-	+
Определение параметров ХХ и КЗ	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+
Вибродиагностика	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+
Контроль деформации активной части	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+
Контроль температуры обмоток	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-
Контроль температуры масла	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-
Тепловизионный контроль	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-

¹ Для токов проводимости основной изоляции вводов

Таблица 9

Достоинства и недостатки методов диагностики СТ

Методы диагностики	Достоинства	Недостатки
Анализ растворенных газов в масле	При ручном анализе относительно дешёвые. Методы хорошо изучены. Не требуют отключения СТ. Причины появления стандартных газов известны	При непрерывном анализе: стоимость газохроматографа велика. Малая точность измерений
Влагосодержание в масле	Методы анализа хорошо изучены. Не требует отключения СТ	Подвержено влиянию внешних факторов Точность измерительных приборов не нормируется Не выявляет повреждения активной части СТ
Электрические параметры изоляции	Дешевизна. Выполнение в «полевых» условиях Малая продолжительность испытаний. Методы хорошо изучены Дают понятную информацию о возможности дальнейшей эксплуатации СТ	В большинстве случаев требуют отключение СТ. Малая точность измерения Влияние внешних факторов Нелинейность некоторых параметров, зависящих от состояния изоляции
Определение параметров XX и КЗ	Простота Четкое понимание поврежденного элемента Возможна диагностика без отключения СТ (при большем числе средств измерения)	В большинстве случаев требуют отключение СТ. В большинстве случаев проводятся в лабораторных условиях. Малая точность измерения. Влияние внешних факторов Требуется специализированное оборудование
Вибродиагностика	Возможна диагностика без отключения С Простота. Возможность использования ИИ	Требуется специализированное оборудование Сложность оценки результатов измерения Влияние внешних факторов Точность приборов не нормируется Низкая информативность при малом числе датчиков
Контроль деформации активной части	Методы анализа хорошо изучены Возможность интеграции с ИИ	Требуется отключение СТ Влияние температуры окружающей среды и режимов работы Требуется высококвалифицированный персонал Точность приборов не нормируется

Окончание табл. 9

Контроль температуры обмоток	1. Низкая стоимость 2. Простота методики проведения. 3. Возможность диагностирования без отключения СТ	Не выявляет дефекты на начальной стадии развития. Трудность установки датчиков на действующем СТ Низкая информативность при малом числе датчиков Влияние температуры окружающей среды
Контроль температуры масла	1. Низкая стоимость 2. Простота методики проведения. 3. Возможно диагностирования без отключения СТ	1. Не способна выявлять дефекты на начальной стадии развития 2. Влияние температуры окружающей среды 3. Низкая информативность
Тепловизионный контроль	Простота. Не требуется отключение СТ. Большая информативность. Возможность интеграции с ИИ	Высокая стоимость Влияние температуры окружающей среды и режимов работы СТ Сложность обеспечения одинаковых условий для всей поверхности СТ

Таблица 10

Рекомендованные методы диагностики

Метод диагностики	Напряжения обмотки ВН трансформатора, кВ			
	<110	110	220–330	500
Контроль растворенных газов в масле бака	–	2 газа	4 газа	8 газов
Контроль влагосодержания в масле бака	–	+	+	+
Измерение сопротивления изоляции	+	+	+	+
Определение tgδ и коэффициента абсорбции	+	+	+	+
Контроль состояния вводов по токам проводимости и ЧР.	–	+	+	+
Определение параметров ХХ и КЗ	–	–	+	+
Контроль вибрации на поверхности бака	–	–	+	+
Контроль деформации активной части	–	+	+	+
Контроль ННТ обмотки	Расчет	Расчет	Расчет или измерение	Расчет или измерение
Контроль температуры верхних слоев масла	+	+	+	+
Контроль перепада температуры масла в обмотках	–	–	+	+
Тепловизионный контроль	+	+	+	+

Анализ методов диагностики по уровням напряжения показывает, что СТ с обмоткой ВН менее 110 кВ уделяется малое внимание из-за высокой стоимости системы диагностики, сопоставимой со стоимостью СТ. Как показывает практика, стоимость внедрения систем диагностики не должна превышать 5 % стоимости диагностируемого оборудования [7].

Выводы

Наиболее распространенным видом повреждения СТ являются витковые замыкания обмоток. Проведенный анализ показывает, что результат большинства методов диагностики внутренних повреждений зависит от температуры активной части СТ.

Различные методы диагностики могут дополнять друг друга, в результате повышается информативность и чувствительность систем мониторинга.

При разработке новых и развитии существующих систем мониторинга необходимо учитывать влияние температуры активной части СТ на входные параметры систем диагностики, применять такую комбинацию методов диагностики, которая давала бы максимальную информативность о состоянии СТ.

Библиографический список

1. Положение ПАО «ФСК ЕЭС» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция) – М. – 2022. – 227 с.
2. **Воробьев, С. В.** Совершенствование традиционных методов испытания изоляции трансформаторов подстанций / С. В. Воробьев, А. Е. Путера, О. В. Крюков // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 9(279). – С. 56-61. – DOI 10.14489/td.2021.09.pp.056-061.
3. СТО 56947007-29.200.10.011-2008 Трансформаторы силовые, автотрансформаторы и реакторы. Автоматизированная система мониторинга и технического диагностирования. Общие технические требования (с изм. от 12.12.2019)
4. *IEEE Std 1415TM – 2006. «IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis».*
5. **Бедерак, Я.С.** Принципы построения систем мониторинга силовых трансформаторов напряжением 35кВ и выше и мощностью 25000 кВА и выше / Я.С. Бедерак, Ю.Л. Богатырев. - Киев: 2009. - 21 с.
6. *IEC 60599:2022. Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis.*
7. Методическое руководство по выбору технических и программных средств для систем мониторинга силовых трансформаторов / ООО «DIMRUS». – Пермь: 2014. – 40 с.
8. Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. Утверждена приказом Министерства энергетики Российской Федерации № 811 от 12.08.2022.
9. ГОСТ 3484.1-88 Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний (с изм. № 1).
10. **Кокорев, А. А.** Исследование влияния температуры окружающей среды на характеристики силового трансформатора / А. А. Кокорев, Е. Н. Соснина // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники : Материалы V Всероссийской научно-практической (с международным участием) конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ. В 2-х томах, Казань, 11–12 октября 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 104-109.
11. **Жаринов, И. В.** Исследование влияния условий эксплуатации на работу трансформаторов

в режиме холостого хода / И. В. Жаринов, А. А. Кокорев, Д. В. Мясников // Научные известия. – 2022. – № 28. – С. 195-198.

12. **Лопатин, В.** Опыт эксплуатации АСМД силовых трансформаторов и высоковольтных вводов / В. Лопатин, В. Аксенов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № S2(33). – С. 1-7.
13. **Хренников, А. Ю.** Перспективные технологии для электроэнергетики и электрификации / А. Ю. Хренников, В. В. Молодюк, Я. Ш. Исамухамедов // Вести в электроэнергетике. – 2023. – № 5(127). – С. 56-68.
14. **Хренников, А. Ю.** Обнаружение деформаций обмоток силовых трансформаторов средствами технической диагностики после коротких замыканий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №3-4.
15. **Аликин, С.В.** Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // Электротехника. 1990. № 5.
16. **Хренников, А. Ю.** Диагностика силовых трансформаторов в Самараэнерго методом низковольтных импульсов / А.Ю. Хренников, О.М. Киков // Электрические станции. 2003. №11. С. 47-51.

A.A. Kokorev, Ye.N. Sosnina

POWER TRANSFORMER DIAGNOSTICS SYSTEMS

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

Abstract. The article considers the classification of power transformer diagnostics systems. The main aspects of diagnostics are considered. Advantages and disadvantages of the considered methods are indicated. The analysis of diagnostics methods to reveal the most probable type of power transformer damage - winding winding short-circuit is carried out. The relevance of the development of new diagnostic techniques taking into account the temperature of the active part of the transformer is shown.

Key words: power transformers, diagnostics system, classification of diagnostics systems, winding faults, transformer core temperature.

References

- [1] Regulation of PJSC FGC UES “On Uniform Technical Policy in the Electric Grid Complex” (new edition). Moscow. 2022. 227 p.
- [2] S.V. Vorobev, “Improvement of traditional methods of insulation testing of substation transformers” / S.V. Vorobev, A.E. Putera, O.V. Kryukov // Control. Diagnosis. 2021. – vol. 24, no 9(279), pp. 56-61. – DOI 10.14489/td.2021.09.pp.056-061.
- [3] STO 56947007-29.200.10.011-2008 Power transformers, autotransformers and reactors. Automated system of monitoring and technical diagnostics. General technical requirements (as amended by Dec. 12, 2019)
- [4] IEEE Std 1415TM – 2006. «IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis».
- [5] Ya.S. Bederak, “Principles of construction of monitoring systems for power transformers of 35 kV and above and 25000 kVA and above capacity” / Ya.S. Bederak, Yu.L. Bogatyrev. // Kiev. 2009. 21 p.
- [6] IEC 60599:2022. Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis.
- [7] Methodological guide for selecting hardware and software for power transformer monitoring systems. LTD “DIMRUS”. Perm. 2014. 40 p.
- [8] Rules of technical operation of electrical installations of electric power consumers. sApproved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 811 dated Aug. 12, 2022.
- [9] GOST 3484.1-88 Power transformers. Methods of electromagnetic tests (amended No 1).
- [10] A.A. Kokorev, “Investigation of the influence of ambient temperature on power transformer characteristics” / A.A. Kokorev, Ye.N. Sosnina // Problems and prospects of development of electric power industry and electrical engineering: Materials of the V All-Russian Scientific and Practical (with international participation) conference devoted to the celebration of the 55th anniversary of KSEU. In 2 vols., Kazan, Oct. 11-12, 2023. Kazan: Kazan State Power Engineering University, pp. 104-109, 2023.
- [11] I.V. Zharinov, “Investigation of the influence of operating conditions on idle operation of transformers” / I.V. Zharinov, A.A. Kokorev, D.V. Myasnikov // Scientific News. – 2022, no 28, pp. 195-198.
- [12] V. Lopatin, “Experience in operating AM&DC of power transformers and high-voltage bushings” / V. Lopatin, V. Aksenov // Electricity. Transmission and distribution. noS2(33), pp. 1-7, 2024.

- [13] A.Yu. Hrennikov, “Promising technologies for power generation and electrification” / A.Yu. Hrennikov, V.V. Molodyuk, Ya.Sh. Isamuhamedov // News in the electric power industry, no 5(127), pp. 56-68, 2023.
- [14] A.Yu. Hrennikov, “Deformation detection of power transformer windings by means of technical diagnostics after short circuits” // Izvestiya vuzov. Problems of power engineering. No 3-4, 2009.
- [15] S.V. Alikin, “Quantification of the results of pulse defectography of power transformer windings Quantification of the results of pulse defectography of power transformer windings” / S.V. Alikin, A.A. Drobyshevskij, E.I. Levickaya, M.A. Filatova // Electrotechnics. No 5, 1990.
- [16] A.Yu. Hrennikov, “Diagnostics of power transformers in Samaraenergo using the low-voltage pulse method ” / A.Yu. Hrennikov, O.M. Kikov // Power stations. No 11, pp. 47-51, 2003.

УДК 621.311.1

М.И. Крапивин, Е.Ю. Пузина**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С ЦЕЛЮ ОБОСНОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНЯТИЮ
ОГРАНИЧЕНИЙ В ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ**Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены актуальная проблема ограничения пропускной способности системы тягового электроснабжения отдельного участка Восточного полигона с учетом перспективы его дальнейшего развития. Для решения обозначенной проблемы использован метод компьютерного моделирования системы электроснабжения в ПК *Fazonord*. По результатам оценки минимального уровня напряжения в контактной сети исследуемого участка выбран оптимальный способ усиления системы тягового электроснабжения, позволяющий решить проблему его пропускной способности.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, пропускная способность, способы усиления.

Системы тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог (ЭЖД) отличаются от систем электроснабжения предприятий многих других отраслей промышленности крайней неравномерностью тяговой нагрузки во времени. Это вызвано особенностью данного вида нагрузок – электроподвижным составом, задачей работы которого является осуществление пассажиро- и грузоперевозок в виде пассажирских и, особенно, грузовых поездов достаточно различной массы, которые необходимо провозить с различной скоростью, в большой мерезависящей от разнообразного профиля пути участков электрифицированных железных дорог. Естественно, что более чем значительные нагрузки при этом возникают при движении поездов повышенной массы на участках со сложным, горным профилем пути, которые необходимо осуществить в пакетном графике движения, например, после выполнения ремонтных работ на участке после “окна”, предоставленного для выполнения этих работ [1].

Наличие описанной проблемы приводит к необходимости проверки пропускной способности СТЭ тех участков ЭЖД, где происходит постепенный или довольно резкий рост объема грузоперевозок [2-3]. В настоящее время эта проблема является актуальной для всего Восточного полигона российских железных дорог, особенно для его Северного направления [4-5]. До недавнего времени по этому направлению объемы грузоперевозок были низкими. К 20-м годам текущего столетия ситуация с ростом объема перемещаемых по Восточному полигону грузов потребовала разгрузки главного хода и перенаправления значительного объема грузоперевозок на Северный ход. Однако данный ход отличается весьма сложным горно-перевальным профилем пути, что при существующих па-

раматрах системы тягового электроснабжения вносит ограничения в ее пропускную способность. Соответственно, встает вопрос о разработке мероприятий, направленных на устранение данной проблемы [3-6].

Рассмотрим возможности решения указанной проблемы на примере СТЭ участка КР-СБ исследуемого направления Восточного полигона. Данный участок имеет протяженность 174,9 км. Его электроснабжение осуществляется от пяти тяговых подстанций (в специализированной железнодорожной аббревиатуре – ЭЧЭ) по системе тяги 2х25 кВ. При этом в межподстанционных зонах (МПЗ) довольно большой протяженности уровень напряжения в контактной сети (КС) поддерживается благодаря наличию автотрансформаторных пунктов (АТП) и постов секционирования (ПС). Профиль пути на отдельных перегонах сложный, подъемы достигают 16,2-16,9 промилей.

С целью оценки потенциальной пропускной способности исследуемого участка выполнено моделирование его СТЭ в ПВК Fazonord разработки Иркутского государственного университета путей сообщения. Созданная модель СТЭ совмещена с моделью системы внешнего электроснабжения (СВЭ) и представлена на рис. 1.

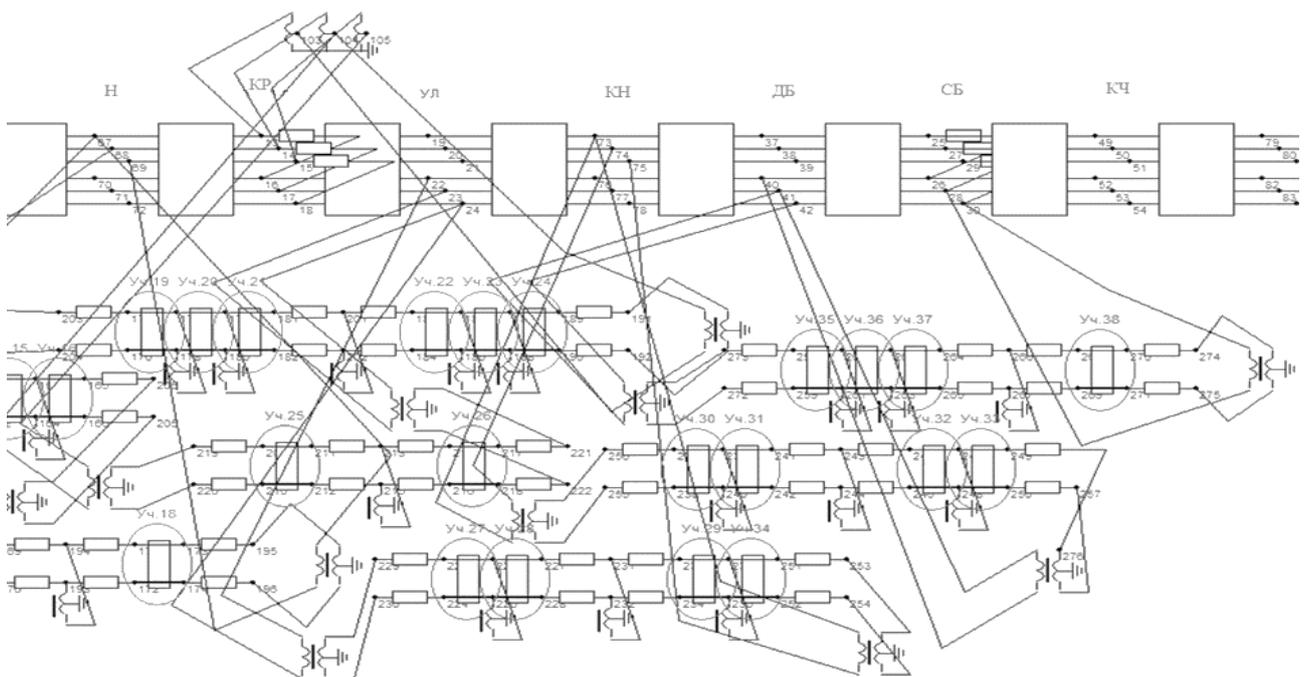


Рис. 1. Модель системы электроснабжения участка КР-СБ

Для выполнения расчета в модели организован пакетный график движения: в нечетном направлении применен интервал 6 минут между 6 поездами, каждый массой 3000 т; в четном направлении организован интервал движения 8 минут, при этом, очередность масс движущихся поездов следующая – 6300 т, 6300 т, 7100 т, 7100 т, 6300 т, 6300 т (рис. 2).

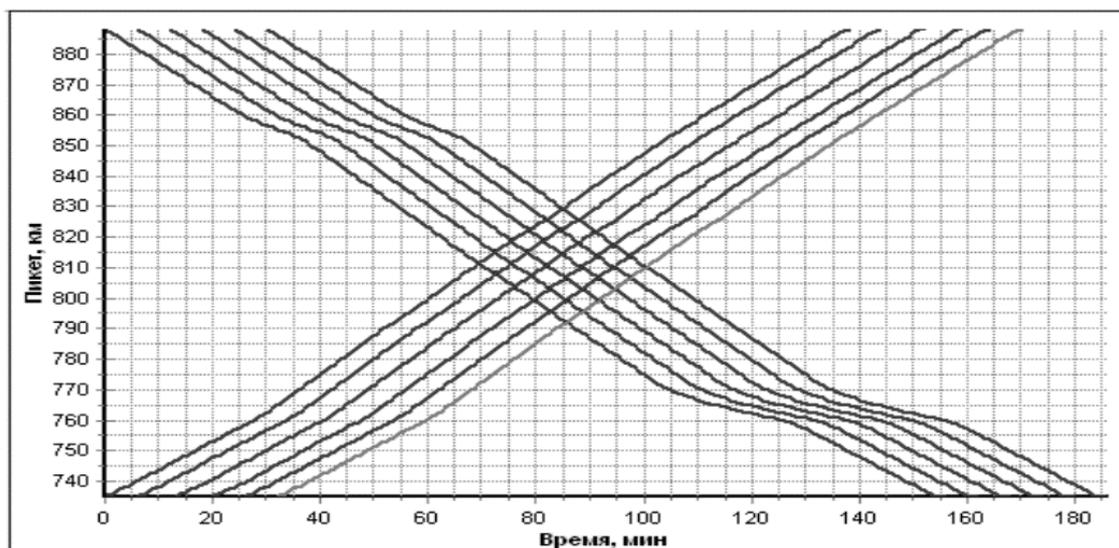


Рис. 2. График движения для проверки пропускной способности СТЭ

Итоги моделирования в программном комплексе *Fazonord* позволили выявить проблемный перегон ДЛ-ДБ на участке КН-ДБ, на котором минимальное значение напряжения в КС составляет 19,2 кВ, что подтверждается графиком изменения уровня напряжения на токоприемнике электровоза грузового поезда, приведенным на рис. 3.

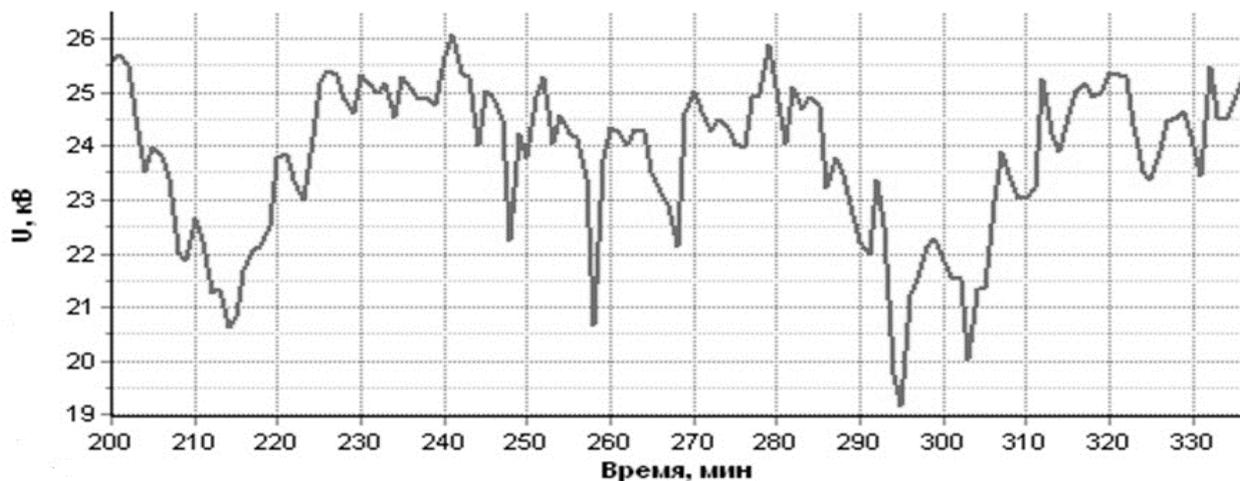


Рис. 3. Кривая напряжения, подводимого к электровозу, при существующих параметрах СТЭ

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что требуется использовать дополнительные средства усиления СТЭ исследуемого участка с целью достижения параметрами режима ее работы допустимых значений [2-4].

На исследуемом участке смонтирована контактная сеть с несущим тросом марки ПБСМ-95 и контактным проводом МФ-85. Предложено изменить сечение контактного провода с 85 мм² до 100 мм² на станциях и перегонах проблемного участка, а также несущий трос марки ПБСМ-95 на трос марки М-120. После про-

ведения данного мероприятия получены следующие результаты. Уровень напряжения на токоприемнике электровоза поднялся до 20,0 кВ, не достигнув минимально допустимого.

Следующей мерой повышения уровня напряжения в КС могло стать использование параллельной работы тяговых трансформаторов на ЭЧЭ ДБ в направлении станции ДЛ. На данный момент это мероприятие уже реализуется. Установка же еще одного дополнительного СТ является экономически не оправданной мерой. Аналогично, эффективной и потенциально возможной мерой для повышения уровня напряжения на токоприемнике электровоза является установка на тяговых подстанциях устройств продольной компенсации (УПК), благодаря которым происходит уменьшение реактивного сопротивления сети, соответственно падение напряжения также уменьшается, а уровень напряжения возрастает. Но эти средства усиления СТЭ уже используются на ЭЧЭ МПЗ, лимитирующих пропускную способность участка.

Еще одним способом усиления является установка компенсирующего устройства – поперечной компенсации (КУ) мощностью 10 МВАр на посту секционирования проблемного участка. Модель СТЭ с включенным в работу КУ (выделено красным) представлена на рис. 4. Кривая напряжения, подводимого к электровозу, с учетом монтажа КУ, представлена на рис. 5.

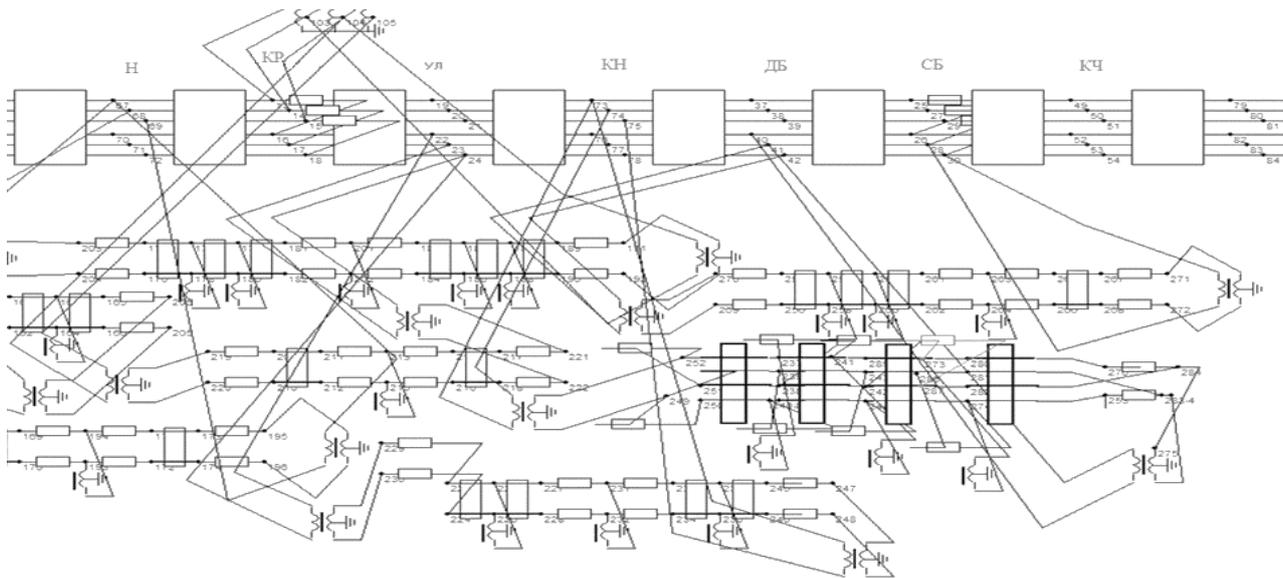


Рис. 4. Модель исследуемой системы электроснабжения участка КР-СБ при монтаже дополнительного КУ

Полученные в ходе моделирования результаты с учетом установки КУ свидетельствуют о повышении напряжения в КС до допустимого значения, а именно 21,1 кВ.

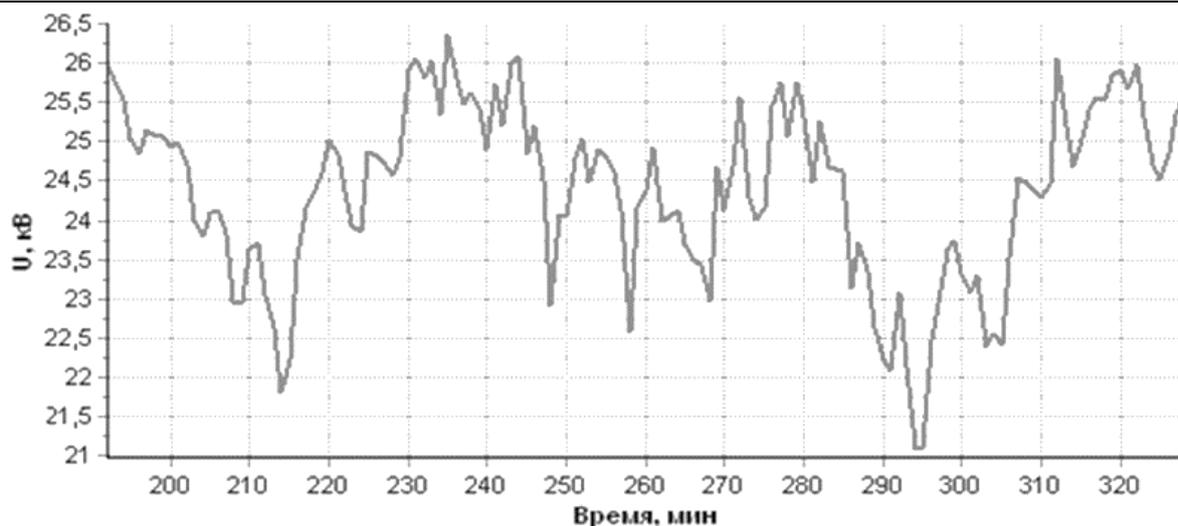


Рис. 5. Кривая напряжения, подводимого к электровозу, при использовании дополнительного КУ

Таким образом, компьютерное моделирование СТЭ и СВЭ исследуемого участка КР-СБ с учетом имеющихся в настоящее время на данном участке и потенциально возможных к применению средств усиления СТЭ приводят нас к выводу о необходимости установки на посту секционирования перегона ДЛ-ДБ устройства поперечной компенсации мощностью 10 МВАр. Такой способ усиления обеспечивает минимально допустимое напряжение в контактной сети при организации пропуска наиболее сложного для данного участка пакетного графика движения поездов, содержащего тяжеловесные поезда массой 7100 тонн и, соответственно, рекомендуется к практическому применению.

Библиографический список

1. **I. A. Khudonogov**, E. Y. Puzina and A. G. Tuigunova, *Modeling Turn Insulation Thermal Aging Process for Traction Substation Transformer. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2020, pp. 1-5.
2. **Puzina E.Yu.**, Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. *Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon2020. 2020. С. 9271385.*
3. **Пузина, Е.Ю.** Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро – Таксимо ВСЖД // Транспорт, наука, образование, производство: труды международной научно-практической конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения, 2016. – С. 306-310.
4. **Куцкий, А.П.**, Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим-Киренга для обеспечения тяги сдвоенных электроподвижных составов массой 14200 т// Молодая наука Сибири, 2022. № 2 (16). –С. 137-149.
5. **Куцкий, А.П.**, Овечкин И.С., Галков А.А. Анализ эффективности применения организационных и технических способов повышения пропускной способности тяговой сети двухпутного горно-перевального участка // Молодая наука Сибири. 2022. № 3 (17). – С. 56-53.
6. **Черепанов, А.В.**, Тихомиров В.А., Куцкий А.П. Влияние несимметрии напряжений на энергоэффективность // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). – С. 207-217.

M.I. Krapivin, E.Yu. Puzina

**MODELING OF A TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM
FOR THE PURPOSE OF JUSTIFICATION OF MEASURES TO REMOVE
CAPACITY LIMITATIONS**

Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russia

Abstract. The article examines the current problem of limiting the capacity of the traction power supply system of a separate section of the Eastern test site, taking into account the prospects for its further development. To solve this problem, the method of computer modeling of the power supply system in Fazonord PVC was used. Based on the results of assessing the minimum voltage level in the contact network of the area under study, the optimal method of strengthening the traction power supply system was selected, allowing to solve the problem of its throughput.

Key words: traction power supply system, capacity, amplification methods.

References

- [1] I. A. Khudonogov, E. Y. Puzina and A. G. Tuigunova, Modeling Turn Insulation Thermal Aging Process for Traction Substation Transformer. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, pp. 1-5.
- [2] Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon2020. 2020. pp. 9271385.
- [3] Puzina E.Yu. Strengthening the traction power supply system of the Churo - Taksimo section of the Eastern Railway // Transport, science, education, production: proceedings of the international scientific and practical conference. Rostov State Transport University, 2016. – pp. 306-310.
- [4] Kutsy A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Increasing the capacity of the Yakurim-Kirenga section to provide traction for dual electric rolling stock weighing 14,200 tons // Young Science of Siberia, 2022. No. 2 (16). – pp. 137-149.
- [5] Kutsy A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Analysis of the effectiveness of using organizational and technical methods to increase the capacity of the traction network of a double-track mountain-pass section // Young Science of Siberia. 2022. No. 3 (17). – pp. 56-53.
- [6] Cherepanov A.V., Tikhomirov V.A., Kutsyi A.P. The influence of voltage asymmetry on energy efficiency // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2017. No. 4 (56). – pp. 207-217.

УДК 621.311.1

А.В. Крюков^{1,2}, А.В. Черепанов¹, К.Х. Нгуен²

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Иркутский государственный университет путей сообщения¹
Иркутский национальный исследовательский технический университет²

Аннотация. Дано краткое описание методики моделирования режимов плавки гололеда на основе подхода, использующего фазные координаты. Представлены компьютерные модели, учитывающие основные факторы процессов нагрева и удаления гололедных отложений на проводах контактных подвесок тяговых сетей (ТС) постоянного тока. Показано, что гололед удаляется с несущих тросов за 17 минут, а с контактных проводов за 22 минуты. Температуры нагрева токоведущих частей во время плавки не превышают допустимых величин. Методика является универсальной и может применяться для ТС любого конструктивного исполнения.

Ключевые слова: удаление гололедных отложений, железные дороги постоянного тока, системы электроснабжения

Введение. В зимний период в ряде регионов России на проводах линий электропередачи (ЛЭП) и контактных подвесок тяговых сетей (ТС) возникают отложения гололеда, изморози и мокрого снега. Толщина такой ледяной корки может достигать нескольких десятков миллиметров и приводить к следующим негативным последствиям [1]:

- разрегулировке и сближению токоведущих частей;
- возникновению коротких замыканий, повреждениям линейной арматуры и креплений;
- механической перегрузке и обрыву проводов.

Вопросы, связанные с моделированием процессов плавки гололеда на воздушных ЛЭП и ТС, рассматриваются в большом числе работ. Условия гололедообразования на ЛЭП и технические решения по его предотвращению и ликвидации описаны в [1, 2]. Современные средства для раннего обнаружения гололедно-изморозевых образований представлены в [3, 4]. Характеристики комплекса коммутационных аппаратов для организации контура плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения приведены в [5].

При эксплуатации ТС постоянного тока применяются тепловые и механические способы освобождения проводов контактных подвесок от накопившегося на них льда. Наиболее широкое распространение получили методы плавки гололеда повышенными токами. В условиях цифровизации для выбора рациональных схем теплового удаления гололедных образований следует использовать

компьютерные технологии, позволяющие адекватно моделировать сложные процессы нагрева и плавки льда на проводах ЛЭП и ТС.

Ниже представлены результаты исследований, направленных на создание цифровых моделей систем электроснабжения железных дорог постоянного тока (СЭЖД ПТ) в режимах плавки гололеда [6]. Алгоритмы моделирования СЭЖД ПТ описаны в [7]. Методика определения величины допустимого тока плавки описана в [8].

Методика и результаты моделирования. Алгоритм моделирования процессов плавки гололеда, подробно описанный в [6], включает следующие этапы:

1. Определение серии режимов с дискретностью $\delta\tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k$.
2. Расчеты зависимостей токов I_{ij} , протекающих по проводам, от времени τ : $I_{ij} = I_{ij}(\tau)$, $i, j - 1 \dots n$, где n - число узлов сети.
3. Вычисление температур проводов по интервалам времени $\delta\tau_k$.
4. Расчет показателей процесса плавки гололедной канавки.
5. Учет испарения пленки воды, оставшейся после отпадения гололедной муфты.
6. Моделирование нагрева проводов, свободных от гололеда, с учетом возможного увеличения теплоотдачи за счет мороси или дождя при $t_{\text{окр}} < 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Расчеты проводились для СЭЖД ПТ, схема которой показана на рис. 1. Плавка гололеда выполнялось на первой межподстанционной зоне (МПЗ) путем создания петлевой схемы, приведенной на рис. 2. На второй МПЗ предусматривалось движение поездов.

Моделирование осуществлялось с помощью промышленного программного комплекса (ПК) Fazonord, версия 5.3.4.5 – 2024 [7, 8], который позволяет определять режимы СЭЖД ПТ. Часть визуального представления разработанной модели показана на рис. 3. Расположение токоведущих частей контактной сети (КС) нечетного пути с двумя проводами МФ-100 и тросами ПБСМ-120 показана на рис. 4. Моделируемая СЭЖД включала три тяговых подстанции и МПЗ, протяженностью по 20 км.

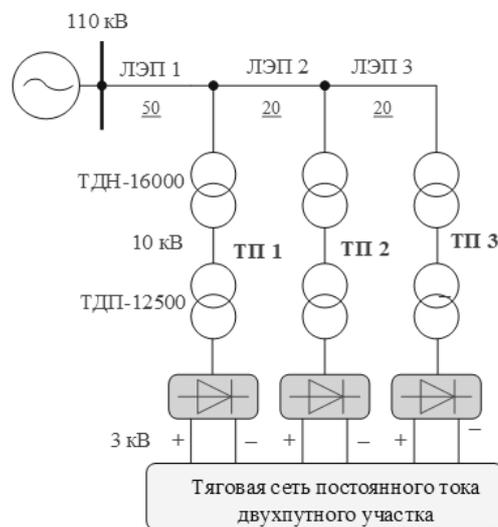


Рис. 1. Схема моделируемой сети

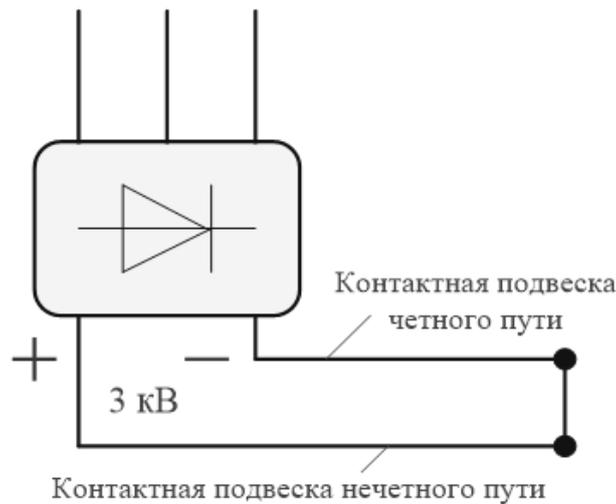


Рис. 2. Схема плавки гололеда

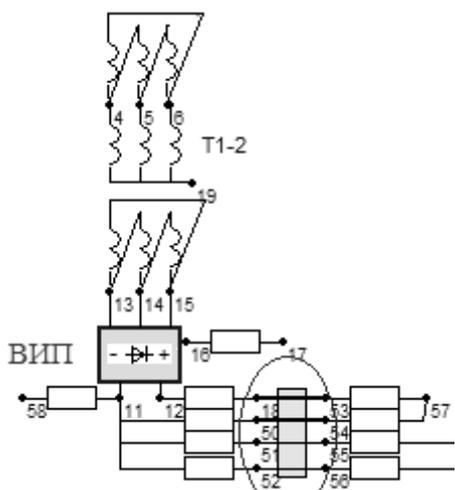


Рис. 3. Фрагмент расчетной схемы, отвечающей участку, на котором проходит плавка

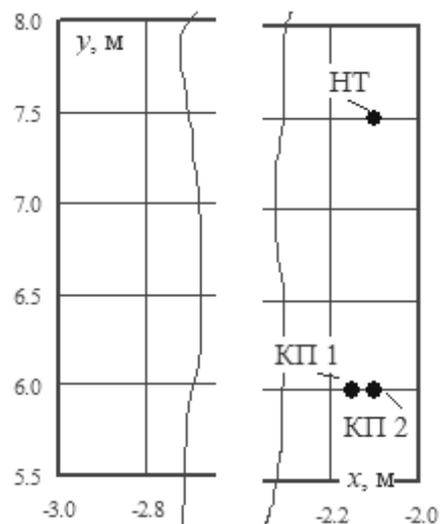


Рис. 4. Расположение токоведущих частей: НТ – несущий трос; КП – контактный провод

График движения электроподвижного состава по второй МПЗ представлен на рис. 5.

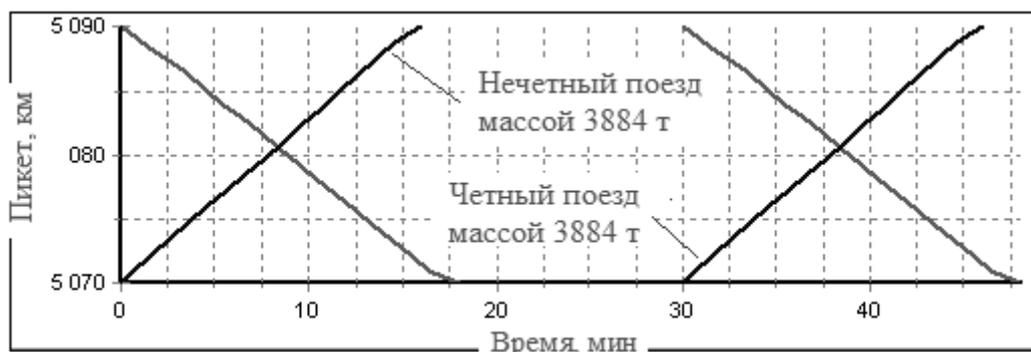


Рис. 5. График движения ЭПС

На рис. 6 приведены результаты расчёта процессов плавки в виде следующих зависимостей:

$$t = t(\tau); \delta = \delta(\tau),$$

где t – температура, град; δ – толщина стенки гололедных отложений, мм.

Представленные на рис. 6 зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- гололедные образования удаляются с несущих тросов за 17 минут, а с контактных проводов за 22 минуты;
- температуры токоведущих частей во время плавки не превышают допустимых величин;
- после освобождения ото льда начинается интенсивный нагрев проводов, поэтому для исключения их перегрева плавку надо завершать через 30 минут.

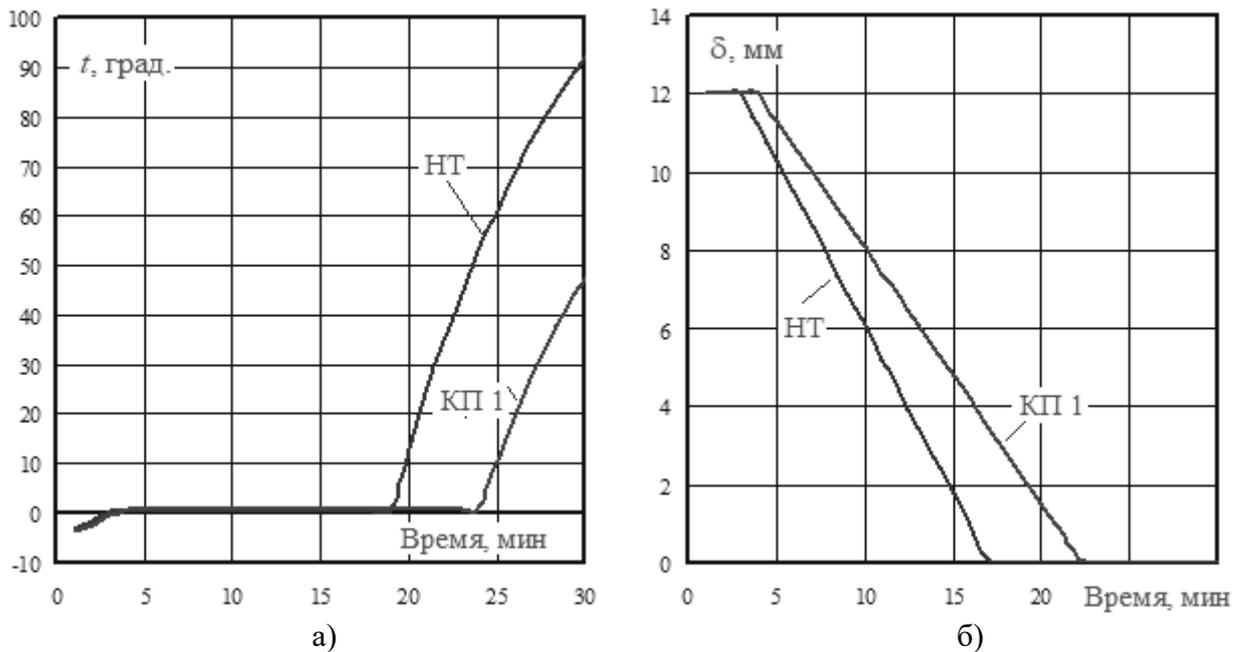


Рис. 6. Динамика процесса плавки гололеда: а – температуры провода; б – толщина стенки гололеда

Заключение. Разработаны модели, обеспечивающие определение режимов плавки гололеда в тяговых сетях постоянного тока. Методика их создания является универсальной и может применяться для ТС любого конструктивного исполнения.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Библиографический список

1. **Дьяков, А. Ф.** Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем / А. Ф. Дьяков, А. С. Засыпкин, И. И. Левченко. – Пенза : РП "Южэнергогостехнадзор", 2000. – 284 с. – EDN YASQMX.
2. **Мясоедов, Ю. В.** Плавка гололеда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация / Ю. В. Мясоедов, О. Н. Коржова // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – № 87. – 2019. – С. 65-66. – EDN LNYWCF.
3. **Кубкина, О. В.** Раннее обнаружение гололедно-изморозевых образований в электротяговых сетях : специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кубкина Ольга Владимировна. – Ростов-на-Дону, 2009. – 20 с. – EDN NKUGMD.
4. **Вафин, Л. Ш.** Вибрационный электромеханический преобразователь для сигнализатора гололедообразования на линиях электропередач : специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вафин Ленар Шайхуллович. – Уфа, 2005. – 17 с. – EDN NIJHJ.
5. Новые решения в системах плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения 220 и 330 КВ / А. В. Кольцов, Г. Н. Ковтун, Ю. А. Горюшин [и др.] // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. – № 4. – С. 21-27. – EDN YTXTLTD.
6. **Закарюкин, В. П.** Моделирование динамики плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи и контактных подвесок тяговых сетей / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // System Analysis and Mathematical Modeling. – 2022. – Т. 4. – № 1. – С. 11-37. – DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37. – EDN HLXMBJ.
7. **Закарюкин, В. П.,** Крюков А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. Москва: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
8. Методические указания по борьбе с гололедом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПП, автоблокировки и продольного электроснабжения. Книга 2. Методические указания по борьбе с гололедом на контактной сети системы постоянного тока. М., 2004. 88 с.

A V. Kryukov^{1,2}, A.V. Cherepanov¹, Q.H. Nguyen²

MODELING MODES OF ICE MELTING IN DC TRACTION NETWORKS

Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskij St., Irkutsk, 664074, Russia¹
Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia²

Abstract. A brief description of the methodology for modeling ice melting regimes based on an approach using phase coordinates is given. Computer models are presented that take into account the main factors of the processes of heating and removing icing deposits on overhead wires of DC traction networks. It has been shown that ice is removed from support cables in 17 minutes, and from contact wires in 22 minutes. The heating temperatures of current-carrying parts during melting do not exceed permissible values. The technique is universal and can be used for traction networks of any design.

Key words: deicing, DC railways, power supply systems

References

- [1] Dyakov, A.F. Prevention and elimination of ice accidents in electrical networks of power systems / A.F. Dyakov, A.S. Zasyplin, I.I. Levchenko. – Pyatigorsk: RP “Yuzhenergotekhnadzor”, 2000. – 284 p. – EDN YASQMX.
- [2] Myasoedov, Yu. V. Melting ice on power lines: methods, innovations, operation / Yu. V. Myasoedov, O. N. Korzhova // Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and economic sciences. – 2019. – No. 87. – P. 65-66. – EDN LNYWCF.
- [3] Kubkina, O. V. Early detection of ice-frost formations in electric traction networks: specialty 05.22.07 “Railway rolling stock, train traction and electrification”: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Kubkina Olga Vladimirovna. – Rostov-on-Don, 2009. – 20 p. – EDN NKUGMD.
- [4] Vafin, L. Sh. Vibration electromechanical converter for ice formation alarm on power lines: specialty 05.09.01 “Electromechanics and electrical devices”: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Vafin Lenar Shayhullovich. – Ufa, 2005. – 17 p. – EDN NIJHJ.
- [5] New solutions in systems for melting ice on high-voltage overhead power lines of 220 and 330 kV / A. V. Koltsov, G. N. Kovtun, Yu. A. Goryushin [etc.] // Electrical engineering and information complexes and systems. – 2016. – T. 12. – No. 4. – P. 21-27. – EDN YTXTLD.
- [6] Zakaryukin, V.P. Modeling the dynamics of melting ice on the wires of overhead power lines and catenary suspensions of traction networks / V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov // System Analysis and Mathematical Modeling. – 2022. – T. 4. – No. 1. – P. 11-37. – DOI 10.17150/2713-1734.2022.4(1).11-37. – EDN HLXMBJ.
- [7] Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. – 156 p.
- [8] [Guidelines for combating ice and self-oscillations on the contact network, two-wire-rail lines, automatic blocking and longitudinal power supply. Book 2. Guidelines for combating ice on the contact network of a direct current system. M., 2004. 88 p.

УДК 621.331

М.Х. Лахлах, Ю.В. Монаков

ТРЕХМЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВДОЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Аннотация. Данная статья посвящена трехмерной визуализации переходных процессов в линиях подземных сетей. Трехмерная визуализация, представленная в данной статье, является отличным инструментом для демонстрации сложного формирования бегущих волн вдоль кабельной линии, вызванных коммутационными перенапряжениями. В качестве примера рассмотрен случай возникновения перенапряжения при включении кабельной линии напряжением 110 кВ на холостой ход. Результатами исследования являются построение кривых изменения во времени перенапряжения по длине линии. Сравнение результатов, полученных путем моделирования коммутационных перенапряжений с помощью разработанной модели, с результатами, полученными с помощью программного комплекса *EMTP-RV*, дало хорошее совпадение (максимальное расхождение значений перенапряжений на приемном конце линии не превышает 2,4%).

Ключевые слова: трехмерная визуализация, коммутационные перенапряжения, высоковольтные кабельные линии.

Изучение переходных процессов в энергосистеме, возникающих в результате коротких замыканий или оперативных переключений, представляет важность не только с точки зрения обеспечения надлежащего функционирования релейной защиты, контроля и анализа качества электроэнергии, но также и в образовательных целях [1]. Концепция бегущей волны может быть более эффективно уяснена через визуализацию ее передвижения вдоль линии [2]. Широко используемым инструментом моделирования переходных процессов является программно-технический комплекс *EMTP-RV* [3]. Однако использование данного комплекса не позволяет рассчитывать изменение напряжения вдоль линии, называемое профилем напряжения, из-за низкой вычислительной производительности последнего в случае учета электромагнитного взаимодействия между проводниками исследуемой кабельной линии (КЛ) с одной стороны. С другой стороны, существующие в программном комплексе *EMTP-RV* математические модели кабельной линии (модель П-секция, модель Бергерона, модель Марти и широкополосная модель) [3,4] хотя и достаточно точны, но также обладают низкой вычислительной производительностью в случае необходимости выполнения процесса свертки выборов для каждой расчетной точки. Расчет профиля напряжения с помощью перечисленных моделей требует длительного времени, так как расчеты проводятся для большого количества расчетных точек вдоль КЛ.

Анализ имеющихся в настоящее время моделей кабельной линии показал, что расчет профиля напряжения вдоль КЛ для большого числа расчетных точек

в данном случае не целесообразен. Поэтому была разработана модель кабельной линии, позволяющая рассчитать профиль напряжения с приемлемой точностью и большой скоростью расчета, основанная на численном методе обратного преобразования Лапласа [5]. Применение этого метода вместо процесса свертки выборок дало возможность уменьшить время расчета. В данной статье модель КЛ была реализована в программном комплексе *MATLAB*.

Для достижения цели была разработана расчетная схема для случая включения КЛ 110 кВ с двухсторонним заземлением экрана на холостой ход. Расчетная схема содержит энергетическую систему 110 кВ в виде трехфазного источника напряжения с комплексным сопротивлением $Z_s=0,15+j2$ Ом, выключатель и КЛ с кабелями 2XS(FL)2Y-LWL 1x1200RM/265- 110 длиной по 15 км каждая. С целью верификации разработанной модели КЛ в программном комплексе *MATLAB* была реализована та же расчетная схема в программном комплексе *EMTP-RV*. При этом КЛ моделировалась с использованием широкополосной модели, являющейся наиболее распространенной моделью КЛ. Верификация расчетной схемы проведена на основе сопоставления осциллограмм напряжений на приемном конце КЛ при ее включении на холостой ход, полученных с помощью расчетной модели в программных комплексах *MATLAB* и *EMTP-RV* (рис. 1). Наибольшее расхождение результатов соответствовало пиковому значению перенапряжения на фазе А, при ее включении в момент прохождения напряжения источника через максимум.

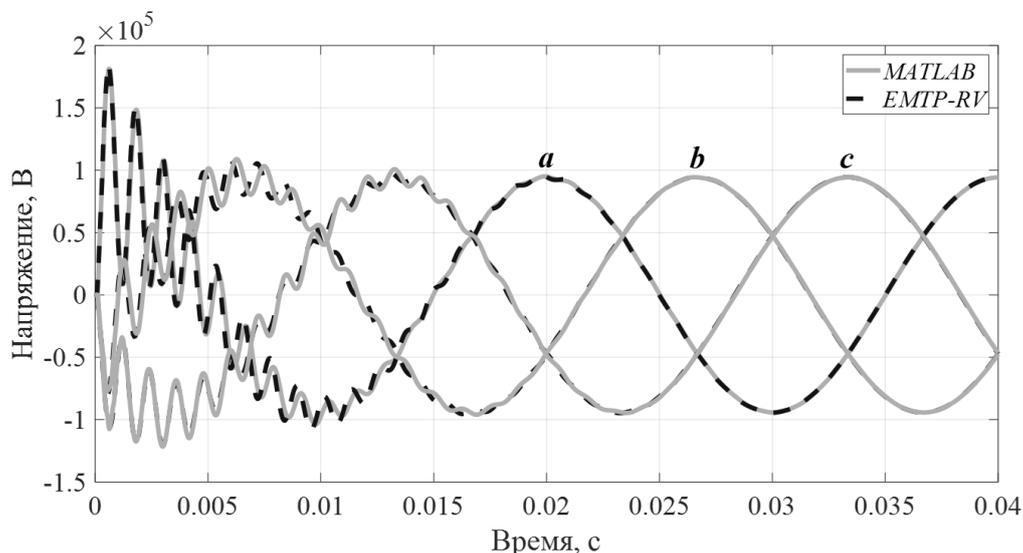


Рис. 1. Кривые изменения перенапряжения на приемном конце КЛ при ее включении на холостой ход

Максимальное значение перенапряжения в фазе А при использовании *MATLAB* составило 181 кВ, а при использовании *EMTP-RV* – 176,6 кВ. При этом значение наибольшей относительной погрешности составило 2,4 %, что считается приемлемым.

Кривая напряжения фазы А при включении КЛ, представленная на рис. 2, получена с помощью разработанной модели в программном комплексе *MATLAB*. Она показывает, как меняется напряжение вдоль кабеля в трехмерной координатной системе: по оси времени x , по оси длины линии y и по оси перенапряжения z . Расчеты проведены с помощью разработанной модели КЛ, позволяющей отображать волны перенапряжений вдоль линии с шагом в 1% от длины линии, в программе *MATLAB*. Распространяющиеся по кабелю волны затухают за счет его активного сопротивления, что хорошо учитывается в разработанной модели, так как КЛ моделируется с использованием модели линии с распределенными частотно-зависимыми параметрами. Из рис. 2 можно увидеть, что на передающем конце (566,6 мкс, 0 км) максимальное значение волны перенапряжения составило 168,1 кВ, а на приемном конце (644,8 мкс, 15 км) – 181 кВ. Время распространения волны перенапряжения по кабелю равно 78 мкс, что соответствует скорости распространения волны 192 м/мкс. Это значение скорости распространения волны подтверждает правильность разработанной модели, поскольку оно соответствует типичному значению скорости волны в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена.

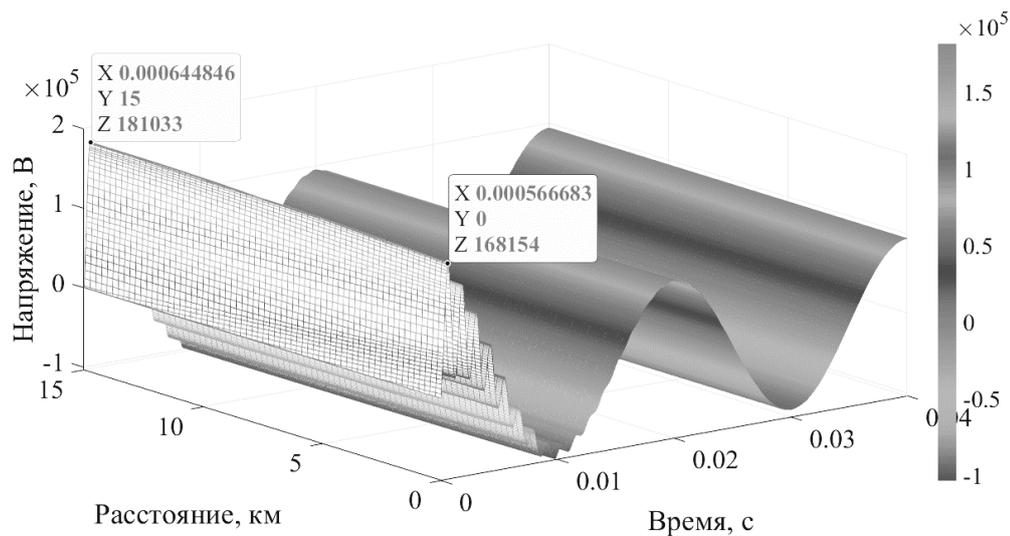


Рис. 2. Перенапряжения фазы А в трехмерной координатной системе

Кроме того, следует отметить, что время выполнения расчета перенапряжений с использованием разработанной модели КЛ, основанной на численном обратном преобразовании Лапласа, составило 0,31 с, в то время как при использовании широкополосной модели КЛ оно было равно 1,02 с. Данное обстоятельство свидетельствует, о сокращении времени, необходимого для расчета переходных процессов в больших электрических сетях с КЛ при использовании разработанной модели с приемлемой точностью. Сокращение времени расчета позволяет интегрировать предложенную модель КЛ в текущие программные комплексы и усовершенствовать отечественные разработки.

В данной работе представлена модель КЛ для визуализации бегущей волны вдоль линии с учетом распределения и частотной зависимости ее параметров. Исследования показали приемлемую точность расчета перенапряжений на линии, полученных путем моделирования коммутационных перенапряжений с помощью разработанной модели. С результатами, полученными с помощью программного комплекса *EMTP-RV* дало хорошее совпадение (максимальное расхождение значений перенапряжений на приемном конце линии не превышает 2,4%).

Вычисление профиля напряжения с помощью разработанной модели КЛ позволяет наблюдать изменение во времени распространяющихся волн вдоль линии. Разработанная модель КЛ будет полезна специалистам энергетики, а также как инструмент, позволяющий анализировать электромагнитные переходные процессы в энергосистемах, в процессе обучения персонала.

Библиографический список

1. **Куликов, А. Л.** Методы и средства волнового определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи // Библиотечка электротехника, 2019. – № 2(242). – С. 1-96.
2. **Дмитриев, М.В.** Кабельные линии высокого напряжения // Санкт-Петербург: политехпресс, 2021. – 688 с.
3. **Dommel, H. W.** EMTP theory book // Canada: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996. – 483 с.
4. **Morched, A. A., Gustavsen, B., Tartibi, M.** universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, No. 3. – pp. 1032 – 1038.
5. **Han, L., et al.** Algorithm for fast calculating the energization overvoltages along a power cable based on modal theory and numerical inverse Laplace transform // Electric Power Systems Research, – 2022, Vol. 210, pp. 108 – 163.

M.Kh. Lahlah, Y.V. Monakov

THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION OF SWITCHING OVERVOLTAGES ALONG A HIGH-VOLTAGE CABLE LINE

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Moscow, Russia

Abstract. This article is devoted to three-dimensional visualization of transients in underground network lines. The three-dimensional visualization presented in this article is an excellent tool for demonstrating the complex formation of traveling waves along a cable line caused by switching overvoltages. As an example, the case of overvoltage when a 110 kV cable line is switched on at idle is considered. The results of the study are the construction of curves of change in time of overvoltage along the length of the line. When comparing the results obtained by modeling switching overvoltages using the developed model with the results obtained using the EMTP-RV software package, a good match was obtained (the maximum discrepancy between the overvoltage values at the receiving end of the line does not exceed 2.4%).

Key words: three-dimensional visualization, switching overvoltages, high-voltage cable lines.

References

- [1] A.L. Kulikov, "Metody i sredstva volnovogo opredeleniya mesta povrezhdeniya na vozdushnykh liniyakh elektropredachi [Methods and means of wave detection of damage on overhead power lines]", *Bibliotekha elektrotehnika [Library of Electrical Engineering]*, no. 2(242), pp. 1-96, 2019 (in Russian)
- [2] M.V. Dmitriev, "Kabel'nye linii vysokogo napryazheniya [High voltage cable lines]", "Sankt-Peterburg: politekh-press [St. Petersburg: polytech-press]". pp. 688, 2021 (in Russian)
- [3] Dommel, H. W. EMTP theory book. Canada: Microtran Power System Analysis Corporation, pp. 483, 1996.
- [4] Morched, A. A., Gustavsen, B., Tartibi, M. universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 14, no. 3, pp. 1032 – 1038, 1999.
- [5] Han, L., et al. Algorithm for fast calculating the energization overvoltages along a power cable based on modal theory and numerical inverse Laplace transform. *Electric Power Systems Research*, vol. 210, pp. 108 – 163, 2022.

УДК 621.311

Ю.И. Солуянов^{1,2,3}, А.И. Федотов^{1,3}, А.Р. Ахметшин^{1,3}, В.А. Халтурин^{1,2}

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ДОШКОЛЬНЫХ И ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РАЗРАБОТКОЙ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ

Ассоциация «Росэлектромонтаж»¹АО «Татэлектромонтаж»²Казанский государственный энергетический университет³

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы разработки нормативных требований для расчета электрических нагрузок дошкольных и общеобразовательных учреждений. Сравнение расчетных электрических нагрузок и фактических подтвердило необходимость разработки методики расчета электрических нагрузок дошкольных и общеобразовательных учреждений в силу значительного несовпадения результатов. Нормативные значения удельных электрических нагрузок дошкольных и общеобразовательных учреждений устанавливались более 20 лет тому назад и не могли учесть прогресс в области энергосберегающих технологий в системах освещения, компьютерной техники, использования аутсорсинга для обеспечения питанием учащихся, когда привозимая готовая пища подвергается только разогреву. В этой связи актуальны современные исследования электрических нагрузок данных учреждений с целью приведения в соответствие с ними устаревших нормативов.

Ключевые слова: система электроснабжения, дошкольные образовательные учреждения, общеобразовательные учреждения, энергоэффективность, расчетная электрическая нагрузка.

Завышенные нормативы электрических нагрузок обуславливают неоправданное увеличение стоимости строительства электроснабжения жилых и общественных зданий [1-3].

Актуализация удельных электрических нагрузок жилых и общественных зданий является важной задачей для электросетевой и строительной отраслей, так как использование устаревших нормативных величин приводит к удорожанию систем электроснабжения, эксплуатационным затратам, в том числе повышенным потерям в силовых трансформаторах [4-6].

Выполнению работы по совершенствованию нормативных технических документов в части расчета электрических нагрузок детских садов и школ благоприятствует цифровая трансформация в электроэнергетике, а именно установка интеллектуальных приборов учета электроэнергии [5-7].

Для расчета электрических нагрузок при проектировании в основном применяют следующие своды правил: СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»; СП 251.1325800.2016 «Здания общеобразовательных организаций. Правила проек-

тирования»; СП 252.1325800.2016 «Здания дошкольных образовательных организаций. Правила проектирования»; ТСН 31-306-2004 г. Москвы (МГСН 4.06-03) «Общеобразовательные учреждения»; ТСН 31-307-2006 г. Москвы (МГСН 4.07-05) «Дошкольные образовательные учреждения». А также методические пособия: Методическое пособие. Проектирование зданий и дошкольных образовательных организаций. Разработчик: АО Московский научно-исследовательский и проектный институт типологии и экспериментального проектирования. Утвержден: ФАУ «ФЦС» от 01.01.2018; Методическое пособие. Проектирование зданий общеобразовательных организаций. Разработчик: АО Московский научно-исследовательский и проектный институт типологии и экспериментального проектирования. Утверждено: ФАУ «ФЦС» от 01.01.2018.

Наличие в настоящее время нескольких нормативных документов, сводов правил, различных методик и других нормативных документов с аналогичными названиями, но с разными подходами к формированию нормативных значений удельных электрических нагрузок детских садов и школ указывает на несистемный подход к разработке нормативных документов.

В настоящее время при проектировании, строительстве детских садов и школ используются документы, разработанные различными ведомствами, при этом часто противоречивые или дублирующие друг друга.

Сравнение проектных значений электрических нагрузок с фактически измеренными данными демонстрирует, что максимальные фактические значения электрической нагрузки исследуемых объектов в несколько раз меньше расчетных, что свидетельствует об избыточных требованиях и завышенных нормативных нагрузках электроприемников в представленных сводах правил для проектирования детских садов и школ. Для приближения расчетных и фактических значений электрических нагрузок детских садов и школ необходимо актуализировать СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

Анализ фактических графиков удельной электрической нагрузки детских садов и школ показал, что фактические электрические нагрузки, как и для жилых зданий [1-3], значительно ниже проектных и нормативных значений, что является предпосылкой для актуализации СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

На рис. 1 показана максимальная удельная мощность дошкольных образовательных учреждений рассматриваемой выборочной совокупности за период наблюдения на 1 воспитанника. Также показаны среднее выборочное значение и стандартное отклонение максимальной удельной мощности дошкольных образовательных учреждений за период наблюдения.

Из рис. 1 видно, что среднее значение удельной мощности выборочной совокупности дошкольных образовательных учреждений составляет 0,20 кВт на 1 воспитанника (у детских садов с бассейном – 0,18 кВт/восп.). В связи с тем, что нагрузка дошкольных образовательных учреждений обеих групп одного порядка, было принято решение в дальнейших расчетах выборочную совокупность дошкольных образовательных учреждений на группы по наличию бассейна не разделять.

Зависимости удельной мощности от количества воспитанников в выборочной совокупности дошкольных образовательных учреждений выявить не удалось.

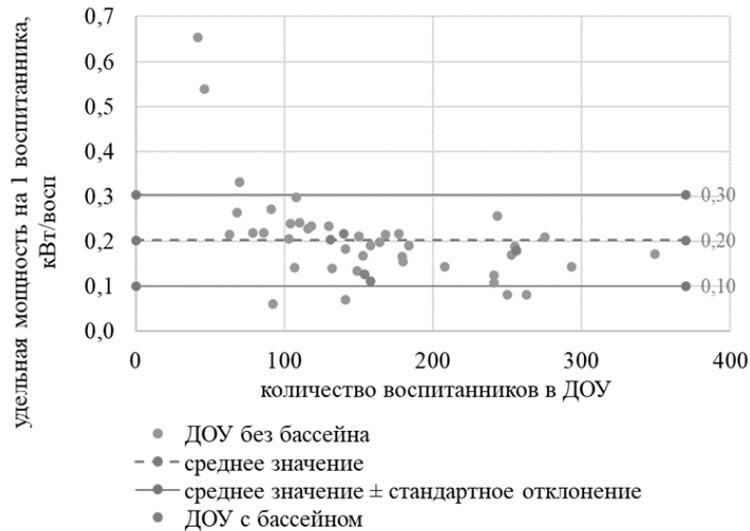


Рис. 1. Максимальная удельная мощность дошкольных образовательных учреждений на 1 воспитанника

На рис. 2 приведена максимальная удельная мощность общеобразовательных учреждений рассматриваемой выборочной совокупности за период наблюдения на 1 обучающегося. Также показаны среднее выборочное значение и стандартное отклонение максимальной удельной мощности общеобразовательных учреждений за период наблюдения.

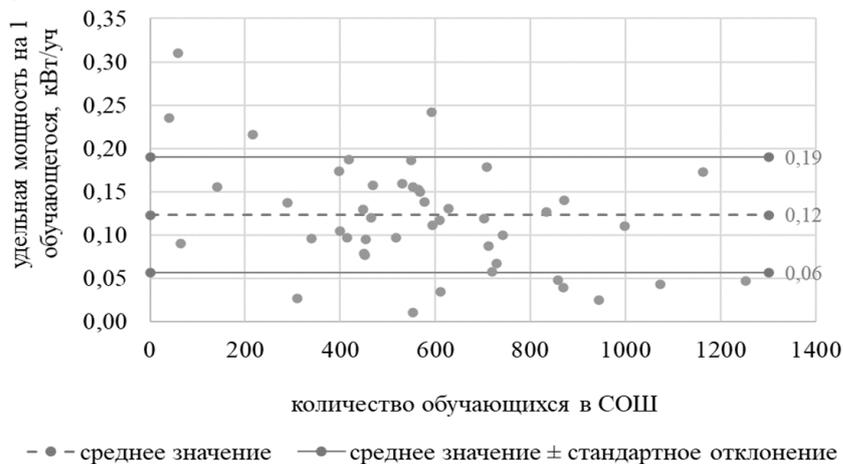


Рис. 2. Максимальная удельная мощность общеобразовательных учреждений на 1 обучающегося

Как следует из рис. 2, среднее значение удельной мощности общеобразовательных учреждений составляет 0,12 кВт на 1 обучающегося.

На рис. 3 приведен суточный график усредненной нагрузки выборочной совокупности дошкольных образовательных учреждений г. Москвы, полученный в результате обработки данных за период наблюдения.

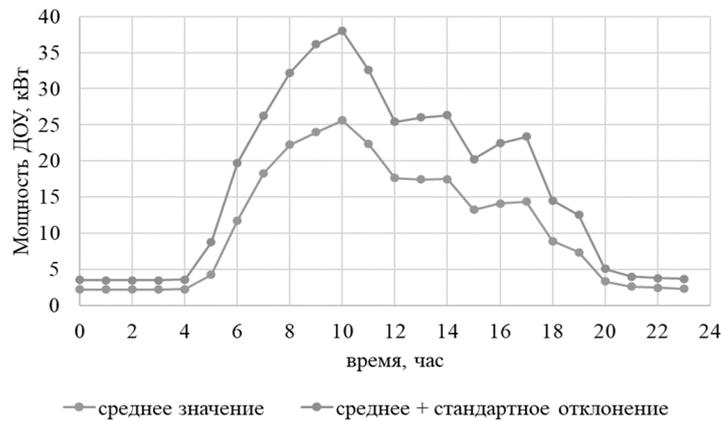


Рис. 3. График усредненной нагрузки дошкольных образовательных учреждений г. Москвы

По данному графику видно, что максимального значения усредненная нагрузка дошкольных образовательных учреждений достигает в момент времени 10:00. Ее значение в этот момент времени равно 25,65 кВт. Также на графике видны еще два более низких по амплитуде максимума нагрузки в моменты времени 14:00 (17,51 кВт) и 17:00 (14,40 кВт). Имеется также незначительный всплеск нагрузки в момент времени 19:00 (7,41 кВт).

С учетом стандартного отклонения максимум усредненной нагрузки выборочной совокупности дошкольных образовательных учреждений г. Москвы достигает значения 37,97 кВт.

На рис. 4 приведен суточный график усредненной нагрузки выборочной совокупности общеобразовательных учреждений г. Москвы, полученный в результате обработки данных за период наблюдения.

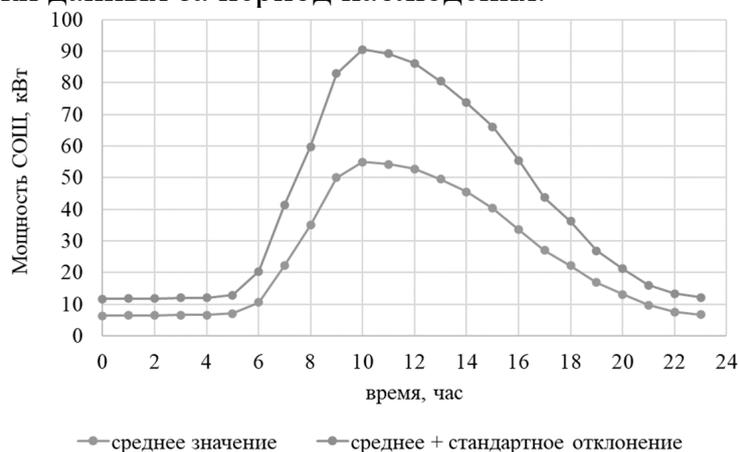


Рис. 4. График усредненной нагрузки общеобразовательных учреждений г. Москвы

По данному графику видно, что максимального значения усредненная нагрузка общеобразовательных учреждений достигает в момент времени 10:00. Ее значение в этот момент времени равно 54,98 кВт. С учетом стандартного отклонения максимум усредненной нагрузки выборочной совокупности общеобразовательных учреждений г. Москвы достигает значения 90,49 кВт.

Типовой (усредненный) график дошкольных образовательных учреждений, рис. 3, демонстрирует устойчивый тренд снижения нагрузки после достижения утреннего максимума. Наложение на него интервалов постоянства или

даже некоторого роста нагрузки можно объяснить приготовлением или разогревом пищи для воспитанников. Режим ночного электропотребления наступает примерно в 20.00 часов, когда в зданиях полностью отсутствуют воспитанники. Поскольку для многоквартирных жилых домов пиковая нагрузка приходится на интервал времени 18.00–20.00 часов, при расчетах коэффициентов одновременности совпадения максимумов нагрузки для дошкольных образовательных учреждений следует использовать значения электрической мощности на 18.00 часов, так как позже она монотонно снижается.

Для общеобразовательных учреждений с односменным графиком работы закономерности изменения суточной нагрузки качественно такие же, как и для дошкольных образовательных учреждений. Соответственно, так же и для общеобразовательных учреждений при расчетах коэффициентов одновременности совпадения максимумов нагрузки следует использовать значения электрической мощности на 18.00 часов, поскольку позже она монотонно снижается. Двухсменный режим работы не меняет этого вывода, но сказывается на значениях коэффициентов в сторону их увеличения. Отсюда следует, что целесообразна разработка значений коэффициентов одновременности совпадения максимумов нагрузки для общеобразовательных учреждений двух видов применительно к режимам работы школ.

Библиографический список

1. Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков // *Электричество*. – 2024. – № 4. – С. 36-50. – DOI 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50. – EDN UZDCMS.
2. Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и 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.
3. Надтока, И.И., Павлов А.В., Новиков С.И. Проблемы расчёта электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2013. – № 1. – С. 136 – 139.
4. Ахметшин, А.Р., Солуянов Ю.И., Федотов А.И. и др. Расчет удельных электрических нагрузок жилых зданий на основании фактических замеров // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 313-323. – EDN AHMDJR.
5. Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Чернова Н.В. и др. Анализ фактических электрических нагрузок объектов индивидуального жилищного строительства // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2021. – № 5(68). – С. 60-65. – EDN DXVKQM.
6. Надтока, И.И. Павлов А.В. Расчёты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2014. – № 3. – С. 36 – 39.
7. Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области // *Электричество*. – 2023. – № 7. – С. 52-65. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. – EDN IQAFRE.

Yu.I. Soluyanov^{1,2,3}, A.I. Fedotov^{1,3}, A.R. Akhmetshin^{1,3}, V.A. Khalturin^{1,2}

ANALYSIS OF ELECTRICAL LOAD OF KINDERGARTENS AND SCHOOLS WITH THE SUBSEQUENT DEVELOPMENT OF REGULATORY REQUIREMENTS

Association "Roselectromontazh"¹
JSC "Tatelectromontazh"²
Kazan State Power Engineering University³

Abstract. The article discusses the development of regulatory requirements for kindergartens and schools. A comparison of calculated electrical loads and actual ones confirmed the need to develop a methodology for calculating electrical loads due to the significant discrepancy between the results. Standard values for specific electrical loads of kindergartens and schools were established more than 20 years ago and could not take into account progress in the field of energy-saving technologies. In this regard, modern research into the electrical loads of these institutions is relevant in order to bring outdated standards into compliance with them.

Key words: power supply system, kindergarten, school, energy efficiency, electrical load.

References

- [1] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., “Analiz udel'nykh elektricheskikh nagruzok kottedzhnykh poselkov [Analysis of specific electrical loads of cottage settlements]”, *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 4, pp. 36-50, 2024 (in Russian)
- [2] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., “Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskovskoy oblasti [Analysis of actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region]”, *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*, no. 4, pp. 20-28, 2022 (in Russian)
- [3] I.I. Nadtoke, A.V. Pavlov, S.I. Novikov, “Problemy raschota elektricheskikh nagruzok kommunal'no-bytovykh potrebiteley mikrorayonov megapolisov [Problems of calculating electrical loads of municipal consumers in microdistricts of megacities]”, *Izv. vuzov. Elektromekhanika [Izv. universities Electromechanics]*, no. 1, pp. 136 – 139, 2013 (in Russian)
- [4] A.R. Akhmetshin, Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov and et al., “Raschet udel'nykh elektricheskikh nagruzok zhilykh zdaniy na osnovanii fakticheskikh zamerov [Calculation of specific electrical loads of residential buildings based on actual measurements]”, *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University]*, no. 4, pp. 313-323, 2022 (in Russian)
- [5] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, N.V. Chernova and et al., “Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok ob'yektov individual'nogo zhilishchnogo stroitel'stva [Analysis of actual electrical loads of individual housing construction objects]”, *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye [Electricity. Transmission and distribution]*, no. 5(68), pp. 60-65, 2021 (in Russian)
- [6] I.I. Nadtoke, A.V. Pavlov, “Raschoty elektricheskikh nagruzok zhiloy chasti mnogokvartirnykh domov s elektricheskimi plitami, osnovannyye na srednikh nagruzkakh kvartir [Calculations of electrical loads of the residential part of apartment buildings with electric stoves, based on the average loads of apartments]”, *Izv. vuzov. Elektromekhanika [Izv. universities Electromechanics]*, no. 3, pp. 36 – 39, 2014 (in Russian)
- [7] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., “Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskvy i Moskovskoy oblasti [Updating the

specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region]”, *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 7, pp. 52-65, 2023 (in Russian)

УДК 621.311

Ю.И. Солюянов^{1,2,3}, А.И. Федотов^{1,3}, А.Р. Ахметшин^{1,3}, В.И. Солюянов^{1,2}

ВНЕДРЕНИЕ АКТУАЛИЗИРОВАННЫХ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Ассоциация «Росэлектромонтаж»¹АО «Татэлектромонтаж»²Казанский государственный энергетический университет³

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы внедрения актуализированных нормативных требований для расчета потребной мощности многоквартирных жилых домов. Сравнение расчетных электрических нагрузок и фактических подтвердило необходимость разработки адекватной методики расчета потребной мощности многоквартирных жилых домов в силу значительного несовпадения результатов. Результатом научно-исследовательской работы стало утверждение приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28.12.2023 N 1005/пр Изменения № 6 к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», включающего обновлённые удельные электрические нагрузки для городской агломерации «г. Москва - Московская область». Технико-экономический эффект от внедрения результатов исследования заключается в снижении капитальных расходов на системы электроснабжения жилых микрорайонов.

Ключевые слова: запертая электрическая мощность, резервная электрическая мощность, потери электроэнергии, энергоэффективность, энергосбережение, система электроснабжения, удельное энергопотребление.

Начиная с 2016 г., в соответствии с планом развития нормативной базы Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации и при поддержке крупных строительных компаний ведется работа, направленная на сокращение капитальных затрат за счет снижения нормативов удельных электрических нагрузок жилых домов и общественных зданий, при подаче заявок на технологическое присоединение к электрическим сетям [1-3].

Результаты научно-исследовательской работы:

- в 2019 г. в Республике Татарстан впервые в Российской Федерации на региональном уровне утверждены новые сниженные нормы удельных электрических нагрузок. Затраты строительных компаний фактически были снижены от 30 до 50% при подаче заявок на технологическое присоединение к электрическим сетям;

- в 2021 г. Изм. № 4 к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» был введен поправочный коэффициент и в зависимости от региона снижение составило от 9 до 19%; для Нижегородской области – 9%;

- в 2024 г. введено Изм. № 6 к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», в котором снижение нормативов для расчета электрических нагрузок жилых объектов составило от 20 до 35% для Агломерации «г. Москва - Московская область».

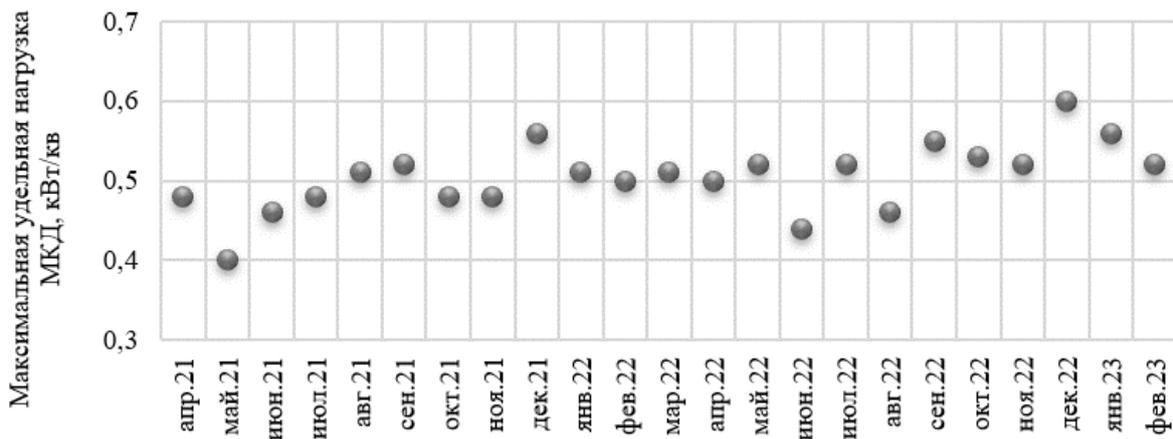
Своевременная актуализация действующих нормативных документов позволит значительно снизить затраты на строительство электрических сетей, а также потери электроэнергии в силовых трансформаторах [4-6].

Использование устаревших значений нормативов в жилищном строительстве привело к тому, что трансформаторные подстанции загружены в среднем не более 45% [5-7], к примеру, в Нижегородской области 68 % трансформаторных подстанций имеют коэффициент загрузки менее 30%.

Внедрение интеллектуальных приборов учета электроэнергии позволяет получать данные по нагрузкам, что способствует совершенствованию нормативной базы на основании фактических данных [1-3]. Современные жилые дома проектируются с возможностью полного автоматизированного сбора информации по всем видам коммунальных услуг.

Для статистической обработки суточных профилей электрической нагрузки квартир многоквартирных домов использованы данные кластера 11–18 этажей, введенные в эксплуатацию с 2015–2019 гг. за период 01.04.2021 г. – 28.02.2023 г. В домах выявлены и исключены малоэксплуатируемые квартиры для повышения точности расчетов [1, 2, 4, 5]. В разрезе дня с максимальным потреблением найдено значение максимальной электрической нагрузки, далее максимальной удельной электрической нагрузки квартир домов.

На рис. 1 представлено изменение уровня максимальной удельной нагрузки квартир домов кластера 11–18 этажей.



период наблюдения (с 1 апреля 2021 г. по 28 февраля 2023 г.)

Рис. 1. Максимальная удельная нагрузка квартир домов за период 01.04.2021 г. – 28.02.2023 г.

Рис. 1 демонстрирует, что наибольшая электрическая нагрузка домов кла-

стера 11 – 18 этажей по данным наблюдалась в декабре 2022 г. (0,60 кВт/квартира), а в разрезе месяца – 31 декабря 2022 г. (у 69% домов). Минимальное электропотребление было зафиксировано в мае 2021 г. (0,40 кВт/квартира) и в июне (0,43 кВт/квартира).

Для расчета удельных электрических нагрузок для более 1000 квартир случайным образом производилась группировка квартир в количестве от 20 до 3000 в группе. Для группы каждого размера формировалось по 100 сочетаний квартир. Для каждой группы квартир определялись сутки с максимальным потреблением за каждый интервал наблюдения. В разрезе этих суток находилась максимальная нагрузка группы квартир и по ней – удельная нагрузка одной квартиры для данной группы. Для каждой группы квартир рассчитано максимальное значение.

Результатом научно-исследовательской работы стало утверждение приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28.12.2023 N 1005/пр Изменения № 6 к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», включающего обновлённые удельные электрические нагрузки для городской агломерации «г. Москва - Московская область». Сравнение удельной электрической нагрузки квартир домов подставлено на рис. 2

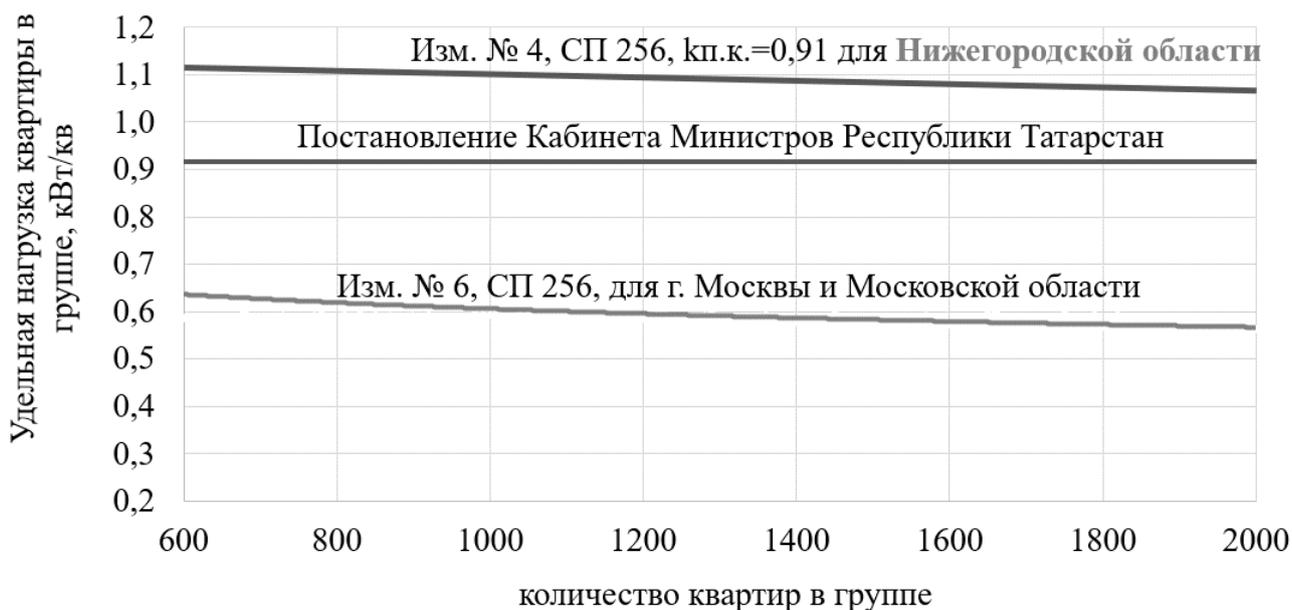


Рис. 2. Сравнение удельной электрической нагрузки квартир домов

Сравнение удельной нагрузки квартир жилых домов (рис. 2) для Нижегородской области, Республики Татарстан, агломерации «Москва-Московская область» демонстрирует, что существует потенциал снижения нормативных значений.

Для оценки эффекта от внедрения актуализированных нормативных требований для расчета потребной мощности многоквартирных жилых домов был выполнен расчет электрической нагрузки на примере 17 этажного 2 подъездного МКД, выполненного по типовым проектам, состоящего из 200 квартир. Расчет электрической нагрузки проводится для двух вариантов с использованием СП

256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»:

- 1) с применением коэффициента кп.к. равного 0,91, таблица 7.5а;
- 2) для значений городской агломерации «г. Москва - Московская область», таблица 7,1а.

1. Расчетная нагрузка квартир:

Вариант 1: $R_{кв} = R_{кв.уд} \cdot n = 1,36 \cdot 200 = 272$ кВт,

Вариант 2: $R_{кв} = 0,91 \cdot 200 = 182$ кВт,

где $R_{кв.уд}$ - для варианта 1 принимаемая по таблице 7.1, для варианта 2 по таблице 7.1а.

2. Расчетная нагрузка линии питания лифтовых установок определяется по формуле (в подъезде установлено 2 лифта, пассажирский лифт с установленной мощностью электродвигателя – 6 кВт и грузовой – 9,5 кВт):

$$P_{р.л} = K_{с.л} \sum_1^{n_l} P_{ni} = 0,8 \cdot (2 \cdot 9,5 + 2 \cdot 6) = 24,8 \text{ кВт.}$$

3. Нагрузка насосов ($R_{кнс}$) принята равной 18 кВт и ($R_{дн}$) 1,92 кВт.

4. Расчетная нагрузка жилого дома $R_{р.ж.д}$, кВт, определяется по формуле:

Вариант 1: $R_{р.ж.д} = кп.к \cdot R_{кв} + 0,9 \cdot (R_{кнс} + R_{дн} + R_{рл}) =$

$0,91 \cdot 272 + 0,9 \cdot (24,8 + 18 + 1,92 + 24,8) = 287,768$ кВт.

Вариант 2: $R_{р.ж.д} = R_{кв} + 0,9 \cdot (R_{кнс} + R_{дн} + R_{рл}) =$

$182 + 0,9 \cdot (24,8 + 18 + 1,92 + 24,8) = 222,3$ кВт.

Разница: 65,52 кВт.

Расчеты демонстрируют, что актуализация нормативных значений снижает заявленную мощность технологического присоединения на 23%.

На рис. 3 приведен эффект от применения актуализированных значений удельных электрических нагрузок.

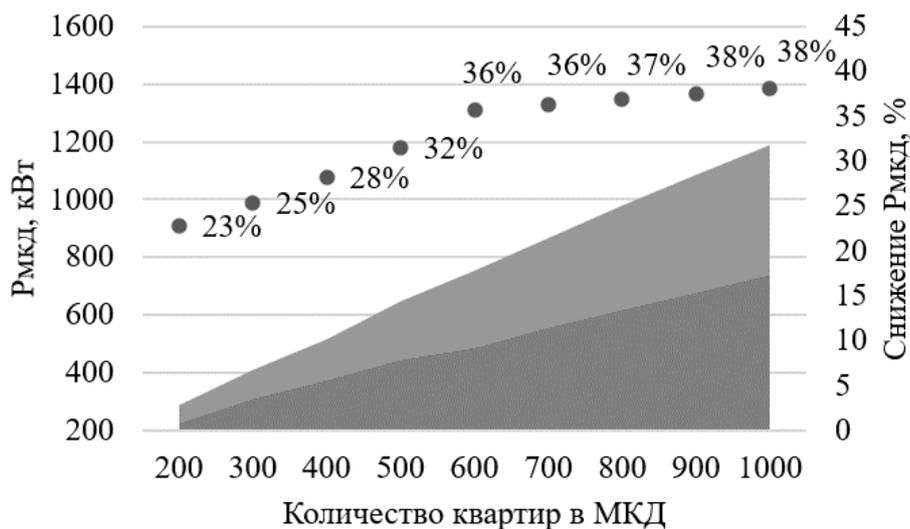


Рис. 3. Эффект от применения актуализированных значений удельных электрических нагрузок

Как видно из рис. 3, актуализация значений удельных электрических нагрузок (красная зона) для Нижегородской области даст возможность сокращения требуемой мощности для электроснабжения жилых домов (от 23% до 38%,

синяя зона). При этом эффект зависит от количества квартир в жилом доме.

Результатом научно-исследовательской работы стало утверждение обновлённых удельных электрических нагрузок для городской агломерации «г. Москва - Московская область». Применение на практике новых нормативных значений приведёт к тому, что затраты на строительство систем электроснабжения снизятся, а технико-экономический эффект будет заключаться в снижении капитальных расходов на кабельно-проводниковую продукцию и силовые трансформаторы.

Библиографический список

1. **Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др.** Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков // *Электричество*. – 2024. – № 4. – С. 36-50. – DOI 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50. – EDN UZDCMS.
2. **Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и 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.
3. **Надтока, И.И., Павлов А.В., Новиков С.И.** Проблемы расчёта электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2013. – № 1. – С. 136 – 139.
4. **Ахметшин, А.Р., Солуянов Ю.И., Федотов А.И. и др.** Расчет удельных электрических нагрузок жилых зданий на основании фактических замеров // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 313-323. – EDN AHMDJR.
5. **Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Чернова Н.В. и др.** Анализ фактических электрических нагрузок объектов индивидуального жилищного строительства // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2021. – № 5(68). – С. 60-65. – EDN DXVKQM.
6. **Надтока, И.И. Павлов А.В.** Расчёты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2014. – № 3. – С. 36 – 39.
7. **Солуянов, Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др.** Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области // *Электричество*. – 2023. – № 7. – С. 52-65. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. – EDN IQAFRE.

Yu.I. Soluyanov^{1,2,3}, A.I. Fedotov^{1,3}, A.R. Akhmetshin^{1,3}, V.I. Soluyanov^{1,2}

IMPLEMENTATION OF UPDATED REGULATORY REQUIREMENTS FOR CALCULATING THE POWER REQUIREMENT OF MULTIPLE-APARTMENT RESIDENTIAL BUILDINGS

Association "Roselectromontazh"¹
 JSC "Tatelectromontazh"²
 Kazan State Power Engineering University³

Abstract. The article discusses the implementation of updated regulatory requirements for calculating the required power of multi-apartment residential buildings. The results of the research work were approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 28, 2023 N 1005/pr Amendment No. 6 to SP 256.1325800.2016 including updated specific electrical loads for the urban agglomeration "Moscow - Moscow Region". The technical and economic effect of implementing the research results is to reduce capital costs for power supply systems in residential neighborhoods.

Key words: locked electric power, reserve electric power, electricity losses, energy efficiency.

References

- [1] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., "Analiz udel'nykh elektricheskikh nagruzok kottedzhnykh poselkov [Analysis of specific electrical loads of cottage settlements]", *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 4, pp. 36-50, 2024 (in Russian)
- [2] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., "Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskovskoy oblasti [Analysis of actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region]", *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*, no. 4, pp. 20-28, 2022 (in Russian)
- [3] I.I. Nadtoka, A.V. Pavlov, S.I. Novikov, "Problemy raschota elektricheskikh nagruzok kommunal'no-bytovykh potrebiteley mikrorayonov megapolisov [Problems of calculating electrical loads of municipal consumers in microdistricts of megacities]", *Izv. vuzov. Elektromekhanika [Izv. universities Electromechanics]*, no. 1, pp. 136 – 139, 2013 (in Russian)
- [4] A.R. Akhmetshin, Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov and et al., "Raschet udel'nykh elektricheskikh nagruzok zhilykh zdaniy na osnovanii fakticheskikh zamerov [Calculation of specific electrical loads of residential buildings based on actual measurements]", *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University]*, no. 4, pp. 313-323, 2022 (in Russian)
- [5] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, N.V. Chernova and et al., "Analiz fakticheskikh elektricheskikh nagruzok ob'yektov individual'nogo zhilishchnogo stroitel'stva [Analysis of actual electrical loads of individual housing construction objects]", *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye [Electricity. Transmission and distribution]*, no. 5(68), pp. 60-65, 2021 (in Russian)
- [6] I.I. Nadtoka, A.V. Pavlov, "Raschoty elektricheskikh nagruzok zhiloy chasti mnogokvartirnykh domov s elektricheskimi plitami, osnovannyye na srednikh nagruzkakh kvartir [Calculations of electrical loads of the residential part of apartment buildings with electric stoves, based on the average loads of apartments]", *Izv. vuzov. Elektromekhanika [Izv. universities Electromechanics]*, no. 3, pp. 36 – 39, 2014 (in Russian)
- [7] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., "Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskvy i Moskovskoy oblasti [Updating the

specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region]”, *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 7, pp. 52-65, 2023 (in Russian)

УДК 621.311

Ю.И. Солуянов^{1,2}, А.И. Федотов^{1,2}, А.Р. Ахметшин^{1,2}, В.И. Солуянов^{1,2}

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

ООО «Ассоциация РЭМ»¹Казанский государственный энергетический университет²

Аннотация. Одной из проблем, которая влияет на распространение зарядных станций для электромобилей, является риск увеличения нагрузок на электрические сети. В статье рассмотрены вопросы внедрения зарядных станций для электромобилей, а также вопросы по разработке требований к подключению зарядной инфраструктуры, введению нормативных значений коэффициентов одновременности и несовпадения максимумов при определении расчетных электрических нагрузок жилых и общественных зданий в зависимости от типа зарядных станций, а также рекомендаций в отношении мощности зарядных станций в зависимости от назначения объекта, в который зарядные станции интегрируются.

Ключевые слова: «запертая» электрическая мощность, энергоэффективность, энергосбережение, система электроснабжения, электромобиль, зарядная станция, коэффициент несовпадения максимумов, коэффициент одновременности.

Благодаря новым стратегиям крупнейших автопроизводителей и решениям правительств по ужесточению требований к выбросам вредных веществ автомобилями и поддержке транспорта на альтернативных видах топлива (в рамках различных мер стимулирования) рынок электромобилей и топливных элементов динамично развивается и имеет потенциал для дальнейшего роста.

Эксперты прогнозируют, что к 2030 году продажи электромобилей вырастут до 27 млн единиц. Электромобиль (*EV*) — это обобщающий термин для четырех технологий, а именно аккумуляторных электромобилей (*BEV*), гибридных электромобилей (*HEV*), подключаемых гибридных электромобилей (*PHEV*) и электромобилей на топливных элементах (*FCEV*). Все технологии используют электрическую трансмиссию и батарею. Они различаются тем, какой элемент является основным носителем энергии и формой ее хранения, способом, которым этот основной носитель энергии приводит в движение транспортное средство, и насколько мощными являются соответственно аккумулятор и двигатель [1-3].

Для целей данного исследования рассматривались *BEV* и *PHEV*, поскольку это единственные два варианта, которые взаимодействуют с электрической сетью. Из двух рассмотренных групп электромобилей *BEV* наиболее критически зависят от инфраструктуры зарядки.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р принята «Концепция развития производства и использования

электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» (Концепция), в соответствии с которой определены целевые индикаторы производства электрического автомобильного транспорта и развития электрозарядной инфраструктуры в России до 2030 года.

Несмотря на ряд мероприятий по развитию инфраструктуры зарядных станций для электромобилей, которые проводятся во многих странах, в том числе и в России, их дальнейшее распространение сталкивается с определенными трудностями.

Одним из факторов, снижающих привлекательность электромобилей с точки зрения пользователей, является низкая скорость зарядки аккумуляторов по сравнению с заправкой автомобилей традиционными видами топлива.

Однако в настоящее время как производители зарядных станций, так и производители электромобилей постоянно работают над увеличением скорости процесса зарядки с помощью так называемых станций быстрой зарядки и совершенствованием конструкции и технологии аккумуляторов. Это позволит в будущем уравнивать время зарядки электромобиля и время заправки автомобиля традиционным топливом.

Кроме того, производители электромобилей постоянно совершенствуют технологический уровень аккумуляторов, что позволяет более эффективно использовать мощность аккумулятора во время движения электромобиля, а также увеличивать емкость аккумуляторов, что позволяет увеличить интервалы между процессами зарядки.

Еще одной проблемой, влияющей на распространение зарядных станций для электромобилей, является риск увеличения нагрузки на электрические сети. И в этом контексте тематика проводимой научной работы становится актуальной, поскольку, как показывает практика, существует проблема несоответствия расчетных электрических нагрузок при проектировании и их фактических значений при эксплуатации объектов [4-6].

Необходимость проведения научно-исследовательской работы связана с выявлением пробелов в отечественной нормативной базе, отсутствием в нормативных документах методик определения расчетных нагрузок зарядных станций для электромобилей, интегрированных в инфраструктуру общественных зданий, таких как здания дошкольных образовательных учреждений, общеобразовательных учреждений, поликлиник, физкультурно-оздоровительных комплексов.

В целях реализации Концепции в 2024 году внесены изменения в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», позволяющие производить расчет мощности зарядной инфраструктуры, интегрированной в жилые здания. В частности, введены коэффициенты спроса, коэффициент несовпадения максимумов, даны определения для станций медленной и быстрой зарядки.

В свою очередь, дополнительные затраты на технологическое присоединение зарядных станций в жилом секторе не оправданы ввиду того, что суточный график электрической нагрузки многоквартирного дома меняется с течением времени и имеет ярко выраженный спад потребления электроэнергии в ночное время, рис. 1. Это наглядно иллюстрирует график нагрузки многоквартирного

дома, рис. 1.

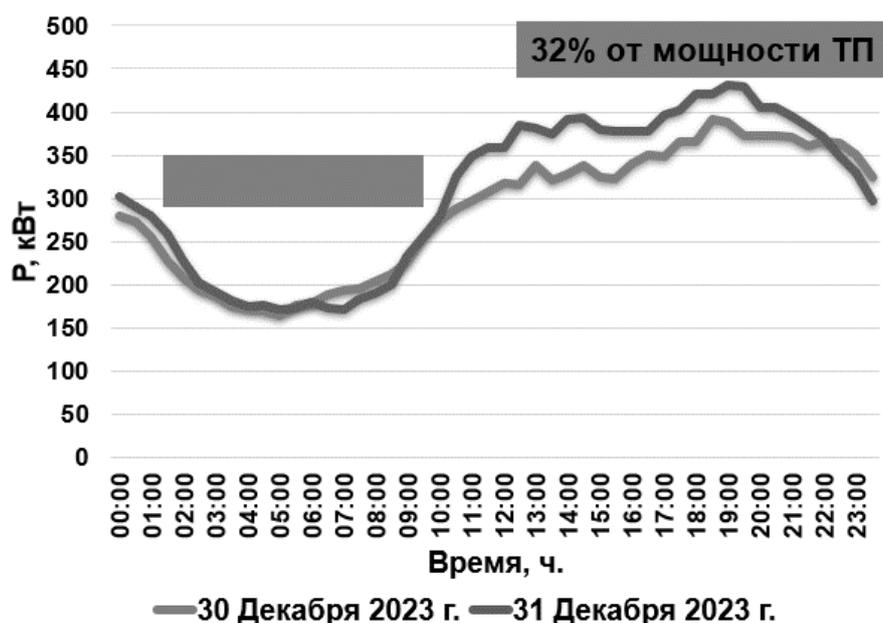


Рис. 1. Фактический график электрической нагрузки трансформаторной подстанции, питающей многоквартирный дом

Необходимая мощность электростанций компенсируется ночным провалом в соответствии с графиком нагрузки многоквартирного дома (рис. 1) и не требует дополнительных затрат на технологическое присоединение. Исходя из того, что пиковая нагрузка многоквартирных домов в вечернее время составляет всего 32-33% от общей мощности трансформаторной подстанции, это позволяет сделать вывод о наличии в резерве еще около 67% мощности [5-7].

На рис. 2 представлен график средней стоимости технологического присоединения станций медленной зарядки электромобилей мощностью 11 кВт в зависимости от их количества, из которого видно, что применение коэффициентов снижает стоимость технологических присоединений.

На сегодняшний день сформирована большая база данных зарядных сессий электромобилей по всей стране. Это позволяет статистическими методами обосновать полученные нормативные значения.

Данные по зарядным сессиям электромобилей позволили сформировать график распределения зарядных сессий по времени суток и при наложении графика электрической нагрузки общественных и многофункциональных зданий получить соответствующие нормативные значения, на основании которых подготовить предложения по внесению изменений в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа». Для примера на рис. 3 представлен график совмещения графика распределения зарядных сессий по времени суток и графика электрической нагрузки городской поликлиники.

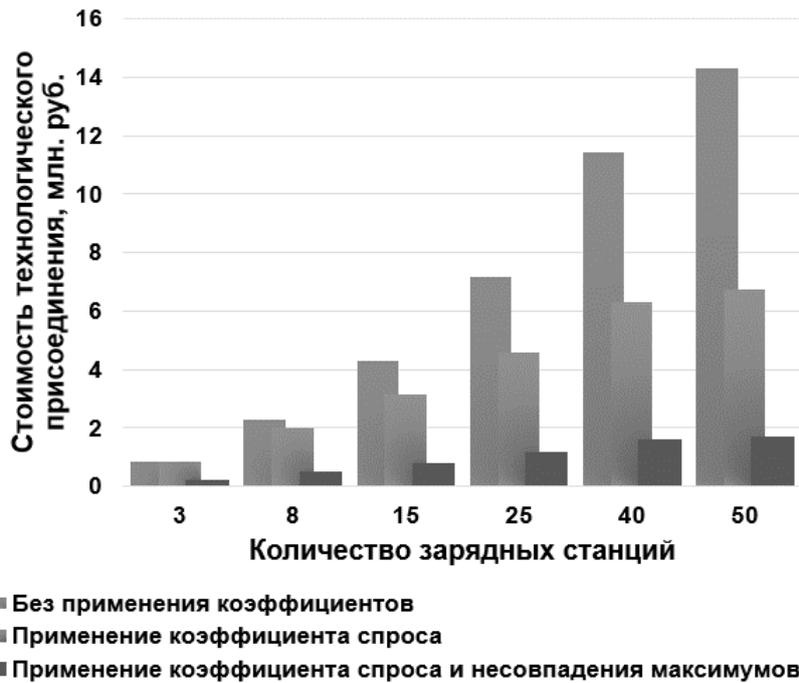


Рис. 2. Средняя стоимость технологического присоединения станций медленной зарядки (11 кВт) в зависимости от их количества



Рис. 3. Совмещение графика распределения зарядных сессий по времени суток и графика электрической нагрузки городской поликлиники

Областью применения результатов научно-исследовательской работы является актуализированный СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», нормативные требования которого будут использоваться проектными и строительными организациями, выполняющими расчеты по выбору зарядных станций и электрических сетей, осуществляющих электроснабжение жилых и общественных зданий.

Научно-исследовательская работа выполнена по заданию федерального автономного учреждения «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве» договор № 32413301943 – 2/2024 от 03.04.2024 г. на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по исследованию энергопотребления и определению расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки общественных и многофункциональных зданий.

Библиографический список

1. **Gilleran M., Bonnema E., Woods J.** Impact of electric vehicle charging on the power demand of retail buildings // *Applied Energy*. – 2021. – Vol. 4. – Art. no. 100062. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.100062.
2. **Xue L., Xia J.** Simulator to quantify and manage electric vehicle load impacts on low-voltage distribution grids // *World Resources Institute*. – 2020. – 40 p. DOI: 10.46830/writn.20.00009.
3. **Ali S., Wintzek P., Zdrallek M.** Development of Demand Factors for Electric Car Charging Points for Varying Charging Powers and Area Types // *IEEE Electricity*. – 2022. – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 410-441. – DOI: 10.3390/electricity3030022.
4. **Vaishali K., Prabha D.R.** The Reliability and Economic Evaluation Approach for Various Configurations of EV Charging Stations // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 26267 – 26280. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3367133.
5. **Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др.** Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков // *Электричество*. – 2024. – № 4. – С. 36-50. – DOI 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50. – EDN UZDCMS.
6. **Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др.** Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области // *Электричество*. – 2023. – № 7. – С. 52-65. – DOI 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. – EDN IQAFRE.
7. **Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Чернова Н.В. и др.** Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов в Республике Татарстан // *Электричество*. – 2021. – № 6. – С. 62–71. – DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71.

Yu.I. Soluyanov^{1,2}, A.I. Fedotov^{1,2}, A.R. Akhmetshin^{1,2}, V.I. Soluyanov^{1,2}

CALCULATION OF ELECTRIC LOADS OF APARTMENT BUILDINGS AND PUBLIC BUILDINGS TAKING INTO ACCOUNT CHARGING INFRASTRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLES

LLC "Association REM"¹
Kazan State Power Engineering University²

Abstract. One of the problems that affects the distribution of charging stations for electric vehicles is the risk of increasing the load on electrical networks. The article considers the issues of implementing charging stations for electric vehicles, as well as issues of developing requirements for connecting the charging infrastructure, introducing standard values of simultaneity coefficients and mismatch of maximums when determining the estimated electrical loads of residential and public buildings, depending on the type of charging stations, as well as recommendations regarding the power of charging stations depending on the purpose of the facility into which the charging stations are integrated.

Key words: "locked" electric power, energy efficiency, energy saving, power supply system, electric vehicle, charging station, maximum mismatch coefficient, simultaneity coefficient.

References

- [1] M. Gilleran, E. Bonnema, J. Woods, Impact of electric vehicle charging on the power demand of retail buildings, *Applied Energy*, vol. 4, art. no. 100062, 2021
- [2] L. Xue, J. Xia, Simulator to quantify and manage electric vehicle load impacts on low-voltage distribution grids, *World Resources Institute*, 40 p., 2020
- [3] S. Ali, P. Wintzek, M. Zdrallek, Development of Demand Factors for Electric Car Charging Points for Varying Charging Powers and Area Types, *IEEE Electricity*, vol. 3, Iss. 3, pp. 410-441, 2022
- [4] K. Vaishali, D.R. Prabha, The Reliability and Economic Evaluation Approach for Various Configurations of EV Charging Stations // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 26267 – 26280. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3367133.
- [5] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., "Analiz udel'nykh elektricheskikh nagruzok kottedzhnykh poselkov [Analysis of specific electrical loads of cottage settlements]", *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 4, pp. 36-50, 2024 (in Russian)
- [6] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin and et al., "Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov Moskvy i Moskovskoy oblasti [Updating the specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region]", *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 7, pp. 52-65, 2023 (in Russian)
- [7] Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, N.V. Chernova and et al. "Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov v Respublike Tatarstan [Updating the specific electrical loads of apartment buildings in the Republic of Tatarstan]", *Elektrichestvo [Electricity]*, no. 6, pp. 62-71, 2021 (in Russian)

УДК 621.316.11

М.В. Шарыгин, А.М. Альшахери, А.С. Джериу

ОБЩИЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА АДАПТИВНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Распределительные сети 6-35 кВ развиваются в сторону интеллектуальных сетей с увеличением доли распределенной генерации (РГ), мигрирующей нагрузкой, сложной топологией и режимами, внедрением активного управления сетью и изолированными режимами работы от основной электросети. Эти изменения влияют на уровни токов КЗ, пути тока КЗ и могут нарушить правильную работу системы токовой защиты.

В статье описан алгоритм формализованного задания уставочной области токовой цифровой релейной защиты, представлена адаптивная система токовой защиты, которая автоматически изменяет уставки (настройки) защиты всех реле токовой защиты при изменении топологии сети и ее режимов. Технология использует систему связи на основе стандарта МЭК61850.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, распределенная генерация (РГ), микрогрид, адаптивная защита, автоматический расчет уставок, МЭК61850, интеллектуальное электронное устройство (ИЭУ), информационная сеть, имитационное моделирование, реконфигурируемая электрическая сеть.

Введение. Описание проблемы. Непрерывный рост распределенной генерации (РГ), мигрирующей нагрузки, усложнение топологии и режимов в распределительных сетях создают проблему релейной защиты сети (РЗ) [1, 2]. Проблема связана с тем, что усложняется путь тока короткого замыкания (КЗ), возникает многосторонняя подпитка места КЗ. Это требует внедрения более сложных защит по сравнению с используемыми сейчас токовыми РЗ [3].

Комбинация перечисленных факторов, возможности изолированной работы приводит к режимам сети, когда уровни повреждения (КЗ) и пути тока повреждения (КЗ) изменяются, нарушая работу токовой защиты (МТЗ). Эти факторы влияют на чувствительность и время срабатывания РЗ, а с учетом изменения топологии сети ставят под угрозу и селективность РЗ [2, 4].

РГ вводит дополнительный источник тока КЗ, который может увеличивать общий уровень токов КЗ, и при этом изменять направление токов КЗ. Совокупное влияние многих небольших генерирующих агрегатов может иметь значительное влияние на токи КЗ и отрицательно влиять на работу системы токовой защиты.

По мере увеличения доли РГ, изолированная работа некоторых участков распределительной сети может стать выгодной и повысить надежность электро-

снабжения потребителей. Однако переключение между изолированным режимом работы и режимом работы с подключением к сети создает два сценария с очень разными уровнями токов КЗ.

Предлагаемое решение и цель статьи. Предлагается РЗ, работающую в сети с изменяемой топологией и наличием РГ, сделать адаптивной [4, 5]. Например, простая адаптивная схема токовой защиты с двумя группами уставок – одна для подключенной сети и одна для изолированного режима работы, может решить проблему [4].

При этом предлагаемая адаптивная система РЗ не использует предварительно рассчитанные группы настроек. Поскольку все будущие возможные режимы сети слишком многообразны, целесообразно рассчитывать оптимальные уставки (параметры срабатывания) РЗ в темпе автоматического управления для наиболее близких вероятных режимов и применять их всякий раз, когда в сети происходят изменения: подключение РГ, переход на изолированный или параллельный режим работы или иные переключения топологии сети [6].

Адаптивная система токовой РЗ была разработана с использованием трехуровневой архитектуры, показанной на рис. 1. Разделение функциональных уровней было установлено в соответствии с типом используемых данных и требуемым временем отклика для каждой функциональной группы. Первичная система находится внизу схемы и включает линии, трансформаторы, РГ, выключатели, переключатели цепей, трансформаторы тока (ТТ), трансформаторы напряжения (ТН) и т. д. Непосредственно над ним находится уровень исполнения, который включает в себя интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), установленные в сети (например, РЗ). Интерфейсы между первыми двумя уровнями состоят из проводных соединений для предоставления данных измерений и команд отключения или обмена данными по технологической шине МЭК61850 [7].

Уровень исполнения связан с уровнем координации, который отвечает за мониторинг и координацию ИЭУ. Наконец, наверху находится уровень управления энергопотреблением, который отвечает за управление всей сетью и взаимодействует с уровнем координации для достижения координации между адаптивной токовой защитой и интеллектуальной автоматикой управления сетью (АУС), за счет которой достигается оптимальность режимов. Интерфейс между уровнями исполнения, координации и управления основан на протоколах связи, таких как *DNP3*, *Modbus*, *IEC60870-5-103* и *IEC61850*.

Уровень исполнения состоит из РЗ, получающих данные измерений от ТТ (и, в некоторых случаях, ТН) и отключающих выключатели при обнаружении (повреждений) неисправностей, которые должны быть устранены с помощью специального РЗ.

Уровень выполнения – это автономный уровень, то есть решения об отключении принимаются локально с использованием локальных данных без какой-либо связи с другими уровнями. Это означает, что в случае сбоя связи между уровнем выполнения и уровнем координации токовая защита не отказывает.

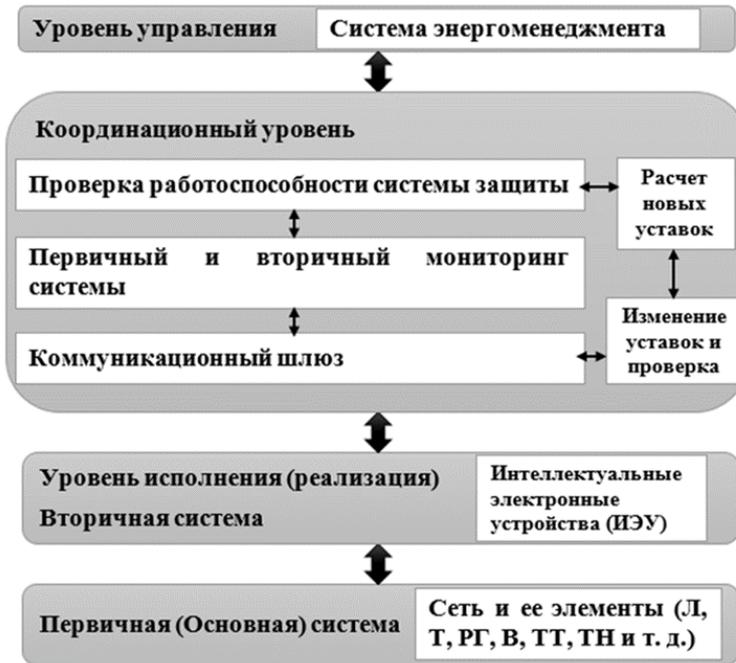


Рис. 1. Архитектура системы адаптивной токовой защиты

Удаленное изменение ее уставок будет невозможно в случае отказа координационного уровня или отказа канала связи между этими уровнями; однако, это не повлияет на систему токовой защиты, но будет означать, что уставки защиты не будут оптимизированы до восстановления связи.

Внедрение системы адаптивной защиты возможно благодаря введению новых функциональных возможностей на уровне координации, отсутствующих в традиционной системе защиты – модули автоматического расчета уставок (рис. 2).



Рис. 2. Отдельные компоненты алгоритма разработанной адаптивной системы токовой защиты

На рис. 2 представлены отдельные компоненты алгоритма разработанной адаптивной системы токовой защиты. Алгоритм адаптивного автоматического расчета уставок токовой защиты включает этапы,

1. Измерение и сбор данных. РЗ непрерывно измеряет ток, протекающий через цепь, с помощью трансформаторов тока.

2. Анализ и расчет. Алгоритм серверной части защиты (координационный уровень) анализирует собранные данные для определения уставок защиты. Этот анализ может включать сравнение конфигурации сети, измеренных значений тока, с заранее установленными пороговыми значениями, расчет токов повреждения, рассмотрение сопротивлений системы, а также оценку влияния различных сценариев неисправности на систему.

3. Расчет адаптивных уставок: на основе анализа. Сюда входит определение тока срабатывания, выдержки времени и любых других параметров, необходимых для эффективной защиты.

4. Проверка и валидация. Рассчитанные уставки затем проверяются посредством моделирования, чтобы гарантировать, что они обеспечивают адекватную защиту от различных аварийных ситуаций, минимизируя при этом ложные срабатывания.

5. Динамическое конфигурирование уставок. После проверки уставок сервер автоматически передает новые уставки защиты в ИЭУ.

6. Мониторинг и обслуживание. Реле защиты постоянно контролирует систему и свою собственную работоспособность, чтобы гарантировать, что уставки защиты остаются эффективными. Он также может включать функции периодических проверок и обновлений для обеспечения надежной работы.

В целом, алгоритм автоматического расчета и установки уставок токовой защиты направлен на обеспечение надежной и адаптивной защиты, минимизируя при этом нежелательные отключения и обеспечивая надежность системы.

Начало работы алгоритма инициируется либо блоком мониторинга на уровне координации, который реагирует на изменения в сети, либо системой управления энергопотреблением, которая сообщает о реконфигурации топологии сети, подключении-отключении РГ и изменениях изолированного / подключенного к сети.

Система адаптивной защиты будет реализована с использованием централизованного подхода, при котором расчеты уставок и команды выполняются одним процессором, а не на основе агентного подхода, который обычно включает в себя распределение нагрузки обработки и принятие решений. Причины, по которым был принят централизованный подход: более простая реализация в реальных распределительных сетях, где существующий диспетчерский контроль и данные централизованы, более простой ввод в эксплуатацию и проверка централизованного решения по сравнению с решением на основе агентов.

Выводы

Широкое внедрение в будущем схем РГ и АУС, возможность смены изолированной работы сетей на параллельную создадут серьезные проблемы для релейной защиты существующих сетей. Предложенная адаптивная схема токовой

релейной защиты может решить эти проблемы и может применяться в цифровых распределительных сетях.

Новизна описанной адаптивной системы токовой защиты заключается в ее автоматическом алгоритме, который отличается от других решений адаптивной защиты высокой гибкостью и всесторонним охватом всех возмущений, которые могут влиять на поведение защиты.

Предложена архитектура системы адаптивной токовой защиты и схема адаптивного алгоритма.

Библиографический список

1. **Шарыгин, М.В.**, Куликов А.Л., Петров А.А., Фальков А.А., Желтов Н.А. Метод автоматического расчёта параметров срабатывания токовой релейной защиты распределительных сетей // Электрические станции, 2022. - №10. - С. 43 - 48.
2. **Шарыгин, М.В.**, Куликов А.Л., Петров А.А., Фальков А.А. Перспективная система релейной защиты для цифровых распределительных сетей // Электрические станции, 2022. - №5. - С. 48 - 53.
3. Концепция “цифровая трансформация 2030” [Текст]. - М.: ПАО "Россети", 2018.
4. **Шарыгин, М.В.**, Вуколов В.Ю., Петров А.А. Разработка алгоритма автоматической адаптации параметров срабатывания многомерной интеллектуальной релейной защиты к конфигурации распределительных электрических сетей // Вестник НГИЭИ, 2020. №11 (114). С. 65-78. DOI: 10.24411/2227-9407- 2020-10106.
5. **Илюшин, П.В.** Анализ особенностей выбора устройств РЗА в распределительных сетях с собственными генерирующими объектами небольшой мощности // Электрические станции, 2017. - № 9. - С. 29-34.
6. **Илюшин, П.В.**, Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией // Нижний Новгород, 2019.
7. СТО 34.01-21-004-2019 «Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110-220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ».

M.V. Sharygin¹, A.M. Alshaheri¹, A.S. Jeryo²

GENERAL PRINCIPLE OF CONSTRUCTING AN ALGORITHM FOR ADAPTIVE OVERCURRENT PROTECTION OF 6-35 KV DISTRIBUTION NETWORKS

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia¹

Abstract. Distribution networks 6-35 kV are developing towards smart grids with increasing penetration of distributed generation (DG), migrating load, complex topology and modes, the introduction of active network control and isolated operating modes from the main power grid. These changes affect fault current levels, fault current paths, and may interfere with the proper operation of the overcurrent protection system.

The article describes an algorithm for formalizing the setting area of overcurrent digital relay protection, presents an adaptive overcurrent protection system that automatically changes the protection settings of all overcurrent protection relays when the network topology and its modes change. The technology uses a communication system based on the IEC61850 standard.

Key words: electrical distribution networks, distributed generation (DG), microgrid, adaptive protection, automatic calculation of settings, IEC61850, intelligent electronic device (IED), information network, simulation modeling, reconfigurable electrical network.

References

- [1] Sharygin, M.V., Kulikov A.L., Petrov A.A., Falkov A.A., Zheltov N.A. Method for automatic calculation of operation parameters of overcurrent relay protection of distribution networks // Electric stations, 2022. - No.10. - P. 43 - 48. (in Russian)
- [2] Sharygin, M.V., Kulikov A.L., Petrov A.A., Falkov A.A. Perspective relay protection system for digital distribution networks // Electric stations, 2022. - No.5. - P. 48 - 53. (in Russian)
- [3] Concept of “digital transformation 2030” [Text]. - M.: PJSC "Rosseti", 2018. (in Russian)
- [4] Sharygin, M.V., Vukolov V.Yu., Petrov A.A. Development of an algorithm for automatic adaptation of the operation parameters of multidimensional intelligent relay protection to the configuration of electrical distribution networks // Vestnik NGIEI, 2020. No.11 (114). pp. 65-78. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10106. (in Russian)
- [5] Ilyushin, P.V., Analysis of the features of choosing relay protection and automation devices in distribution networks with their own generating facilities of small power // Electric Stations, 2017. - No.9. - P. 29-34. (in Russian)
- [6] Ilyushin, P.V., Kulikov A.L. Automatic control of normal and emergency modes of energy districts with distributed generation // Nizhny Novgorod, 2019. (in Russian)
- [7] STO 34.01-21-004-2019 “Digital feeding center. Requirements for the technological design of digital substations with a voltage of 110-220 kV and node digital substations with a voltage of 35 kV.” (in Russian)

Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

УДК 621.311.1

А.Ф. Аккад, Е.Н. Соснина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ *D-STATCOM* НА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ВИЭ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), имеющие стохастический и нелинейный характер электрогенерации, все шире внедряются в распределительные электрические сети 0,4–10 кВ систем электроснабжения потребителей. Применение *D-STATCOM* позволяет снизить гармонические составляющие тока и колебания напряжения в электрической сети с ВИЭ. Однако *D-STATCOM* с традиционными ПИ-регуляторами имеет медленный отклик на динамические возмущения в сложных нелинейных системах с ВИЭ. Повысить эффективность *D-STATCOM* позволяет регулятор на основе нечеткой логики. Разработан алгоритм управления, сочетающий экспертную нечеткую логику Мамдани для регулирования напряжения и нечеткий регулятор Сугено для регулирования тока при широтно-импульсной модуляции. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на *MATLAB*-модели участка электрической сети с ВИЭ и *D-STATCOM* для различных режимов работы, подтвердили эффективность применения нечеткой логики для управления *D-STATCOM*.

Ключевые слова: распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, *D-STATCOM*, нечеткая логика.

Экономический кризис в Сирийской Арабской Республике (снижение добычи нефти с 386 (2011 г.) до 15 тыс. баррелей в сутки (2023 г.)) привел к снижению производства электроэнергии с 50 до 17 млрд кВт-ч в 2023 г. [1, 2]. В то же время потенциал возобновляемой солнечной и ветровой энергии в Сирии велик и Министерство электроэнергетики Сирии разработало стратегический план развития возобновляемой энергетики до 2030 г. [3].

Как известно, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) имеют стохастический характер вырабатываемой электроэнергии, что вызывает колебания мощности, а следовательно, тока и напряжения в сети. Инверторы, с помощью которых установки ВИЭ интегрируются в распределительные электрические сети низкого и среднего напряжения систем электроснабжения потребителей, являются источниками гармонических составляющих тока [4, 5], генерируемых при широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Проблему высших гармоник и колебаний напряжения позволяет решить распределенный статический синхронный компенсатор *D-STATCOM*

(*Distribution static synchronous compensator*). Это регулятор напряжения на полупроводниковых силовых элементах, его относят к устройствам *FACTS* второго поколения [6]. *D-STATCOM* предназначен для повышения качества электроэнергии и используется в распределительных сетях среднего или низкого напряжения вблизи потребителя.

Элементами *D-STATCOM* являются автономный инвертор напряжения, звено постоянного тока, *LC*-фильтр, трансформатор связи и система управления. Для управления *D-STATCOM* широко используются временные методы: *p-q*-метод (основан на теории мгновенной мощности); *SDM*-метод (следающей синхронизации); *d-q* метод (основан на математических преобразованиях Кларк и Парка) [7]. Чаще всего они опираются на традиционные ПИ или ПИД регуляторы благодаря простоте реализации. Однако ПИ-регуляторы могут плохо работать в сложных, нелинейных системах [8, 9] с ВИЭ. Известно, традиционный ПИ-регулятор характеризуется медленным откликом в нелинейных системах (при внезапных изменениях параметров сети). Настройка параметров (K_p , K_i) в системах управления такого типа может оказаться сложной задачей [10, 11]. Для повышения быстродействия *D-STATCOM* необходимы мощные контроллеры, совместимые с нелинейными динамическими изменениями.

По сравнению с традиционным ПИ-регулятором регулятор на нечеткой логике не требует математической модели, а следовательно, имеет лучшую реакцию и быстрое время отклика и подходит для работы с нелинейными системами [12–14]. Нечеткая логика представляет собой математический инструмент для работы с неопределенностью. Предлагается для управления *D-STATCOM*, подключаемого к распределительным сетям с ВИЭ, разработать алгоритм на основе алгоритмов нечеткой логики Мамдани (широко распространен для сбора экспертных знаний) и Сугено (хорошо работает с оптимизационными и адаптивными методами) [15–17].

Цель исследований – повышение эффективности *D-STATCOM* на основе алгоритма, построенного на нечеткой логике, обеспечивающего быстрый отклик устройства на возмущения в электрической сети от ВИЭ.

Для достижения поставленной цели разработаны имитационные компьютерные модели низковольтной распределительной сети (380 В, 50 Гц) с ВИЭ и *D-STATCOM*, ПИ-регулятора на основе *p-q*-метода; регулятора на основе нечеткой логики для регулирования напряжения (метод Мамдани) и тока (метод Сугено) [15–17]. Разработанные модели позволяют провести сравнение качества электроэнергии при возмущениях от ВИЭ в распределительной электрической сети без устройства регулирования, с *D-STATCOM* на основе ПИ-регулятора и с *D-STATCOM* на основе регулятора на нечеткой логике. Возмущениями являются искажения тока от инвертора солнечной станции и колебания напряжения от ветроэнергетической установки (ВЭУ), вызванные изменением скорости ветра.

На рис. 1 показана структурная схема и *MATLAB*-модель распределительной электрической сети (РЭС) с ВИЭ, нагрузкой и *D-STATCOM*.

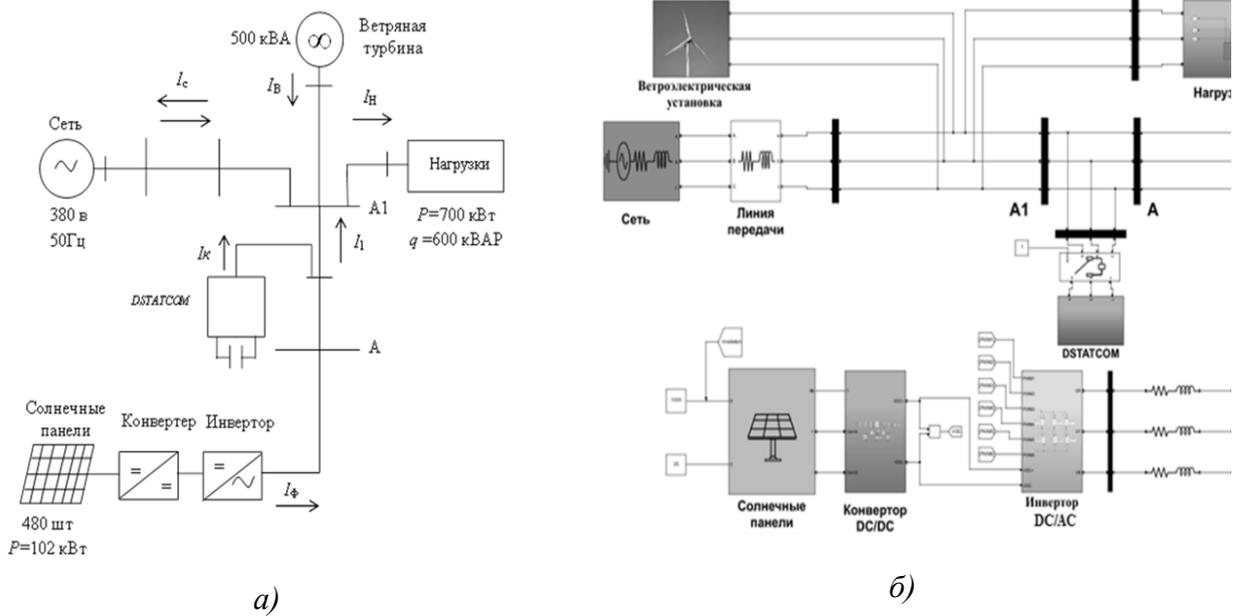


Рис. 1. РЭС с ВИЭ и *D-STATCOM*: а – структурная схема; б – *MATLAB*-модель

Разработан алгоритм управления *D-STATCOM* на основе *p-q*-метода для регулирования напряжения и тока, а также алгоритм, использующий принципы нечёткой логики Мамдани (для регулирования напряжения) и Сугено (для регулирования тока). Имитационные компьютерные модели ПИ-регулятора напряжения и тока, модели управления *D-STATCOM* с контроллерами на нечеткой логике представлены в [18].

На рис. 2 представлена *MATLAB*-модель Мамдани. Здесь входная лингвистическая переменная – напряжение, выходная – реактивная мощность (PM).

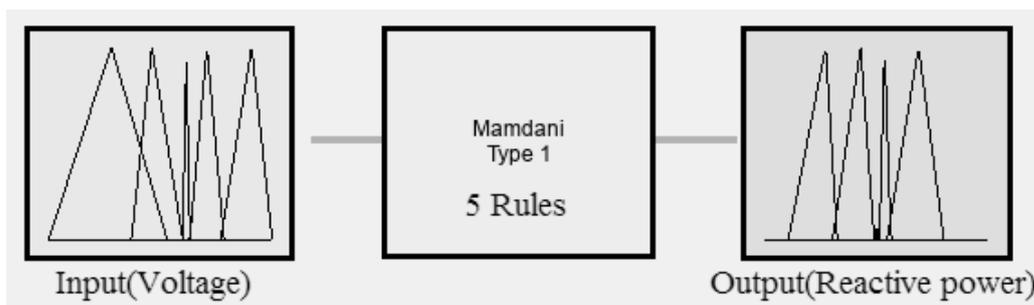


Рис. 2. *MATLAB*-модель нечеткой логики Мамдани

Лингвистические правила управления переменной «напряжение» оперируют терминами: *DB* – большое снижение напряжения; *DS* – небольшое снижение; *Z* – нормальное напряжение (не требуется изменение реактивной мощности); *SS* – небольшое превышение напряжения; *SB* – большое превышение.

Термины лингвистической переменной «реактивная мощность»: *IB* – большая генерация PM; *IS* – небольшая генерация PM; *Z* – PM не генерируется и не потребляется; *AS* – небольшое потребление PM; *AB* – большое потребление PM.

На рис. 3 показаны нечеткие подмножества лингвистической переменной регулятора (Мамдани).

Нечеткие правила регулирования напряжения: если напряжение DB , то реактивная мощность IB ; если DS , то $PM\ IS$; если напряжение Z , то $PM\ Z$; если напряжение SS , то $PM\ AS$; если SB , то $PM\ AB$.

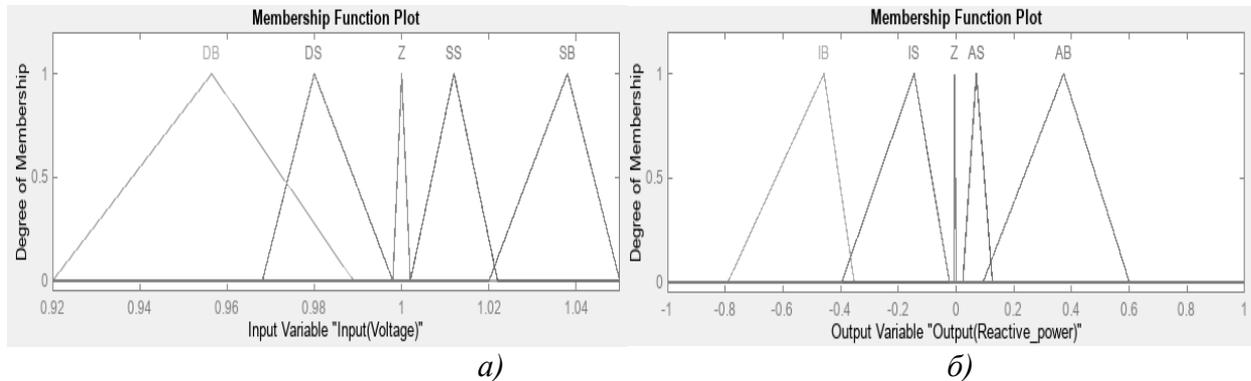


Рис. 3. Нечеткие подмножества лингвистической переменной: a – вход (напряжение); b – выход (реактивная мощность)

Алгоритм Сугено используется для сравнения измеренного и эталонного токов. На рис. 4 показана *MATLAB*-модель Сугено (входные и выходные данные).

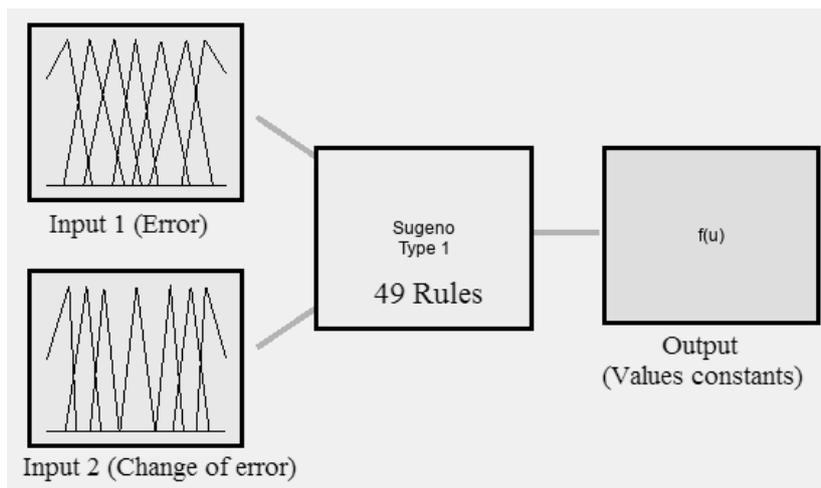


Рис. 4. *MATLAB*-модель нечеткой логики Сугено

Регулятор на основе нечеткой логики Сугено состоит из двух входов (ошибка и изменение ошибки) и одного выхода (постоянные значения).

Для регулирования тока составлены 49 правил нечеткой логики. Термины для лингвистических переменных «Ошибка» и «Изменение ошибки»: NL – большой отрицательный; NM – средний отрицательный; NS – небольшой отрицательный; Z – нуль; PS – небольшой положительный; PM – средний положительный; PL – большой положительный.

На рис. 5 показаны нечеткие подмножества лингвистической переменной регулятора Сугено.

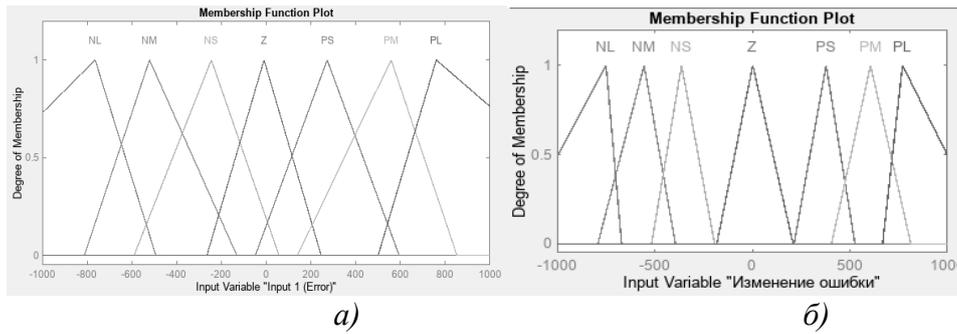


Рис. 5. Нечеткие подмножества лингвистической переменной: а – вход (ошибка); б – выход (изменение ошибки)

В табл. 1. приведены значения выходных постоянных параметров регулятора.

Таблица 1

Выходные постоянные значения параметров

Термин	Тип	Параметры
<i>NL</i>	постоянный	-150
<i>NM</i>	постоянный	-110
<i>NS</i>	постоянный	-75
<i>Z</i>	постоянный	0
<i>PS</i>	постоянный	75
<i>PM</i>	постоянный	110
<i>PL</i>	постоянный	150

Нечеткие правила для регулирования тока приведены в табл. 2.

Таблица 2

Нечеткие правила для регулирования тока (База правил 7×7)

Вход 2	Вход 1						
	<i>NL</i>	<i>CO</i>	<i>NL</i>	<i>H</i>	<i>NL</i>	<i>СП</i>	<i>NL</i>
<i>NL</i>							
<i>NM</i>	<i>NL</i>	<i>NM</i>	<i>NL</i>	<i>NM</i>	<i>NL</i>	<i>NM</i>	<i>NL</i>
<i>NS</i>	<i>NL</i>	<i>NS</i>	<i>NL</i>	<i>NS</i>	<i>NL</i>	<i>NS</i>	<i>NL</i>
<i>Z</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>NM</i>	<i>Z</i>	<i>NM</i>
<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>
<i>PM</i>	<i>NS</i>	<i>PM</i>	<i>NS</i>	<i>PM</i>	<i>NS</i>	<i>PM</i>	<i>NS</i>
<i>PL</i>	<i>Z</i>	<i>PL</i>	<i>Z</i>	<i>PL</i>	<i>Z</i>	<i>PL</i>	<i>Z</i>

С использованием разработанных *MATLAB*-моделей проведены исследования режимов работы распределительной электрической сети с ВИЭ при увеличении, уменьшении и резком изменении скорости ветра. Эксперименты были проведены для трех вариантов: 1) без *D-STATCOM*; 2) с *D-STATCOM* и традиционным ПИ-регулятором; 3) с *D-STATCOM* и регулятором на основе нечеткой логики.

Разработанный алгоритм сравнивался с традиционным алгоритмом на основе ПИ-регулятора по эффективности снижения *D-STATCOM* колебаний напряжения от ВЭУ и гармоник тока от фотоэлектрической установки.

Эксперименты были проведены при различном характере изменения скорости ветра (рис. 6).

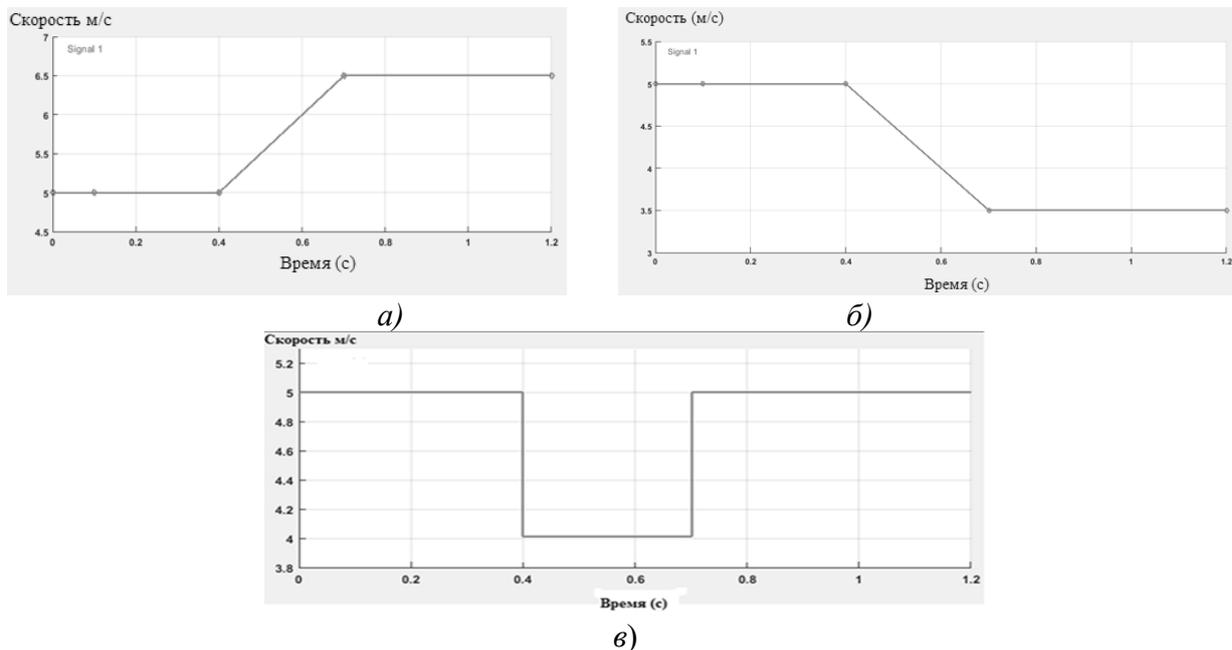


Рис. 6. Изменение скорости ветра: а – увеличение с 5 до 6,5 м/с (режим 1); б – снижение с 5 до 3,5 м/с (режим 2); в – скачком (режим 3)

В табл. 3 приведены результаты сравнения показателей качества электроэнергии при моделировании нерегулируемой электрической сети, с *D-STATCOM* на основе ПИ-регулятора и с *D-STATCOM* на основе регулятора на нечеткой логике.

. Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований

Режимы изменения скорости ветра	Быстрое изменение напряжения ΔU , %			Суммарный коэф-т гармонических составляющих тока THD_i , %		
	Без <i>D-STATCOM</i>	ПИ-регулятор	Нечеткая логика	Без <i>D-STATCOM</i>	ПИ-регулятор	Нечеткая логика
1) с 5 до 6,5 м/с	9,54	3,50	3,32	-1,13	-0,72	-0,66
2) с 5 до 3,5 м/с	9,12	2,15	1,94	3,4	2,10	1,97
3) 5–4–5 м/с	9,30	3,60	2,93	2,56	1,72	1,44

Результаты проведенных исследований (табл. 3) показывают, что использование контроллера на нечеткой логике повышает эффективность *D-STATCOM* в распределительных электрических сетях с ВИЭ на 16–18 % в случае скачкообразного изменения скорости ветра, способствуя улучшению показателей качества электроэнергии, поставляемой потребителям.

Выводы. Основное преимущество регулятора на нечеткой логике – это простота и наглядность формирования правил управления объектом.

Разработка алгоритмов управления на основе искусственного интеллекта (нечеткой логики) позволяют повысить эффективность *D-STATCOM* за счет сокращения времени отклика и обеспечения качества электроэнергии, поставляемой потребителям из ВИЭ.

Библиографический список

1. Добыча нефти в Сирии, Агентство Спутник, [Электронный ресурс]. – URL: <http://sarabic.ae> (дата обращения 29.06.2024).
2. Производство электроэнергии в Сирии, Сирийское Арабское Информационное Агентство (*SANA*) [Электронный ресурс]. – URL: <https://sana.sy/?p=1810134> (дата обращения 29.06.2024).
3. Стратегия возобновляемой энергетики, Министерство электроэнергетики Сирии [Электронный ресурс]. – URL: <http://moe.gov.sy/news/details/242> (дата обращения 30.06.2024).
4. **Вагин, Г.Я.** и др. Системы электроснабжения. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. – 462 с.
5. **Phannil N., Jettanasen C., Ngaopitakkul A.** Power quality analysis of grid connected solar power inverter //2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia). – IEEE, 2017. – С. 1508–1513.
6. **Gómez M.** et al. FACTS Devices in Distributed Generation //RE&PQJ. – 2006. – Т. 4. – № 1.
7. **Бурлака, В.В.,** Поднебенная С.К., Дьяченко М.Д. Обзор методов управления активными фильтрами //Електромеханічні І енергозберігаючі системи. – 2011. – №. 1. – С. 51-54.
8. **Sreekumar T., Jiji K.S.** Comparison of Proportional-Integral (PI) and Integral-Proportional (IP) controllers for speed control in vector controlled induction Motor drive //2012 2nd International conference on power, control and embedded systems. – IEEE, 2012. – С. 1-6.
9. **Akkad A. F., Erdili N., Sosnina E.** Application of a Fuzzy Logic Controller in a D-STATCOM in an Electrical Network with Distributed Generation //2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – IEEE, 2023. – С. 650-654.
10. **Aamir M.** On replacing PID controller with ANN controller for DC motor position control //arXiv preprint arXiv:1312.0148. – 2013.
11. **Akbar M. A.** et al. Simulation of fuzzy logic control for DC servo motor using Arduino based on MATLAB/Simulink //2014 International Conference on Intelligent Autonomous Agents, Networks and Systems. – IEEE, 2014. – С. 42-46.
12. EDC M. T., Bareilly M. Comparative Analysis of PI, PID and Fuzzy Logic Controllers for Speed Control of DC Motor.
13. **Aliyya J., Arif Y. C., Qudsi O. A.** Performance Comparison of PI Control and Fuzzy Logic for Speed Control of DC Shunt Motor Using Matlab/Simulink //JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering). – 2020. – Т. 4. – №. 2.
14. **Kumar S., Nagpal P.** Comparative Analysis of P, PI, PID and Fuzzy Logic Controller for Tank Water Level Control System //International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2017. – Т. 4. – №. 4. – С. 1174-1177.
15. **Precup R. E.** et al. Optimal tuning of interval type-2 fuzzy controllers for nonlinear servo systems using Slime Mould Algorithm //International Journal of Systems Science. – 2023. – Т. 54. – №. 15. – С. 2941-2956.
16. **Rehman A.** et al. Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic Approach of PID Controller //Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. IJRASET. – 2022. – Т. 10.
17. **Feizollahzade O.** An Overview of Fuzzy Inference Algorithms //International Journal of Smart Electrical Engineering. – 2020. – Т. 9. – №. 04. – С. 165-167.

18. Аккад, А.Ф. и др. Исследование эффективности применения *D-STATCOM* с регулятором на нечеткой логике // В сб.: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XIV Всерос. научно-техн. конф. –Чебоксары, 2024. – С. 14-16.

A.F. Akkad, E.N. Sosnina

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF DSTATCOM ON FUZZY LOGIC IN AN ELECTRICAL NETWORK WITH RES

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

Abstract. Renewable energy sources (RES), having a stochastic and nonlinear nature of electric generation, are increasingly being introduced into the 0.4–10 kV distribution electric networks of power supply systems for consumers. The use of D-STATCOM enable to reduce the harmonic components of current and voltage fluctuations in an electric network with RES. However, D-STATCOM with traditional PI regulators has a slow response to dynamic disturbances in complex nonlinear systems with renewable energy sources. The fuzzy logic-based controller allows you to increase the D-STATCOM efficiency. A control algorithm has been developed that combines Mamdani's expert fuzzy logic for voltage regulation and Sugeno's fuzzy controller for current regulation with pulse width modulation. The results of experimental studies carried out on a MATLAB model of an electric grid section with RES and D-STATCOM for various operating modes confirmed the effectiveness of using fuzzy logic to control D-STATCOM.

Key words: distributed generation, renewable energy sources, D-STATCOM, artificial intelligence, fuzzy logic.

References

- [1] Oil Production in Syria, Sputnik Agency, [Electronic resource]. - URL: <http://sarabic.ae> (accessed on 29.06.2024).
- [2] Electricity Production in Syria, Syrian Arab News Agency (SANA) [Electronic resource]. - URL: <https://sana.sy/?p=1810134> (accessed on 29.06.2024).
- [3] Renewable Energy Strategy, Ministry of Electricity of Syria [Electronic resource]. - URL: <http://moe.gov.sy/news/details/242> (accessed on 30.06.2024).
- [4] Vagin G.Ya. et al. Power supply systems. - N. Novgorod: NSTU named after R.E. Alekseev, 2019. - 462 p.
- [5] Phannil N., Jettanasen C., Ngaopitakkul A. Power quality analysis of grid connected solar power inverter //2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia). – IEEE, 2017. – p. 1508–1513.
- [6] Gómez M. et al. FACTS Devices in Distributed Generation //RE&PQJ. – 2006. – Т. 4. – № 1.
- [7] Burlaka, V.V.; Podnebennaia, S.K.; Dyachenko, M.D. Review of control methods for active filters (in Russian) // Electromechanical and energy saving systems. - 2011. - №. 1. - p. 51-54.
- [8] Sreekumar T., Jiji K.S. Comparison of Proportional-Integral (PI) and Integral-Proportional (IP) controllers for speed control in vector-controlled induction Motor drive //2012 2nd International conference on power, control and embedded systems. – IEEE, 2012. – p. 1-6.
- [9] Akkad A. F., Erdili N., Sosnina E. Application of a Fuzzy Logic Controller in a D-STATCOM in an Electrical Network with Distributed Generation //2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – IEEE, 2023. – p. 650-654.
- [10] Aamir M. On replacing PID controller with ANN controller for DC motor position control //arXiv preprint arXiv:1312.0148. – 2013.
- [11] Akbar M. A. et al. Simulation of fuzzy logic control for DC servo motor using Arduino based on MATLAB/Simulink //2014 International Conference on Intelligent Autonomous Agents, Networks and Systems. – IEEE, 2014. – p. 42-46.

-
- [12] EDC M. T., Bareilly M. Comparative Analysis of PI, PID and Fuzzy Logic Controllers for Speed Control of DC Motor.
- [13] Aliyya J., Arif Y. C., Qudsi O. A. Performance Comparison of PI Control and Fuzzy Logic for Speed Control of DC Shunt Motor Using Matlab/Simulink //JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering). – 2020. – Т. 4. – №. 2.
- [14] Kumar S., Nagpal P. Comparative Analysis of P, PI, PID and Fuzzy Logic Controller for Tank Water Level Control System //International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2017. – Т. 4. – №. 4. – С. 1174-1177.
- [15] Precup R. E. et al. Optimal tuning of interval type-2 fuzzy controllers for nonlinear servo systems using Slime Mould Algorithm //International Journal of Systems Science. – 2023. – Т. 54. – №. 15. – С. 2941-2956.
- [16] Rehman A. et al. Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic Approach of PID Controller //Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol. IJRASET. – 2022. – Т. 10.
- [17] Feizollahzade O. An Overview of Fuzzy Inference Algorithms //International Journal of Smart Electrical Engineering. – 2020. – Т. 9. – №. 04. – p. 165-167.
- [18] Akkad A.F. et al. Investigation of D-STATCOM application efficiency with fuzzy logic regulator // In Vb.: Information technologies in electrical engineering and electric power engineering. Proceedings of XIV All-Russian Scientific and Technical Conf. - Cheboksary, 2024. - p. 14-16.

УДК 621.3

П.А. Алешин, А.В. Серебряков, Н.А. Серебряков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГООБМОТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье разработаны графики зависимости коэффициента увеличения интенсивности отказов от коэффициента нагрузки и относительной частоты вращения для двигателя внутреннего сгорания и синхронного генератора. Рассчитана средняя наработка на отказ для дизель-генераторной установки переменной скорости вращения вала ДВС и для дизель-генераторной установки постоянной скорости вращения.

Ключевые слова: дизель-генераторная установка, прогнозирование технического состояния, наработка на отказ, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов.

При разработке новых технологических решений структур дизель-генераторных установок переменной скорости вращения вала ДВС (ДГПСВ), а также отдельных элементов, одним из основных шагов является анализ надежности, поиск неисправностей и прогнозирование технического состояния. Данные параметры позволяют заблаговременно предотвратить отказы. Отказ установки влечет за собой серьезные экономические потери, например капитальный ремонт элементов [1]. Для предотвращения подобных потерь необходимо на этапе разработки нового устройства уделить особое внимание надежности, которая закладывается в результате таких факторов как: выбор элементной базы и анализ конструктивных и схемных решений.

В основе анализа надежности элементов и установки в целом используется экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы [2]. При этом важной процедурой является расчет средней наработки на отказ. Данная величина является обратной величине интенсивности отказов, которая определяется как:

$$\lambda = \alpha \cdot \lambda_0, \quad (1)$$

где α – коэффициент увеличения интенсивности отказов, λ_0 – исходная интенсивность отказов.

Исходная величина интенсивности отказов элементов λ_0 выбирается исходя из экспертных оценок. На основе математических моделей прогнозирования интенсивности отказов выбираются коэффициенты увеличения интенсивности отказов α элементов дизель-генераторных установок постоянной скорости вращения вала ДВС и дизель-генераторных установок переменной скорости вращения вала ДВС.

Интенсивность отказов автономной электростанции, состоящей из m элементов, определяется как сумма интенсивностей отказов этих элементов [3]:

$$\lambda_c = \sum m \cdot \lambda_{ii}, \quad (2)$$

где $ii = 1$.

ДГПСВ содержит более сложное устройство, а значит, и большее количество элементов по сравнению с дизель-генераторной установкой постоянной скорости вращения вала ДВС. Учитывая этот факт, можно предположить, что ДГУ постоянной скорости вращения вала ДВС будут иметь более высокие показатели надежности по сравнению с ДГПСВ. Из-за того, что ДГПСВ является малоисследованными, имеет смысл провести анализ надежности и сравнить эти показатели с данными ДГУ постоянной скорости вращения вала ДВС.

Задачей прогнозирования является предсказание технического состояния в некоторый будущий момент времени. Техническое состояние во многом зависит от изменения физических и химических свойств элементов объекта \bar{X} , также техническое состояние зависит от внешних и внутренних помех \bar{Y} (рис.1).

Исследуются совокупности $\{x_l, l = 1, 2, \dots, n\}$ прогнозирующих параметров объекта (\bar{X}), то есть параметров, позволяющих прогнозировать техническое состояние объекта в будущем, они в свою очередь зависят от параметра \bar{X} . Помехи \bar{Y} оказывают влияние на значения прогнозирующих параметров [4].

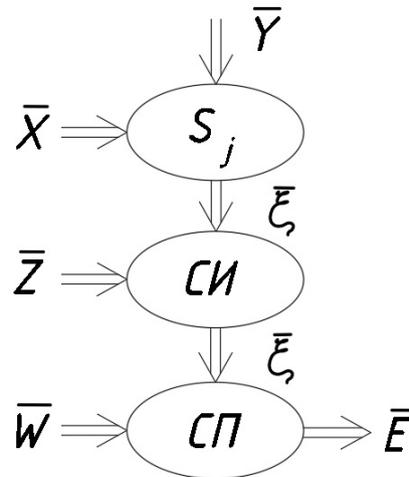


Рис. 1. Однолинейная схема системы прогнозирования: где СИ - средства измерения; СП - средства прогнозирования

При помощи погрешности параметра \bar{Z} определяются прогнозирующие параметры. Помимо этого, на прогнозирующие факторы также оказывают влияние погрешности прогнозирования (\bar{W}). В итоге, прогнозируемое техническое состояние объекта имеет следующую зависимость:

$$\bar{E} = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{W}). \quad (3)$$

Зависимость (3) представляет собой модель процесса прогнозирования. Данная зависимость по большей части носит вероятностных характер, потому что параметры $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{W}$ – по большому счету случайные функции. Определить

эту зависимость (3) в аналитической форме практически невозможно. Для упрощения задачи следует разделить ее на две задачи прогнозирования: задачу измерения прогнозирующих параметров (4) и задачу получения результата прогнозирования (5):

$$\bar{\xi}_l^* = \varphi_l(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}), l = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

$$\bar{E} = \psi(\bar{\xi}^*, \bar{W}). \quad (5)$$

Данное решение задачи также является трудновыполнимым, поэтому наиболее реализуемым вариантом является аналитическая модель, из которой исключена зависимость от случайных помех (6):

$$\bar{E} = f_x(\bar{W}). \quad (6)$$

Модель (6) определяют через зависимость (3) путем измерения прогнозируемых параметров, которые в течение времени, под действием параметра \bar{X} , подвергаются изменениям, далее через зависимость (3), экстраполируя значения прогнозируемых параметров на прогнозные временные периоды.

Прогнозирование состояния ДГПСВ возможно на основе расчета состояния основных элементов: ДВС, синхронного генератора.

Прогнозирования интенсивности отказов двигателя внутреннего сгорания (ДВС)

Работоспособность ДВС определяется с помощью таких параметров как расход топлива и мощность на валу ДВС. В свою очередь на эти параметры влияет состояние таких систем ДВС как система подачи воздуха, система подачи топлива, механизм газораспределения и состояние поршневой группы. Интенсивность отказов ДВС определяется следующей функцией:

$$\lambda(t) = \frac{\varpi_T}{1 - P_T(t)}, \quad (7)$$

где ϖ_T – плотность вероятности отказов, $P_T(t)$ – гарантированное значение вероятности безотказной работы.

Данная функция характеризует частоту появления отказов. Возрастание интенсивности отказов при росте пробега свидетельствует о наличии процессов старения и изнашивания установки, а уменьшение интенсивности отказов – о наличии дефектов производства [5].

При помощи постепенных отказов возможно определить износ двигателя внутреннего сгорания. Основными параметрами отказов ДВС являются: износ ресурсных состояний, накопление усталостных повреждений в деталях, изменение механических свойств элементов конструкции. ДВС определяется интенсивностью трения поверхностей деталей в подвижных соединениях. Таким образом, при снижении частоты вращения вала ДВС срок службы должен увеличиться.

На этапе расчета надежности ДВС учет реальных значений мощности нагрузки производится с помощью коэффициента увеличения интенсивности отказов α_D , значения которого соответствовали различным значениям коэффициента нагрузки K_H , который определяется отношением текущего значения мощности

нагрузки к ее номинальному значению. Относительная частота вращения ω определяется по графику (рис. 2), который построен на основе экспертных оценок.

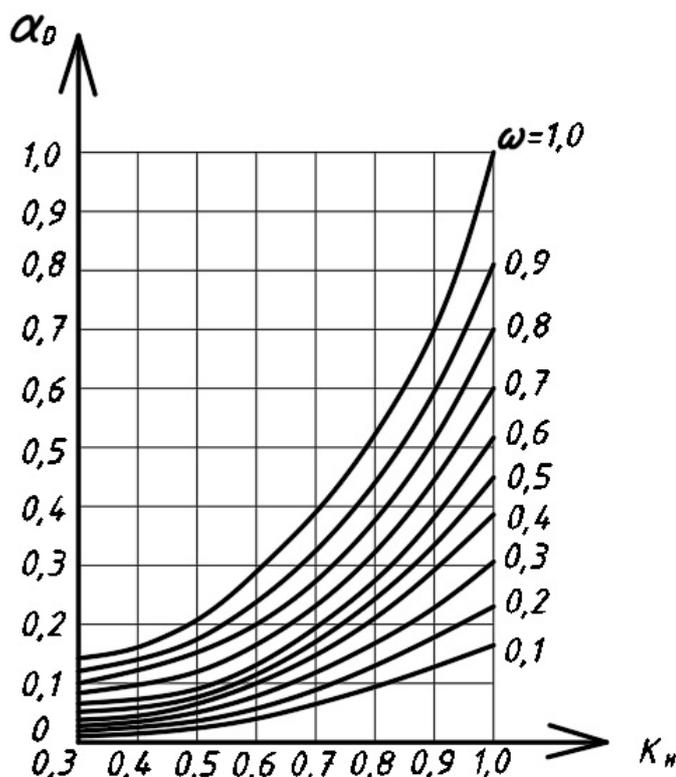


Рис. 2. Зависимость коэффициента увеличения интенсивности отказов α_D ДВС от коэффициента нагрузки K_H и относительной частоты вращения ω

Прогнозирование интенсивности отказов многообмоточного синхронного генератора (СГ).

Электрические машины являются наименее надежными элементами автономной электростанции. Основными причинами низкой надежности данных элементов являются сложность конструкции и тяжелые рабочие режимы. К основным причинам выхода из строя электрических машин относят: повреждение обмоток, в основном межвитковые короткие замыкания, износ или загрязнение щеточно-коллекторного узла и др. Синхронный генератор специального типа обладает меньшей надежностью по сравнению с серийными электрическими машинами. В первую очередь данный факт объясняется сложностью конструкции и намоткой обмоток [6].

Учет реальных электрических нагрузок при расчете надежности синхронного генератора производится с помощью коэффициента увеличения интенсивности отказов α_G , значения которого соответствуют различным значениям коэффициента нагрузки K_H , определяемого как отношение текущего значения мощности нагрузки к ее номинальному значению. Относительная частота вращения ω определяется по графику (рис. 3), который построен на основе экспертных оценок.

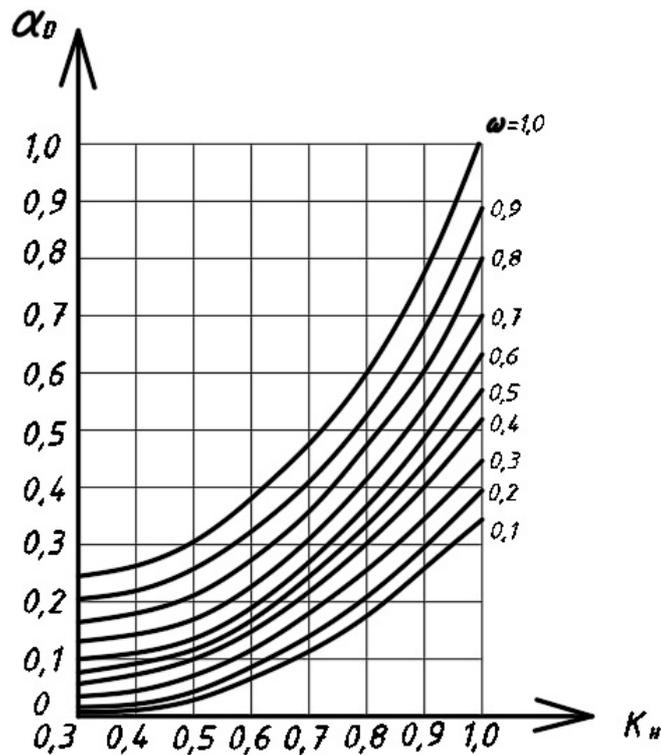


Рис. 3. Зависимость коэффициента увеличения интенсивности отказов α_G СГ от коэффициента нагрузки K_H и относительной частоты вращения ω

Оценка средней наработки на отказ дизель-генераторных установок на основе многообмоточного синхронного генератора

Исходная интенсивность отказов λ_0 элементов отбиралась при анализе надежности ДГПСВ. Коэффициенты увеличения интенсивности отказов α основных элементов ДГУ постоянной частоты вращения и ДГПСВ на основе многообмоточного синхронного генератора высчитывались при помощи математических моделей прогнозирования интенсивности отказов. Учитывалось, что t окружающей среды 20°C , t нагрева силовых полупроводниковых элементов $+60^\circ\text{C}$ [7].

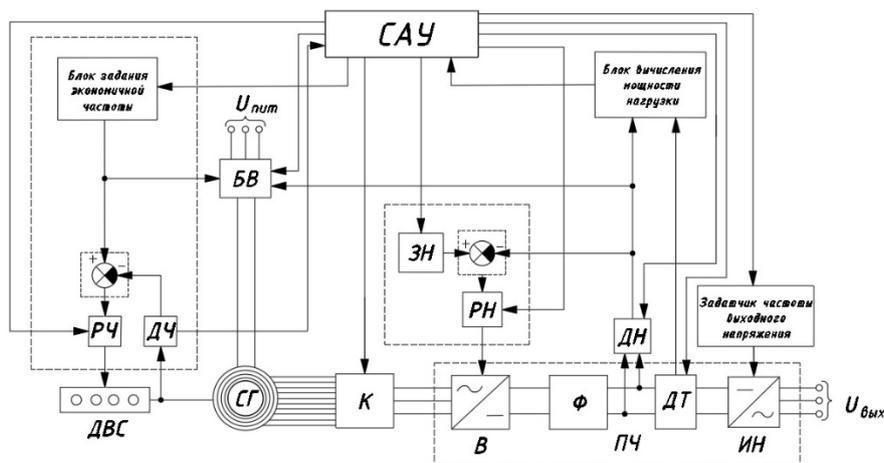


Рис. 4. Структурная схема дизель-генераторной установки переменной скорости вращения

Анализ надежности дизель-генераторных установок на основе многообмоточного синхронного генератора проводился в соответствии со структурной схемой (рис.4). Рассчитанные показатели надежности приведены в табл.2.

Таблица 1

Показатели надежности дизель-генераторных установок на основе многообмоточного синхронного генератора

Элемент схемы	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	α	$\lambda \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$
двигатель внутреннего сгорания	60,00	0,25	15,00
синхронный генератор специального типа	40,00	0,35	14,00
Коммутатор	5,00	0,30	1,50
управляемый выпрямитель	7,00	1,00	7,00
фильтр (конденсаторная батарея)	5,00	1,00	5,00
датчик тока	2,00	1,00	2,00
инвертор напряжения	10,00	1,00	10,00
регулятор частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания	3,00	1,00	3,00
датчик частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания	2,00	1,00	2,00
задатчик экономичного режима	5,00	1,00	5,00
блок возбуждения синхронного генератора	5,00	1,00	5,00
задатчик напряжения	2,00	1,00	2,00
регулятор напряжения	3,00	1,00	3,00
датчик напряжения	2,00	1,00	2,00
блок вычисления мощности нагрузки	3,00	1,00	3,00
задатчик частоты выходного напряжения	2,00	1,00	2,00

В результате расчетов получены данные по наработке на отказ дизель-генераторных установок на основе многообмоточного синхронного генератора. Средняя наработка на отказ составляет 12270 часов.

Для сравнения показателей различных дизель-генераторных установок можно провести анализ надежности ДГУ постоянной частоты вращения по аналогичной методике.

Таблица 2

Показатели надежности ДГУ постоянной частоты вращения

Элемент схемы	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	α	$\lambda \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$
двигатель внутреннего сгорания	60,00	0,40	24,00
синхронный генератор	40,00	0,49	19,60
блок возбуждения синхронного генератора	5,00	1,00	5,00
регулятор напряжения	3,00	1,00	3,00
регулятор частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания	3,00	1,00	3,00

В результате расчетов получены данные по наработке на отказ дизель-генераторных установок постоянной частоты вращения. Средняя наработка на отказ составляет 18315 часов, что практически в полтора раза превышает нара-

ботку на отказ дизель-генераторных установок на основе многообмоточного синхронного генератора.

При помощи систем диагностирования появляется возможность отследить динамику изменения полученных данных, а также технические параметры объекта. Наличие данных, отражающих динамику изменения прогнозируемых факторов, а также параметры интенсивности отказов элементов технической системы, предоставляет возможность эмпирически определить критерий годности в момент, когда система достигнет предельного значения.

С помощью прогнозирования технических неисправностей можно значительно уменьшить затраты на капитальный и аварийный ремонт электротехнических установок. При помощи графиков зависимости коэффициента увеличения интенсивности отказов от коэффициента нагрузки и относительной частоты вращения можно определить оптимальный режим работы отдельных элементов установки.

В результате расчетов средней наработки на отказ получили, что у ДГПСВ наработка на отказ практически в полтора раза меньше, чем у ДГУ постоянной скорости вращения вала ДВС, это может быть связано с более сложным конструктивным исполнением и большим количеством элементов у ДГПСВ, однако, использование данного типа установок позволяет существенно повысить КПД и уменьшить количество используемого топлива в установках данного типа [8]. В дальнейшем планируется верификация математической модели с помощью имитационной.

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

Библиографический список

1. **Рукин, М.В.** Методика определения наработки на отказ установки электроцентробежного насоса / М.В. Рукин, В.А. Молчанова, К.Р. Уразаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. 219–229.
2. **Верзаков, Г.Ф.** Введение в техническую диагностику / Г.Ф. Верзаков, Н.В. Киншт, В.И. Рабинович, Л.С. Тимонен. - М.: Энергия, 1968. – 224 с.
3. **Патент** на полезную модель RU 168615 U1, МНК H02P 9/48 (2006.1). Автономная электростанция переменного тока/А.Б. Дарьенков, С.А. Гузев// Заявл. №2016118233 от 11.05.2016; опубл. 13.02.2017. Бюл. №5.
4. **Дарьенков, А.Б.** Автономные дизель-генераторные установки переменной частоты вращения: монография / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Нижегород. Гос. Техн. Ун-т им. Р.Е. Алексеева – Нижний Новгород, 2023. – 283 с.
5. **Авдеев З.И.** Исследования показателей комплексной надежности ДВС / З.И. Авдеев, Е. В. Бадрудинова, К.А. Кучув // Вестник ДГТУ. Технические науки. №13, 2007 – с. 48-57
6. **Беллуян З.А.** Ускоренные испытания на надежность обмоток статора и ротора синхронных генераторов / З.А. Беллуян. // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 2 - с. 142-144

7. **Кочеганов Д.М.** Структура энергоэффективной ветро-дизельной энергетической установки переменной скорости вращения / Интеллектуальная электротехника / Кочеганов Д.М., Стеглов А.С., Серебряков А.В. - 2019 г. № 2. с. 42-52.
8. **Серебряков, А.В.** Разработка структурной схемы дизель-генераторной установки переменной скорости вращения на основе многообмоточного синхронного генератора / Аleshин П.А., Серебряков А.В., Серебряков Н.А. // Федоровские чтения 2023 – 2023 – с. 383-389.

P.A. Aleshin, A.V. Serebryakov, N.A. Serebryakov

FORECASTING THE TECHNICAL CONDITION OF A DIESEL GENERATOR VARIABLE SPEED INSTALLATIONS BASED ON A MULTI-WINDING SYNCHRONOUS GENERATOR

Nizhny Novgorod State Technical University named after. R.E. Alekseeva

Abstract: The article develops graphs of the dependence of the failure rate increase factor on the load factor and relative rotation speed for an internal combustion engine and a synchronous generator. The mean time between failures was calculated for a diesel generator set with variable rotation speed of the internal combustion engine shaft and for a diesel generator set with constant rotation speed

Key words: diesel generator set, technical condition forecasting, time between failures, average time between failures, failure rate.

References

- [1] Rukin, M.V. Methodology for determining the time between failures of an electric centrifugal pump installation / M.V. Rukin, V.A. Molchanova, K.R. Urazakov // News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2022. T. 333. No. 12. 219–229.
- [2] Verzakov, G.F. Introduction to technical diagnostics / G.F. Verzakov, N.V. Kinsht, V.I. Rabonovich, L.S. Timonen. - M.: Energiya, 1968. – 224 p.
- [3] Patent for the description of a utility model RU 168615 U1, MNK N02R 9/48 (2006.1). Autonomous AC power plant/A.B. Darienkov, S.A. Guzev // Application. No. 2016118233 dated 05/11/2016; publ. 02/13/2017. Bull. No. 5.
- [4] Darienkov, A.B. Autonomous diesel generator sets with variable rotation speed: monograph / A.B. Darienkov, O.S. Khvatov // Nizhny Novgorod. State Tech. Univ. R.E. Alekseeva – Nizhny Novgorod, 2023. – 283 p.
- [5] Avdeev Z.I. Research of indicators of complex reliability of internal combustion engines / Z.I. Adeev, E.V. Badrudinova, K.A. Kuchuv // Bulletin of DSTU. Technical science. No. 13, 2007 – p. 48-57
- [6] Belluyan Z.A. Accelerated reliability tests of stator and rotor windings of synchronous generators / Z.A. Belluyan. // News of Tomsk Polytechnic University. 2004. T. 307. No. 2 - p. 142-144
- [7] Kocheganov D.M. Structure of an energy-efficient wind-diesel power plant with variable rotation speed / Intelligent electrical engineering / Kocheganov D.M., Steklov A.S., Serebryakov A.V. - 2019 No. 2. p. 42-52.
- [8] Serebryakov, A.V. Development of a block diagram of a variable speed diesel generator set based on a multi-winding synchronous generator / Aleshin P.A., Serebryakov A.V., Serebryakov N.A. // Fedorov Readings 2023 – 2023 – p. 383-389.

УДК 621.311

И.Д. Георгиевский

О РОЛИ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВЕТРОВЫХ И СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ РОСТЕ ИХ ДОЛИ В СТРУКТУРЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Аннотация. В статье представлен обзор международного и отечественного опыта разработки и внедрения систем краткосрочного и оперативного прогнозирования выработки электроэнергии, основанных на использовании различных методов моделирования погоды. Представлены результаты анализа международного опыта в части учёта ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций в балансах мощности на сутки вперёд. Для ряда европейских стран приведены средние ошибки прогнозирования выработки электроэнергии ВЭС и СЭС на сутки и 6 часов вперёд.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, гибкость, ветровая электростанция, солнечная электростанция, прогнозирование выработки электроэнергии, оперативное прогнозирование, краткосрочное прогнозирование

Введение

В России к 2035 году планируется ввести в эксплуатацию ветровые (ВЭС) и солнечные (СЭС) электростанции общей установленной мощностью более 12 ГВт. Рост доли ВЭС и СЭС в структуре генерирующих мощностей отрицательно влияет на устойчивость функционирования и режимы работы энергосистем. Из-за отсутствия у ВЭС и СЭС гарантированной мощности и средств стабилизации выработки электроэнергии в энергосистемах возникают мгновенные небалансы активной мощности, которые могут сопровождаться отключениями генерирующих установок и потребителей электроэнергии [1].

Масштабная интеграция ВЭС и СЭС в энергосистемы должна сопровождаться реализацией компенсационных организационно-технических мероприятий, направленных на повышение гибкости энергосистем и улучшения управляемости их режимами. Точное прогнозирование мощности объектов ВИЭ на сутки вперёд (краткосрочное прогнозирование) и ближайшие шесть часов (оперативное прогнозирование) способствует снижению амплитуды отклонений активной мощности, вырабатываемой такими электростанциями, и позволяет оптимизировать объёмы резервов мощности на традиционных электростанциях.

Целью исследования является обзор методов моделирования погоды, анализ опыта внедрения систем краткосрочного и оперативного прогнозирования выработки электроэнергии ВЭС и СЭС и получаемых эффектов в различных странах с целью разработки методики определения предельной мощности ВЭС

и СЭС в энергосистемах России и технико-экономического обоснования внедрения набора компенсационных мероприятий.

Классификация методов прогнозирования выработки электроэнергии

Методы прогнозирования вырабатываемой мощности электростанциями на основе ВИЭ можно классифицировать на три основных типа: физические, статистические и комбинированные модели [2].

Физический подход основан на преобразования результатов прогнозирования поступления первичного энергоресурса в мощность ВЭС (СЭС), с учётом их технических характеристик. В таких моделях в качестве исходных данных часто используются данные численного прогнозирования погоды (ЧПП). ЧПП прогнозирует состояние атмосферы путём численного решения нелинейных дифференциальных уравнений на основе данных, поступающих с метеостанций, метеозондов и метеоспутников. Физические модели эффективны при оперативном и краткосрочном прогнозировании с пространственным разрешением от 0,1 км², однако они требуют значительных вычислительных ресурсов и наличия метеоданных, что делает их дорогостоящими.

Статистические модели, напротив, опираются на анализ массивов ретроспективных данных ЧПП, измерений мощности ВЭС и СЭС, а также данных о поступлении первичного ресурса. Эти модели описывают взаимосвязь между поступлением возобновляемого ресурса и мощностью ВЭС и СЭС. Они эффективны при оперативном и краткосрочном прогнозировании с пространственным разрешением 0,001–60 км², используют меньшее количество входных параметров и требуют меньших вычислительных ресурсов. Однако с увеличением горизонта прогнозирования и недостаточным объёмом исторических данных точность таких моделей существенно снижается [3].

Комбинированные модели предназначены для достижения оптимальных результатов в различных условиях эксплуатации. Эти модели объединяют преимущества физических и статистических подходов, используя элементы искусственного интеллекта и различные измерительные инструменты.

Прогнозирование выработки электроэнергии ВЭС

Краткосрочное прогнозирование

Краткосрочное прогнозирование является ключевым для первоначального распределения доступных ресурсов ВИЭ и ценообразования на рынке электроэнергии на сутки вперёд. Большинство систем прогнозирования энергии ветра на сутки вперёд используют модели, основанные на данных ЧПП, с применением физических моделей ветроэлектрических установок, которые учитывают особенности местности, где расположена ВЭС. Эти модели могут быть дополнены сложными статистическими алгоритмами и данными о измерениях мощности на ВЭС. Обычно временное разрешение таких прогнозов составляет 1 час.

В среднем 50% электроэнергии в энергосистеме Дании вырабатывается объектами ВИЭ, причём основная часть приходится именно на ВЭС. Датский системный оператор использует автономную систему прогнозирования и си-

стему прогнозирования в режиме реального времени. Автономная система прогнозирования основана на ретроспективных данных различных ЧПП и сравнивает среднюю скорость ветра за прошедшие 3-6 месяцев с выработкой ВЭС для 25 ветровых зон на территории Дании. В результате обучения объединяются выходные данные различных моделей ЧПП и определяется комбинация, показывающая наилучшие результаты прогнозирования. Прогнозирующий модуль преобразует полученные при прогнозировании скорости ветра в мощность, выдаваемую ВЭС, учитывая параметры ветроэлектрических установок.

Прогнозирование в режиме реального времени объединяет автономный прогноз с данными мощности ВЭС с дискретностью 5 минут. Такой подход позволяет оценить отклонения прогноза в каждой ветровой зоне и уменьшить ошибку в будущих прогнозах. В период с 2015 по 2021 годы средняя ошибка прогнозирования мощности ВЭС находилась в диапазоне 3,7–13,2% от общей установленной мощности ВЭС в Дании [4].

Оперативное прогнозирование

Сбор данных и вычисление моделей прогнозирования, основанных на данных ЧПП, занимает от 3 до 6 часов. Это делает такие модели неэффективными для оперативного прогнозирования из-за высокой погрешности результатов. Прогнозирование на временной горизонт до 6 часов обычно основывается на статистических методах. Временное разрешение оперативных прогнозов, как правило, составляет 15 минут.

Дополнение статистических моделей данными измерения мощности ВЭС и поступления ветрового ресурса на площадках электростанций в режиме реального времени, а также использование различных инструментов наблюдения приземного воздушного слоя, позволяет значительно повысить точность прогнозирования на горизонте до 6 часов.

Прогнозирование выработки электроэнергии СЭС

Краткосрочное прогнозирование

Общепринятыми методами для прогнозирования мощности СЭС, как и для прогнозирования мощности ВЭС, на сутки вперед являются методы, основанные на моделях ЧПП.

Одной из наиболее известных моделей ЧПП является глобальная интегрированная система прогнозирования (IFS), разработанная Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Эта модель используется для составления детерминированных прогнозов с высоким разрешением (шаг равен 1 часу; пространственное разрешение – 9 км) на временной горизонт до 10 дней.

Помимо глобальных моделей многие страны используют региональные модели прогнозирования, которые обеспечивают более высокое пространственно-временное разрешение. Например, венгерская национальная метеорологическая служба применяет мезомасштабную модель прогнозирования AROME, которая предоставляет прогнозы с горизонтом до 48 часов и пространственно-временным разрешением 2,5 км и 15 минут.

Оперативное прогнозирование

Для прогнозирования прихода солнечной радиации на 6 часов вперёд эффективно применение статистических методов с добавлением данных с наземных камер обзора неба, пиранометров и систем спутникового наблюдения за облаками [5]. Комбинирование этих инструментов с данными ЧПП демонстрирует наилучшую точность прогнозирования. На рис. 1 представлена диаграмма пространственно-временного распределения методов прогнозирования мощности СЭС, где 1 – статистические методы; 2 – методы численного прогнозирования погоды; 3 – спутниковое зондирование; 4 – анализ снимков неба.

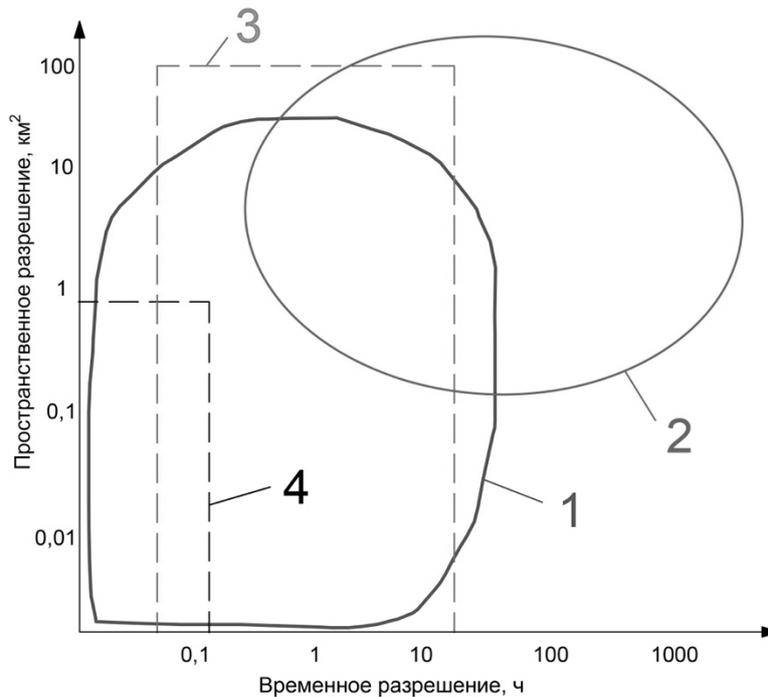


Рис. 1. Диаграмма пространственно-временного распределения методов прогнозирования мощности СЭС

Изображения, полученные с геостационарного метеорологического спутника, позволяют определять векторы движения облаков. Прогнозы прихода солнечной радиации осуществляются путём сравнения последних снимков неба, получаемых с шагом 15 минут, и составления экстраполированных изображений индекса облачности. В отличие от наземных камер обзора неба спутниковые снимки позволяют наблюдать за движением облаков на большей географической территории, что улучшает прогнозирование мощности СЭС на более длительном временном горизонте.

При прогнозировании на оперативном горизонте полезно применять метод пространственной корреляции, который включает обмен данными о приходе первичного ресурса или вырабатываемой мощности между соседними электростанциями на основе ВИЭ. Зная направление движения облаков (ветра) и отклонение от прогноза выработки на одной из СЭС (ВЭС) в регионе, можно спрогнозировать дисбаланс мощности в данном регионе на ближайшие часы работы энергосистемы.

Сравнение точности прогнозирования мощности отдельной СЭС установленной мощностью 100 МВт и сети СЭС установленной мощностью 64,5 ГВт, проведенное в работе [6], показало, что для отдельной СЭС нормализованная среднеквадратичная ошибка прогноза выработки на сутки и час вперед составила 22% и 17% соответственно, тогда как для сети СЭС эти ошибки равны 4% и 2%.

В табл. 1 для ряда европейских стран приведены усредненные значения ошибок оперативного и краткосрочного прогнозирования выработки электроэнергии ВЭС и СЭС в процентах от установленной мощности. Одна из наиболее точных систем краткосрочного и оперативного прогнозирования используется в Германии. Высокая точность прогнозирования в Германии обусловлена наличием большой сети ВЭС и СЭС на обширной территории страны и непрерывным развитием компетенций в данной области науки на протяжении более 10 лет [7].

Таблица 1

Ошибки прогнозирования выработки электроэнергии ВЭС и СЭС

	Германия	Испания	Венгрия
Ошибки прогнозирования для ВЭС, %			
На сутки вперед	4,9-6,5	0,8-4,7	10,3-26,7
На 6 часов вперед	2,4-14,4	2,4-3,0	7,2-27,0
Ошибка прогнозирования для СЭС, %			
На сутки вперед	3,3-3,6	3,6-4,2	3,6-7,1
На 6 часов вперед	2,9	2,9-4,1	3,1-6,9

Заключение

В настоящее время суммарная мощность ВЭС и СЭС в России полностью резервируется за счёт генерирующего оборудования традиционных электростанций, а мощности ВЭС и СЭС не учитываются при формировании диспетчерского графика на сутки вперед.

Международный опыт показывает, что внедрение систем краткосрочного и оперативного прогнозирования выработки электроэнергии ВЭС и СЭС может обеспечить достаточно высокую степень достоверности прогнозов, что является важным инструментом при планировании режимов работы энергосистем.

Результаты исследования будут использованы для корректного учета ошибок прогнозирования выработки электроэнергии ВЭС и СЭС при имитационном моделировании режимов работы энергосистем России. Результаты имитационного моделирования будут служить основой для разработки методики определения предельной мощности ВЭС и СЭС в энергосистемах России и технико-экономического обоснования внедрения набора компенсационных мероприятий.

Библиографический список

1. **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.
2. **Ерошенко, С. А.** Краткосрочное прогнозирование и планирование режимов фотоэлектрических электростанций: дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2020. – 212 с.

3. **Киселева, С. В.**, Лисицкая Н. В., Фрид С. Е. Прогнозирование выработки солнечных станций и фотоэлектрических установок: основные подходы и результативность // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 7-18 (330-341). – С. 24-43.
4. **Zsiboracs H.**, Pinter G., Vincze A., Baranyai N. H. Wind Power Generation Scheduling Accuracy in Europe: An Overview of ENTSO-E Countries // Sustainability. – 2022. – Vol. 14(24). – Iss. 24.
5. **Shepvalova O. V.**, Arbuzov Y. D., Evdokimov V. M., Ilyushin P. V., Suslov K. V. Assessment of the gross, technical and economic potential of region's solar energy for photovoltaic energetics // Energies. – 2023. Vol. 16(3). – 1262.
6. **Pedro H. T. C.**, Coimbra C. F. M. Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs // Solar Energy. – 2017. – Vol. 86. – Iss. 7. – pp. 2017-2028.
7. **Zsiboracs H.**, G. Pinter, A. Vincze, Baranyai N. H. The reliability of photovoltaic power generation scheduling in seventeen European countries // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 260.

I. D. Georgievskiy

**ON THE ROLE OF FORECASTING SYSTEMS FOR ELECTRICITY
GENERATION OF WIND AND SOLAR POWER PLANTS
WITH AN INCREASE IN THEIR SHARE IN THE STRUCTURE
OF GENERATING CAPACITIES**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Abstract. The article provides an overview of international and Russian experience in the development and implementation of systems for very short-term and short-term forecasting of electricity generation based on various methods of weather modeling. The results of the analysis of international experience in accounting for wind power plants (WPP) and photovoltaic power stations (PPS) in the power balances for the day ahead are presented. For a number of European countries, the average forecast errors by predicting the capacity WPP (PPS) for a day and 6 hours ahead are given.

Key words: electric power system, flexibility, wind power plant, photovoltaic power stations, power generation forecasting, operational forecasting, short-term forecasting.

References

- [1] 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)
- [2] Eroshenko S.A. Kratkosrochnoe prognozirovanie i planirovanie rezhimov fotoelek-tricheskih elektrostancij [Short-term forecasting and planning of photovoltaic power plant modes]: dis. ... candidate of Technical Sciences. Novosibirsk, 2020. – 212 p.
- [3] Kiseleva S.V., Lisickaya N.V., Frid S.E. Prognozirovanie vyrabotki solnechnyh stancij i fotoelektricheskikh ustanovok: osnovnye podhody i rezul'tativnost' [Photovoltaic power forecasting: basic approaches and features] // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology], 2020, 7-18 (330-341). – pp. 24-43. (in Russian)
- [4] Zsiboracs H., G. Pinter, A. Vincze, Baranyai N. H. Wind Power Generation Scheduling Accuracy in Europe: An Overview of ENTSO-E Countries // Sustainability, 2022, Vol. 14 (24), Iss. 24.
- [5] Shepovalova O.V., Arbuzov Y.D., Evdokimov V.M., Ilyushin P.V., Suslov K.V. Assessment of the gross, technical and economic potential of region's solar energy for photovoltaic energetics // Energies, 2023, Vol. 16(3), 1262.
- [6] Pedro H.T.C., Coimbra C.F.M. Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs // Solar Energy, 2017, Vol. 86, Iss. 7. – pp. 2017-2028.
- [7] Zsiboracs H., Pinter G., Vincze A., Baranyai N.H. The reliability of photovoltaic power generation scheduling in seventeen European countries // Energy Conversion and Management, 2022, vol. 260.

УДК 621.3

Ал.А. Кралин, Е.В. Крюков, Д.Ю. Титов, Я.И. Петухов, Ан.А. Кралин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО ГЕНЕРАТОРА В COMSOL MULTIPHYSICS

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье представлено исследование линейного генератора на постоянных магнитах в составе конвертора волновой энергии. Усовершенствованы геометрические параметры трехфазного цилиндрического генератора в программном комплексе *COMSOL Multiphysics* с целью повышения эффективности преобразования кинетической энергии морских волн в электроэнергию. В результате исследования были получены оптимальные параметры линейного генератора, которые позволили получить максимальное значение ЭДС на выходе.

Ключевые слова: энергия морских волн, цилиндрический линейный генератор, сеточная модель, двумерное моделирование, *COMSOL Multiphysics*.

Актуальной задачей современного электроэнергетического комплекса является обеспечение выработки электроэнергии с высокими показателями эффективности и экологичности в условиях постепенного сокращения потребления ископаемого топлива. В связи с этим в качестве источника энергии все активнее применяются возобновляемые энергоресурсы, использование которых имеет большой энергетический потенциал. Так, морские волны имеют потенциал в 8000-80000 ТВт·ч в год [1]. Также энергия кинематического движения морской волны обладает сравнительно высокой плотностью [2], что в совокупности делает использование морских волн в качестве источника энергии при производстве электрической энергии перспективным.

Преобразование кинетической энергии волн осуществляется с использованием конверторов волновой энергии. В составе конвертора могут быть использованы различные устройства, непосредственно преобразующие волновую энергию в электрическую. Наиболее простым и эффективным устройством является цилиндрический трехфазный линейный генератор с постоянными магнитами. Он обладает более высоким КПД при использовании сопоставимого количества активных материалов по сравнению с другими преобразователями [3].

В данной работе рассмотрен цилиндрический трехфазный линейный генератор с неодимовыми магнитами в составе конвертора волновой энергии. Целью данного исследования является повышение эффективности преобразования кинетической энергии морских волн в электроэнергию за счет совершенствования геометрических параметров генератора.

В программном обеспечении *COMSOL Multiphysics* разработана модель цилиндрического линейного генератора с неодимовыми магнитами. Модель построена на базе уравнений Максвелла с использованием интерфейса *Magnetic*

Fields, который позволяет рассчитать распределение магнитного поля и векторов магнитной индукции в катушках, проводниках и магнитах. Расчет произведен с использованием метода конечных элементов.

Физический интерфейс *COMSOL Multiphysics* решает уравнения Максвелла, которые сформулированы с использованием векторного магнитного потенциала. Векторный магнитный потенциал A связан с магнитной индукцией через известное соотношение [4,5]:

$$B = \text{rot}A. \quad (1)$$

Модель цилиндрического линейного генератора выполнена как двумерная осесимметричная, для которой справедливо:

$$B = \text{rot}A = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}, \quad (2)$$

где A – векторный магнитный потенциал; A_x, A_y – частные производные векторного потенциала вдоль координат x и y .

Расчет областей вне зависимости от наличия в них тока производится с использованием вектора магнитного потенциала.

Относительно скалярного магнитного потенциала узлов V_m решается объемная задача:

$$H = \text{grad}V_m = \frac{\partial V_m}{\partial x} i + \frac{\partial V_m}{\partial y} j + \frac{\partial V_m}{\partial z} k. \quad (3)$$

Составляющие вектора индукции по осям x и y :

$$B_x = \frac{\partial A_x}{\partial y}; \quad B_y = \frac{\partial A_y}{\partial x}. \quad (4)$$

В соответствии с выражениями (1-4) была разработана сеточная модель линейного генератора, обмотки которого соединены по схеме «звезда». Сеточная модель линейного генератора представлена на рис. 1.

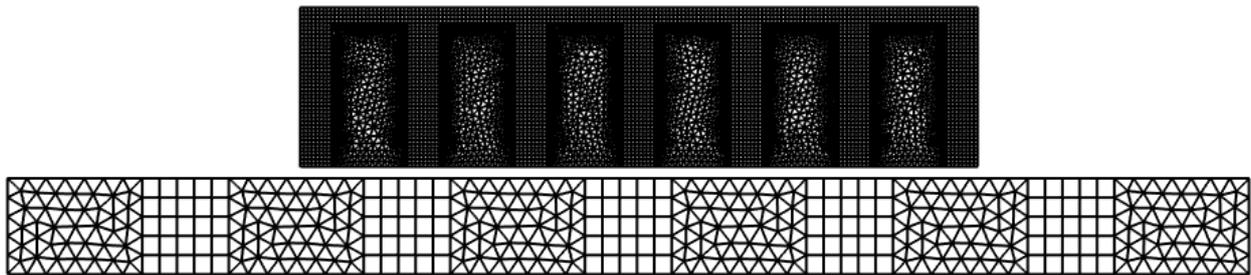


Рис. 1. Сеточная модель линейного генератора

На рис. 2 представлена двумерная структура линейного генератора с неодимовыми магнитами. На рис. 2 приняты следующие обозначения: l_{c1} – длина статора; t_1 – ширина зубца статора; b_1 – ширина паза; h_c – высота спинки статора; $h_{п1}$ – высота паза; δ – величина воздушного зазора; t_2 – ширина немагнитной вставки; b_2 – ширина магнита.

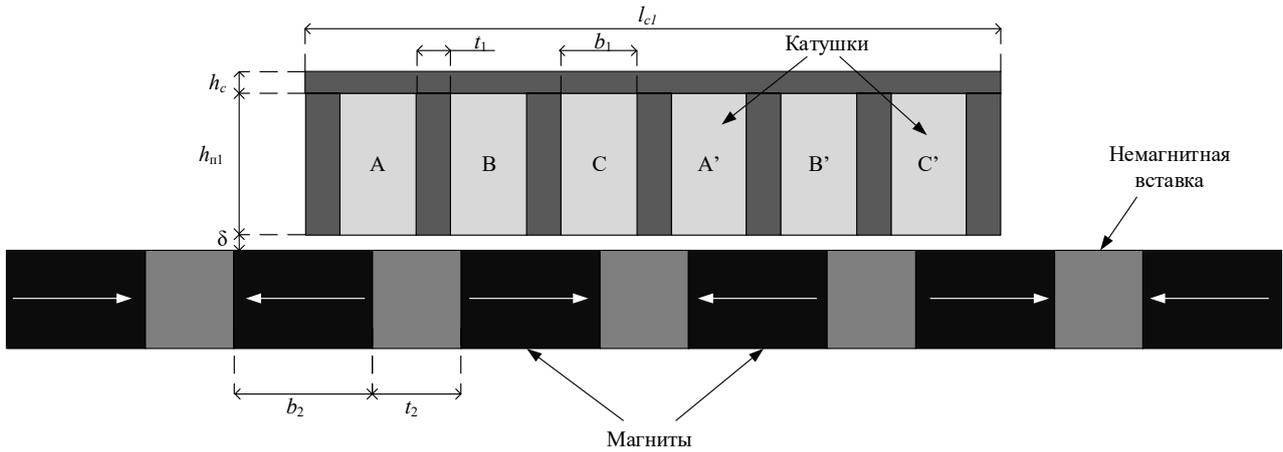


Рис. 2. Двумерная структура линейного генератора

В результате моделирования были получены картины распределения магнитного потока в цилиндрическом линейном генераторе с неодимовыми магнитами при разных геометрических параметрах и расположении магнитов. Установлено, что встречное расположение магнитов эффективнее, чем однонаправленное.

На рис. 3 представлено распределение индукции магнитного поля в линейном генераторе, а на рис. 4 – распределение силовых магнитных линий потока.

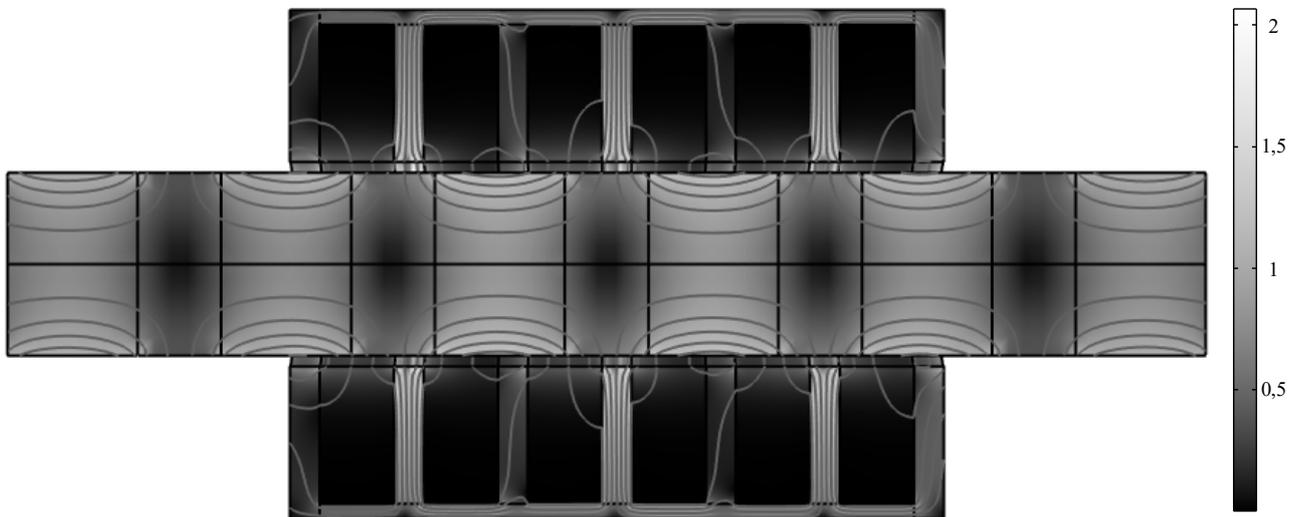


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля в линейном генераторе

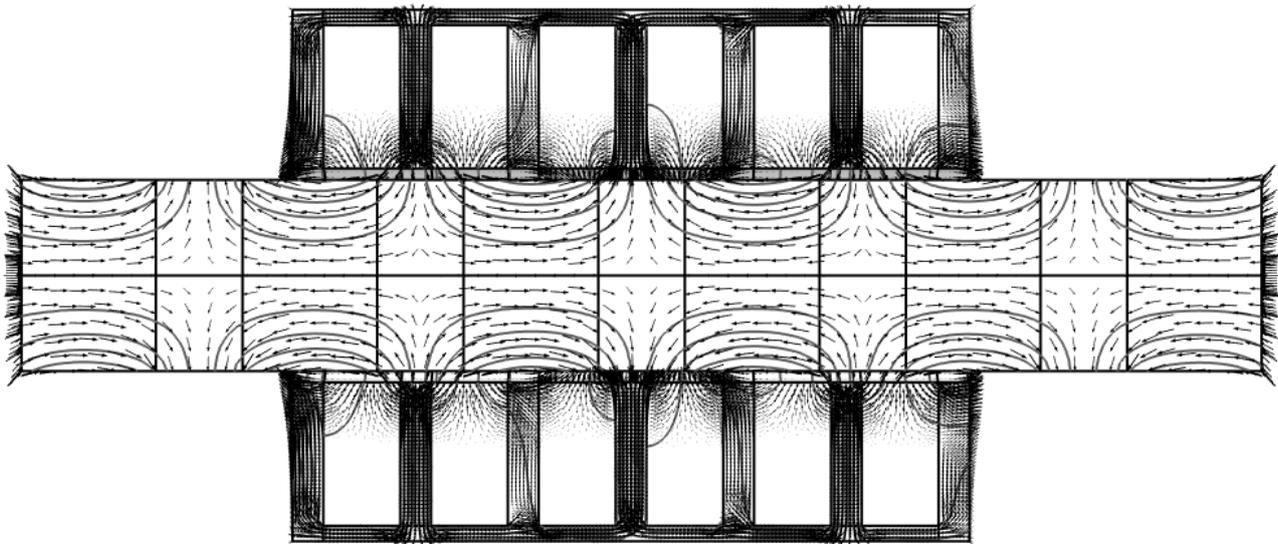


Рис. 4. Распределение магнитных силовых линий потока в линейном генераторе

Для повышения эффективности преобразования кинетической энергии морских волн в электрическую был произведен анализ геометрических параметров линейного генератора. В качестве целевого параметра повышения эффективности принято максимальное значение ЭДС на выходе генератора. Перечень изменяемых геометрических величин представлен на рис. 2.

Для проведения моделирования были приняты следующие условия: индуктор перемещается по синусоидальному закону, частота колебания индуктора составляет 2 Гц, амплитуда перемещения 60 мм. Количество витков в каждой паре катушек составляет 1700.

В результате исследования определены основные геометрические параметры, при которых амплитуда ЭДС генератора максимальна. Данные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные геометрические параметры линейного генератора

Наименование	Значение, мм
Ширина магнита, b_2	40
Диаметр магнита, d_2	50
Воздушный зазор, δ	1
Высота паза, $h_{п1}$	25
Ширина паза, b_1	30
Ширина зубца статора, t_1	8

Для повышения эффективности преобразование морских волн в электроэнергию было проведено исследование сеточной модели цилиндрического линейного генератора с неодимовыми магнитами в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*. В ходе имитационного моделирования определено влияние различных геометрических параметров линейного генератора на амплитуду ЭДС. На основе проведенных исследований установлены оптимальные параметры: ширина магнита, ширина немагнитной вставки, ширина и высота паза, ширина зубца статора.

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

Библиографический список

1. **Cascajo, R., Garcia E., Quiles Cucarella E., Correcher A., Morant F.** Integration of Marine Wave Energy Converters into Seaports: A Case Study in the Port of Valencia // *Energies*. 2019 – 12(5):787.
2. **Veerabhadrapa K., Suhas B.G, Mangrulkar C., Kumar R., Mudakappanavar V.S., Kambalur N., Seetharamu N.** Power Generation Using Ocean Waves: A Review // *Global Transitions Proceedings*. 2022 – 3(6).
3. **Guedes Soares C., Bhattacharjee J., Tello Ruiz M., Pietra L.** Review and classification of wave energy converters. *Maritime Engineering and Technology*. CRC Press. Portugal. 2012.
4. **Копылов, И.П.** Математическое моделирование электрических машин. Высшая школа. Москва. 2001.
5. **Смирнов, А.Ю., Ершова Е.А., Уснунц-Кригер Т.Н.** Применение сеточных моделей при исследовании линейного шагового двигателя для вертикального перемещения регулирующего органа // *Электричество*. 2016. № 11.

Al.A. Kralin, E.V. Kryukov, D.Y. Titov, Y.I. Petukhov, An.A. Kralin

SIMULATION OF A WAVE ENERGY CONVERTER IN COMSOL MULTIPHYSICS

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

Abstract. The article presents a study of a linear permanent magnet generator as part of a wave energy converter. The geometric parameters of a three-phase cylindrical generator have been improved in the COMSOL Multiphysics software package in order to increase the efficiency of converting the kinetic energy of sea waves into electricity. As a result of the study, the optimal parameters of the linear generator were obtained, which made it possible to obtain the maximum value of the EMF at the output.

Key words: cylindrical linear generator, COMSOL Multiphysics, computer simulation.

References

- [1] **Cascajo, R., Garcia E., Quiles Cucarella E., Correcher A., Morant F.** Integration of Marine Wave Energy Converters into Seaports: A Case Study in the Port of Valencia // *Energies*. 2019 – 12(5):787.
- [2] **Veerabhadrapa K., Suhas B.G, Mangrulkar C., Kumar R., Mudakappanavar V.S., Kam-balur N., Seetharamu N.** Power Generation Using Ocean Waves: A Review // *Global Transitions Proceedings*. 2022 – 3(6).
- [3] **Guedes Soares C., Bhattacharjee J., Tello Ruiz M., Pietra L.** Review and classification of wave energy converters. *Maritime Engineering and Technology*. CRC Press. Portugal. 2012.
- [4] **Kopylov I.P.** Mathematical Models of Electric Machines. Vysshaya Shkola. Moscow. 2001 (in Russian).
- [5] **Smirnov A.Yu., Ershova E.A., Usnunts-Krieger T.N.** Application of grid models in the study of a linear stepper motor for vertical movement of a regulatory body. // *Electrichestvo*. 2016. № 11 (in Russian).

УДК 621.311

Д.К. Кугучева, М.С. Харитонов

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕКТОВ МИКРОГЕНЕРАЦИИ НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В статье определены особенности влияния прогнозируемого роста внедрения объектов микрогенерации на показатели качества электроэнергии, связанные с отклонением напряжения и несимметрией напряжений, при различном уровне внедрения объектов микрогенерации и различных способах их подключения. Показано, что с увеличением количества объектов микрогенерации возрастает риск возникновения проблем с показателями качества электроэнергии, что требует разработки технических средств и стратегий управления объектами микрогенерации для работы в условиях функционирования распределительных электрических сетей низкого напряжения в Российской Федерации.

Ключевые слова: микрогенерация, возобновляемые источники энергии, качество электрической энергии, несимметрия напряжений, отклонение напряжения.

Возобновляемые источники энергии являются перспективным направлением развития энергетической отрасли, что подтверждается непрерывным сокращением потребления традиционных углеводородов и ежегодным увеличением доли возобновляемых источников энергии. Прогнозируется, что к 2028 году на долю ВИЭ придется более 42% мирового производства электроэнергии (на 2023 год – 26%) [1].

По итогам 2023 года установленная мощность ВИЭ в России составила около 2,4% (6,12 ГВт) от совокупной мощности всех генерирующих объектов энергосистемы РФ. Прогнозируется, что к 2035 году общая установленная мощность всех объектов ВИЭ-генерации достигнет 17 ГВт [2].

В рамках осуществления энергетического перехода и достижения поставленной Правительством Российской Федерации цели по достижению углеродной нейтральности к 2060 году [3] требуется более интенсивное сокращение выбросов CO₂ за счет увеличения доли ВИЭ-генерации в энергобалансе страны. Согласно [4], бытовой сектор вносит значительный вклад в общее энергопотребление (таблица 1), поэтому одним из направлений достижения углеродной нейтральности всех сфер экономики государства является снижение влияния бытовой нагрузки на энергобаланс путем внедрения собственной генерации на базе ВИЭ (развитие микрогенерации).

Таблица 1

Потребление электроэнергии бытовым сектором в различных регионах РФ, в процентах от общего энергопотребления регионом

Регион	Потребление, %	Регион	Потребление, %
Калининградская область	30,51	Республика Дагестан	41,32
Псковская область	32,62	Чеченская Республика	35,52
Республика Крым	36	Приморский край	29,3
Краснодарский край	28,7	Ивановская область	26,46

Перспективы развития рынка микрогенерации утверждены Распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2021 г. № 3924-р [5]: при реализации проекта "Активный потребитель" планируется увеличение объема рынка микрогенерации до 103,7 тыс. объектов потребителей (более 1 ГВт установленной мощности объектов микрогенерации) к 2030 году.

Массовое внедрение объектов микрогенерации на базе ВИЭ, в частности фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) может привести к ухудшению показателей качества электроэнергии, поскольку внедрение объектов микрогенерации в распределительные электрические сети низкого напряжения в случае превышения производства электроэнергии над потреблением в узле сети приводит к возникновению обратного потока мощности, оказывающего влияние на показатели отклонения напряжения и несимметрии напряжений в трехфазных системах из-за повышения напряжения в фазе сети, к которой подключен объект микрогенерации (рис. 1) [6].

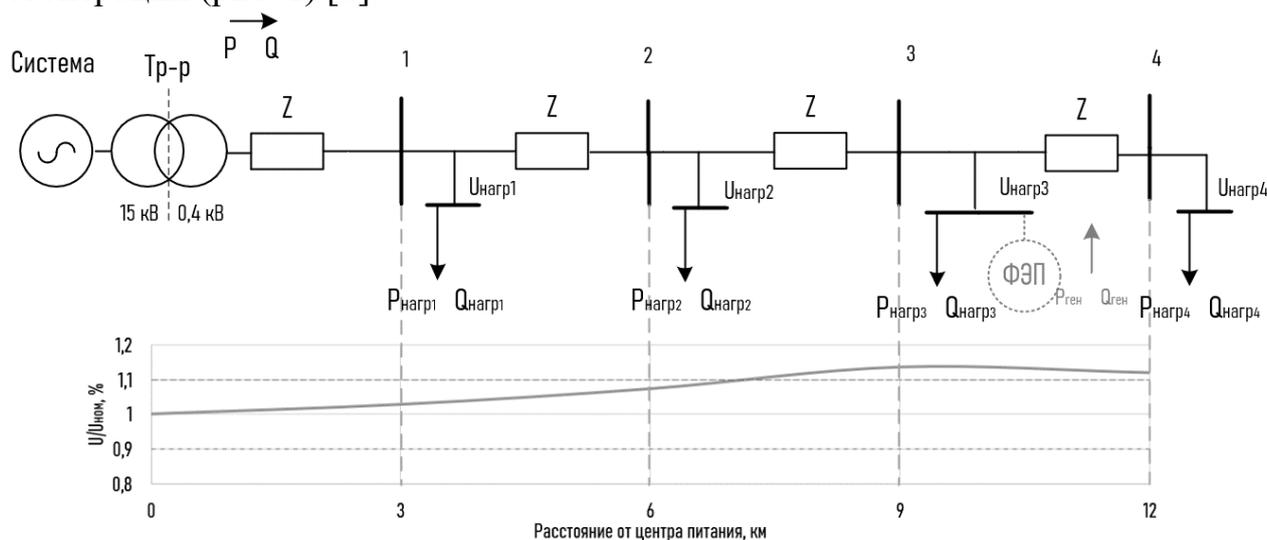


Рис. 1. Схема распределительной электрической сети с объектом микрогенерации и значения напряжения вдоль линии электропередачи при $P_{ген} = 6 \times P_{нг}$

Для определения влияния объектов микрогенерации на параметры качества электроэнергии, связанные с отклонением напряжения и несимметрией

напряжений, выполнена серия вычислительных экспериментов на основе математической модели существующего участка сети 0,4 кВ Калининградской области, обеспечивающей электроснабжение индивидуальных жилых домов на территории поселка сельского типа (рис. 2). Для разработанной модели с учетом расположения домовладений определены точки возможного подключения объектов микрогенерации на базе ФЭП, установленная мощность которых не превышает максимальную присоединенную мощность энергопринимающих устройств. Нагрузки приняты в виде неизменной мощности, т.е. не зависящими от напряжения.

При анализе влияния объектов микрогенерации на несимметрию напряжений рассмотрены различные уровни внедрения генерирующих объектов. В рамках данного исследования уровень внедрения генерирующих объектов PV определяется согласно следующему выражению [7]:

$$PV = \frac{\sum_{n=0}^{n=fact} P_{уст}}{\sum_{n=0}^{n=max} P_{уст}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где в числителе приводится мощность установленных объектов микрогенерации, в знаменателе – мощность максимально возможного числа подключенных объектов микрогенерации

В ходе исследований были рассмотрены сценарии при уровнях внедрения объектов микрогенерации от 10 до 100%. В качестве условий для проведения моделирования по суммарным электрическим нагрузкам и инсоляции приняты данные для 12 мая 2023 года, 14:00 (для каждого домовладения потребление электроэнергии в данный час составило 0,5 кВт*ч, выработка электроэнергии объектом микрогенерации - 3 кВт*ч). уровень напряжения на шинах питающей ТП 15/0,4 кВ принят равным 100% $U_{ном}$.

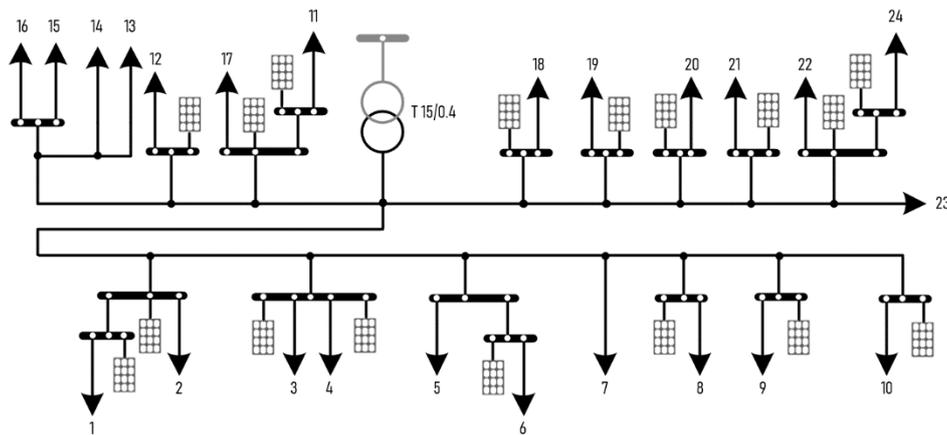


Рис. 2. Модель сети 0,4 кВ с точками возможного подключения объектов микрогенерации

1. Исследование влияния объектов микрогенерации на отклонение напряжения в электрических сетях низкого напряжения

При исследовании влияния на отклонение напряжения объекты микрогенерации в математической модели представлены как трехфазные симметричные источники электроэнергии, домовладения заданы трехфазными симметричными нагрузками. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

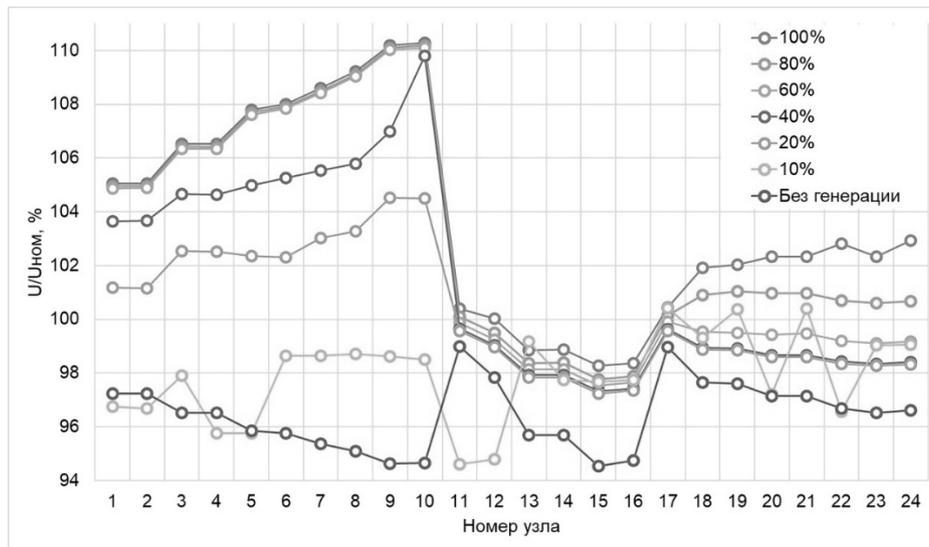


Рис. 3. Уровни напряжения в узлах сети при различном уровне внедрения объектов микрогенерации

Изменение величины напряжения в узлах сети зависит от соотношения между мощностью нагрузки потребителей и мощностью объектов микрогенерации, а также от электрической удаленности объектов микрогенерации от центра питания и параметров фидера. С учетом особенностей сетей низкого напряжения в Российской Федерации, зачастую имеющих высокую протяженность, перспективное увеличение количества объектов микрогенерации способно привести к недопустимому росту уровней напряжения в узлах сети, что требует развития дополнительных технических мер для обеспечения качества электроэнергии.

2. Исследование влияния объектов микрогенерации на несимметрию напряжений в электрических сетях низкого напряжения

При исследовании несимметричных режимов распределение нагрузок по фазам принято с учетом проведенных в работе [8] реальных измерений токовых нагрузок в сетях 0,4 кВ на уровне: фаза А – 20%; В – 20%, С – 60% от общего числа потребителей. Результаты моделирования и расчетов коэффициентов несимметрии по обратной последовательности при внедрении объектов микрогенерации на уровне 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% представлены на рис. 4. Первоначальный коэффициент несимметрии по обратной последовательности для анализируемого участка сети без объектов микрогенерации равен 0,58%.

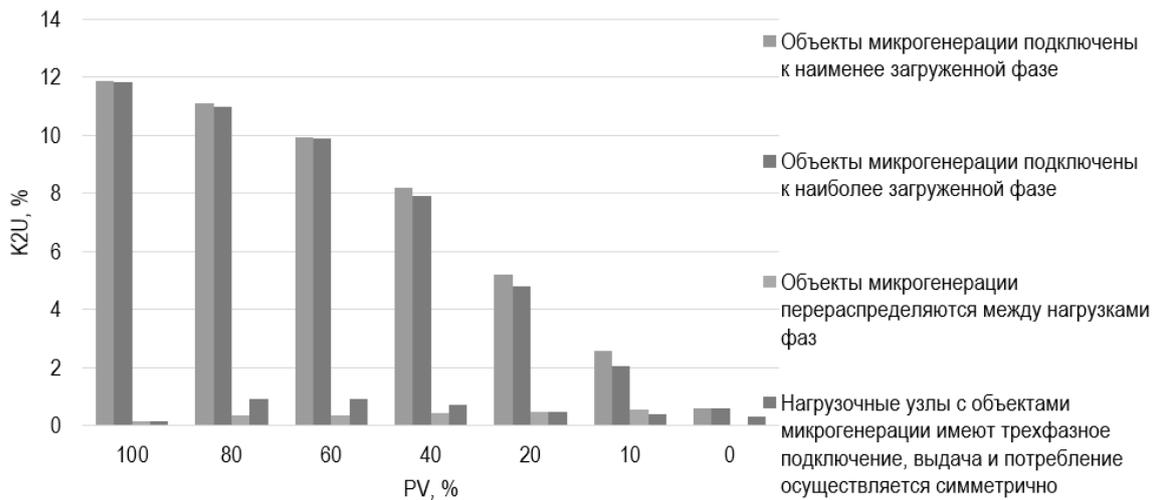


Рис. 4. Результаты расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

При однофазном подключении объектов микрогенерации без применения специализированных устройств симметрирования возможно превышение показателей несимметрии сверх установленных ГОСТ 32144-2013 пределов. В условиях возможного роста числа объектов микрогенерации к числу возможных решений проблемы несимметрии относится перераспределение выдаваемой объектом микрогенерации мощности между фазами.

Библиографический список

1. *Renewables share of total energy supply* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (дата обращения 13.04.2024).
2. *Ежеквартальный информационный обзор рынка ВИЭ в России, IV квартал 2023* [Электронный ресурс]. – URL: https://rreda.ru/upload/iblock/c15/n01k7mw5liiy4aqioy7z9kmbbb2wxn9/202401_RREDA_quarterly_report_q_4_2023.pdf (дата обращения 13.04.2024).
3. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 год. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 3052-р от 29.10.2021.
4. *ЕМИСС. Государственная статистика. Потребление электроэнергии в Российской Федерации* [Электронный ресурс]. – URL: <https://fedstat.ru/indicator/43277> (дата обращения 10.05.2024).
5. Стратегическое направление в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 3954-р от 28.12.2021.
6. Харитонов, М. С. Исследование влияния объектов микрогенерации на уровень напряжения в электрических сетях низкого напряжения / М. С. Харитонов, Д. К. Кугучева // *Электричество. Передача и распределение*. – 2024. – № 1(82). – С. 34-43.
7. **Umoh, V., Davidson, I., Adebisi, A., Ekpe, U.** (2023). Methods and Tools for PV and EV Hosting Capacity Determination in Low Voltage Distribution Networks—A Review. *Energies*, 16, 3609. <https://doi.org/10.3390/en16083609>
8. **Igor Naumov, Dmitriy Karamov, Alexander Tretyakov, Elvira Fedorinova and Marina Yakupova** (2020). Additional electric loss in rural distribution networks 0.38 kV - E3S Web Conf., 209, 07007 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007>

D.K. Kugucheva, M.S. Kharitonov

INFLUENCE OF MICROGENERATION FACILITIES ON SOME INDICATORS OF ELECTRICITY QUALITY IN LOW-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS

Kaliningrad State Technical University

Abstract. The article identifies the features of the influence of the projected growth in the implementation of microgeneration facilities on power quality indicators associated with voltage deviation and voltage asymmetry, at different levels of implementation of microgeneration facilities and different methods of their connection and control. It has been determined that with an increase in the number of microgeneration facilities, the risk of problems with power quality indicators increases, which requires the development of technical means and strategies for managing microgeneration facilities to operate under the operating conditions of low-voltage electrical distribution networks in the Russian Federation.

Key words: microgeneration, renewable energy sources, quality of electrical energy, voltage asymmetry, voltage deviation.

References

- [1] Renewables share of total energy supply [Electronic resource]. - URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (date of address 13.04.2024).
- [2] Quarterly information review of the RES market in Russia, IV quarter 2023 [Electronic resource]. URL: https://rreda.ru/upload/iblock/c15/n01k7mw5liiy4aqioy7z9kmfbbb2wxn9/202401_RREDA_quarterly_report_q_4_2023.pdf (date of address 13.04.2024).
- [3] Strategy of socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions up to 2050. Approved by the order of the Government of the Russian Federation № 3052-r of 29.10.2021.
- [4] EMISS. State statistics. Electricity consumption in the Russian Federation [Electronic resource]. - URL: <https://fedstat.ru/indicator/43277> (date of circulation 10.05.2024).
- [5] Strategic direction in the field of digital transformation of the fuel and energy complex. Approved by the order of the Government of the Russian Federation No. 3954-r of 28.12.2021.
- [6] Kharitonov, M. S. Investigation of the microgeneration objects influence on the voltage level in the low-voltage electric networks / M. S. Kharitonov, D. K. Kugucheva // Electricity. Transmission and distribution. - 2024. - № 1(82). - p. 34-43.
- [7] Umoh, V., Davidson, I., Adebisi, A., Ekpe, U. (2023). Methods and Tools for PV and EV Hosting Capacity Determination in Low Voltage Distribution Networks—A Review. *Energies*, 16, 3609. <https://doi.org/10.3390/en16083609>
- [8] Igor Naumov, Dmitriy Karamov, Alexander Tretyakov, Elvira Fedorinova and Marina Yakupova (2020). Additional electric loss in rural distribution networks 0.38 kV - E3S Web Conf., 209, 07007 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907007>

УДК 621.31

А.А. Лоскутов, А.С. Симанов

ПРИМЕНЕНИЕ СИМПЛЕКС МЕТОДА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНОГО ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Применение гибридных источников электроэнергии является одним из перспективных методов обеспечения эффективного электроснабжения. В условиях отсутствия централизованного электроснабжения, объединение различных источников электроэнергии, таких как ветровые, солнечные, дизельные электростанции может компенсировать недостатки ресурсов. Важным фактором для работы таких источников электроэнергии является обеспечение эффективности использования энергетического потенциала и определение балансного соотношения между используемыми первичными видами электрической энергии. Эффективное использование источников позволяет не только обеспечить бесперебойность потребителя, что особо важно для удалённых регионов, но и снизить экономические затраты. В данной статье рассмотрено применение одного из известных методов решения задач линейного программирования – симплекс метода в контексте экономической оптимизации использования автономного гибридного электроэнергетического комплекса. В ходе исследований был произведён анализ совместного использования источников электроэнергии энергокомплекса, включающего солнечную, ветряную и дизельную электростанции, и проведена оценка эффективности.

Ключевые слова: микроэнергосистема, решение задачи оптимизации, симплекс метод, эффективность использования гибридных источников электроэнергии.

Гибридные энергосистемы набирают широкую популярность в современном мире. Энергосистема такого типа может включать в себя разнотипные источники энергии (дизель-генераторы, когенерационные установки, ветровые и солнечные установки и т. п.), обеспечивающие энергией местных потребителей [1]. Важной задачей является обеспечение подобных комплексов современными интеллектуальными системами управления, которые в перспективе могут быть интегрированы в глобальную систему управления энергетикой. Энергосистема может быть оптимизирована по различным параметрам, таким как экономическая выгода совместного использования источников, прогнозирование производства, эффективное управление батареями и хранилищами энергии [2].

В рамках данной работы рассмотрена оптимизация стоимости использования таких систем, что играет ключевую роль в обеспечении эффективности электроснабжения, экономии ресурсов и финансовой выгоде.

Оптимальное использование доступных ресурсов, таких как ископаемое топливо, солнечная, ветровая энергия и других требует применения различных

подходов, направленных на уменьшение расходов и повышение эффективности системы, опираясь на различную производительность источников, связанную с внешними факторами, такими как погодные условия и нужды потребителей [3].

Иными словами, задача заключается в минимизации затрат при выработке необходимого количества для потребителей электроэнергии путём введения в параллельную работу нескольких источников. Оптимальное использование доступных ресурсов требует разработки интеллектуальных алгоритмов для управления источниками и контроля за ситуацией в энергосистеме в режиме реального времени. В данной работе рассмотрена задача финансовой оптимизации при использовании нескольких типов источников в гибридных электроэнергетических комплексах (ГЭК), сведенная к задачам линейного программирования [4].

Среди множества оптимизационных задач существуют особые задачи из разных областей практики, которые называют задачами линейного программирования (ЛП). Все они характеризуются некоторыми общими чертами. В каждой из них элементы решения представляют собой ряд неотрицательных переменных x_1, x_2, \dots, x_n . Требуется так выбрать значения этих переменных, чтобы:

- 1) выполнялись некоторые ограничения, имеющие вид линейных неравенств или равенств относительно переменных x_1, x_2, \dots, x_n ;
- 2) некоторая линейная функция f тех же переменных обращалась в максимум (минимум).

Различают несколько основных методов решения задач линейного программирования.

Симплекс-метод – один из широко используемых подходов. Суть данного метода заключается в перемещении по вершинам многогранника решений в поисках оптимальной вершины, где целевая функция достигает своего максимального или минимального значения. Математически это представляется в виде системы линейных уравнений и неравенств, которые представляют собой ограничения. Многогранник решений образовывается именно этими ограничениями. [6].

Графический метод – метод, основанный на графическом отображении области допустимых решений на плоскости и нахождения точки, в которой функция будет иметь оптимальное значение. Основной недостаток данного метода заключается в ограничении количества переменных до двух [7].

Метод двойственности отражает принцип двойственности в линейном программировании, который устанавливает соответствие между решаемой задачей и двойственной ей задачей. Решение последней позволит определить решение исходной [8].

Метод ветвей и границ используется для решения целочисленных задач линейного программирования и реализуется путём построения дерева решений и поочерёдного исключения неоптимальных подмножеств [9].

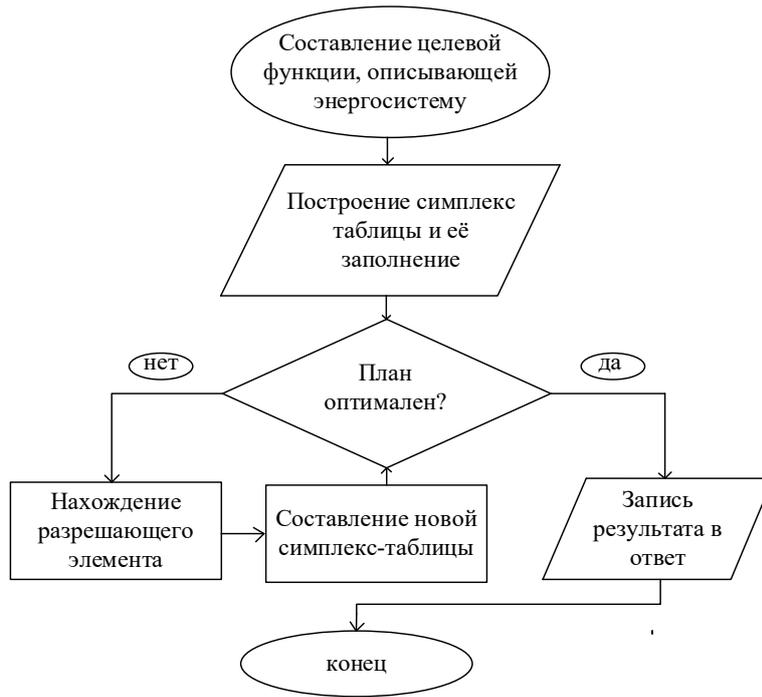


Рис. 1. Принцип применения симплекс метода

Одним из эффективных методов в контексте оптимизационной задачи по использованию гибридной энергосистемы выступает симплекс метод. [10]. На рис. 1 представлена обобщенная блок-схема, описывающая применение симплекс метода.

Решение задачи начинается с построения целевой функции, имеющей вид (1).

$$F(x) = c_1 * x_1 + c_2 * x_2 + \dots + c_n * x_n \rightarrow \min/ \max . \tag{1}$$

На основе системы линейных уравнений формируется начальная симплекс-таблица. В случае если система уравнений не приведена к канонической форме её необходимо привести к таковой, дополнив базисными переменными [11].

Таблица 1

Начальная симплексная таблица

Базис	Б	x_1	x_2	x_3	...	x_n
X_n	b_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1n}
X_{n-1}	b_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2n}
...
X_5	b_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	...	a_{nn}
$F(x_0)$	0	C_1	C_2	C_3	...	C_n

Затем происходит оценка оптимальности решения. Если все коэффициенты в строке целевой функции являются неотрицательными, то данное решение является оптимальным. В противном случае выбирается столбец с наибольшим отрицательным коэффициентом в строке целевой функции. Данный столбец имеет название «ведущий» [12].

Выбор ведущей строки происходит следующим образом: для каждого положительного элемента в ведущем столбце вычисляется отношение правой части уравнения к этому элементу, ведущей становится строка с наименьшим положительным отношением [13]. Ищем элемент, стоящий на пересечении ведущих строки и столбца. Такой элемент называется ведущим элементом. Вместо исключаемой переменной в первом столбце (с названиями базисных переменных), записываем название переменной, которую мы вводим в базис. Далее начинается процесс вычисления нового базисного решения. Он производится с помощью метода Жордана-Гаусса [14]:

$$\text{Новая ведущая строка} = \frac{\text{Старая ведущая строка}}{\text{Ведущий элемент}}.$$

Преобразование такого вида направлено на введение выбранной переменной в базис, т.е. представление ведущего столбца в виде базисного вектора. После этого проверяется условие оптимальности. Если полученное решение неоптимально – повторяется весь алгоритм снова. В конечном результате, когда все элементы целевой функции становятся неотрицательными, алгоритм должен прекратиться и можно сказать, что полученные значения являются оптимальными [15].

Основополагающим критерием для оценки оптимального выбора соотношения выдаваемой мощности от источников является экономический фактор. Однозначно стоимость 1 кВт·ч для потребителя в составе гибридной установки определить достаточно затруднительно [16].

К данному вопросу можно подойти неоднозначно. Поскольку все затраты на обслуживание, ремонт и дополнительные ресурсы (например, на чистку солнечных панелей от пыли и снега), должны быть учтены, достаточно сложно определить однозначную конечную цифру. В ходе расчёта стоимости были учтены обобщённые переменные, захватывающие основные направления затрат. Для удобства расчёт был произведён в относительных единицах (о.е.). Далее перечислены учтенные параметры для определения суточных затрат [17].

1. Амортизация, r_a .
2. Текущий ремонт, r_r .
3. Услуги сторонних организаций, $r_{\text{сторон}}$.
4. Отношение цены установки к заявленному сроку эксплуатации – данный параметр можно оценивать как ежедневную стоимость существования установки, $r_{\text{срок}}$.
5. Заработная плата персонала – в состав данного критерия может входить как заработная плата оперативного персонала, так и штата, производящего чистку, $r_{\text{зп}}$.
6. Среднегодовая эффективность – данный параметр оценивает реальную вырабатываемую энергию источником в течение года, $k_{\text{эффект}}$.
7. Коэффициент, учитывающий соотношение мощности и занимаемой площади электроустановкой, k_s .

Таким образом можно составить выражение (2), оценивающее стоимость 1 кВт·ч.

$$C_{ЭЭ} = (r_a + r_r + r_{\text{сторон}} + r_{\text{срок}} + r_{\text{зп}}) \cdot k_{\text{эффект}} \cdot k_s. \quad (2)$$

В табл. 2 приведены итоговые условные стоимости для различных источников питания и стоимость электроэнергии.

Таблица 2

Стоимости 1 кВт·ч выработанной электроэнергии

Источник	Ветряная электростанция (ВЭС), a_1	Солнечная электростанция (СЭС), a_2	Дизельная электростанция (ДЭС), a_3
Стоимость 1 кВт·ч ($C_{ЭЭ}$), о.е.	3,45	6,21	4,95

Симплекс метод является удобным для любого количества источников. В качестве примера рассмотрен комплекс, содержащий три источника.

Для начала необходимо составить целевую функцию. В рассмотренном случае целевая функция будет иметь аналогичный вид [18].

$$F(x) = a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $a_1, a_2 \dots a_n$ – стоимость 1 кВт·ч для источника, $x_1, x_2 \dots x_n$ – мощность, выработанная каждым из источников.

В данном случае функция $F(x)$ является целевой функцией и описывает стоимость выработанной электроэнергии в зависимости от мощности, выработанной каждым из источников. Задачей расчёта является нахождение минимума для обеспечения наиболее экономичных условий работы гибридной энергосистемы.

Постановка задач требует введения ограничений, которые математически могут описывать, например, различные параметры определяющие ресурсные возможности источников. Важно отметить, что данные ограничения не могут быть отрицательными. В зависимости от рода и количества источников могут быть введены различные ограничения [19].

В рамках данной работы введены следующие ограничения, описывающие:

- запросы потребителя по количеству электроэнергии в единицу времени y , кВт*ч;
- максимальную мощность, которую может выдавать источник, z кВт;
- стабильность работы инверторов, inv_1 .

Не стоит забывать о требованиях к работе дополнительного оборудования, такого как инверторы. Для этого введено ограничение, которое обеспечит стабильность работы инверторов. Перегрузка инвертора может произойти, когда подключенный к нему потребитель забирает больше энергии от источников, подключенных к инвертору, чем инвертор может обеспечить [20].

Рассмотрим комплекс, содержащий в себе три источника электроэнергии СЭС, ВЭС и ДЭС. Аналогично первой задаче решение необходимо начинать с

составления математической модели. Примем за x_1 – количество энергии, полученной от ветряной электростанции, за x_2 – количество энергии, полученной от солнечной электростанции, а за x_3 – количество энергии, полученной от дизельной электростанции. За y_1 примем мощность необходимую потребителю. t_1 , t_2 и t_3 время работы каждого из источников источника соответственно. В качестве ограничений выступает выдаваемая мощность источников и мощность, которую может выдать инвертор ($inv1$).

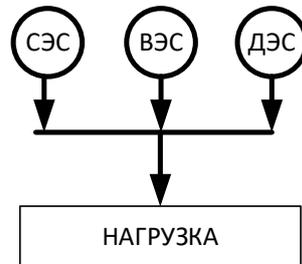


Рис. 2. Схема электроснабжения

Далее необходимо составить целевую функцию, решение которой позволит найти оптимальное решение. Целевая функция имеет вид (4), где $a_1 - a_3$ стоимости 1кВт·ч.

$$F(x) = a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + a_3 * x_3 \rightarrow \min \quad (4)$$

Введём условные значения параметров для наглядности задачи.

Таблица 3

Исходные данные

y_1 , кВт.	t_1 , ч	t_2 , ч	t_3 , ч	a_1 , о.е.	a_2 , о.е.	a_3 , о.е.	z_1 , кВт	z_2 , кВт	z_3 , кВт	inv
900	8	7	5	3,45	6,21	4,95	40	75	80	650

Применённые ограничения имеют следующий вид:

$$x_1 + x_2 + x_3 \geq y_1 \quad x_1 + x_2 + x_3 \geq 900$$

$$x_1 \leq z_1 * t_1 \quad x_1 \leq 320$$

$$x_2 \leq z_2 * t_2 \quad (5) \quad x_2 \leq 525 \quad (6)$$

$$x_3 \leq z_3 * t_3 \quad x_3 \leq 400$$

$$x_1 + x_2 \leq inv \quad x_1 + x_2 \leq 650$$

Для построения первого опорного плана систему неравенств приведем к системе уравнений путем введения дополнительных переменных (переход к канонической форме).

Опорный план — это любое неотрицательное базисное решение системы ограничений задачи линейного программирования.

В 1-м неравенстве смысла (\geq) вводим базисную переменную x_4 со знаком минус. В 2-м неравенстве смысла (\leq) вводим базисную переменную x_5 . В 3-м неравенстве смысла (\leq) вводим базисную переменную x_6 . В 4-м неравенстве смысла (\leq) вводим базисную переменную x_7 . В 5-м неравенстве смысла (\leq) вводим базисную переменную x_8 .

Базисные переменные — это переменные, которые входят только в одно уравнение системы ограничений и при этом с единичным коэффициентом.

$$\begin{aligned}
 x_1 + x_2 + x_3 - x_4 &= 900 \\
 x_1 + x_5 &= 320 \\
 x_2 + x_6 &= 525 \\
 x_3 + x_7 &= 400 \\
 x_1 + x_2 + x_8 &= 650
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Таблица 4

Расширенная матрица системы ограничений-равенств данной задачи

4	1	1	-1	0	0	0	0	900
1	0	0	0	1	0	0	0	320
0	1	0	0	0	1	0	0	525
0	0	1	0	0	0	1	0	400
1	1	0	0	0	0	0	1	650

1. В качестве базовой переменной могут быть выбраны следующие неизвестные: x_4, x_5, x_6, x_7, x_8 .

Выразим базисные переменные через остальные:

$$\begin{aligned}
 x_4 &= x_1 + x_2 + x_3 - 900 \\
 x_5 &= -x_1 + 320 \\
 x_6 &= -x_2 + 525 \\
 x_7 &= -x_3 + 400 \\
 x_8 &= -x_1 - x_2 + 650
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Среди свободных членов имеются отрицательные значения, следовательно, полученный базисный план не является опорным. Вместо переменной x_4 следует ввести переменную x_3 . Выполняем преобразования симплексной таблицы методом Жордано-Гаусса.

Таблица 5

Преобразованная симплексная таблица

Базис	В	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
X_3	900	1	1	1	-1	0	0	0	0
X_1	320	1	0	0	0	1	0	0	0
X_6	525	0	1	0	0	0	1	0	0
X_2	-500	-1	-1	0	1	0	0	1	0
X_8	650	1	1	0	0	0	0	0	1
F(x)	-4455	-1.5	1,26	0	4,95	0	0	0	0

Среди свободных членов имеются отрицательные значения, следовательно, полученный базисный план не является опорным. Вместо переменной x_7 следует ввести переменную x_2 . Выполняем преобразования симплексной таблицы методом Жордано-Гаусса.

Таблица 6

Преобразованная симплексная таблица

Базис	В	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
X_3	400	0	0	1	0	0	0	1	0
X_1	320	1	0	0	0	1	0	0	0
X_6	25	-1	0	0	1	0	1	1	0
X_2	500	1	1	0	-1	0	0	-1	0
X_8	150	0	0	0	1	0	0	1	1
F(x)	-5085	-2,76	0	0	6,21	0	0	1,26	0

Выразим базисные переменные через остальные:

$$\begin{aligned}
 x_3 &= -x_7 + 400 \\
 x_5 &= -x_1 + 320 \\
 x_6 &= x_1 - x_4 - x_7 + 25 \\
 x_2 &= -x_1 + x_4 + x_7 + 500 \\
 x_8 &= -x_4 - x_7 + 150
 \end{aligned} \tag{8}$$

Матрица коэффициентов $A = a(ij)$ этой системы уравнений имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \tag{9}$$

Полагая, что свободные переменные равны 0, получим первый опорный план:

$$X_0 = (0, 500, 400, 0, 320, 25, 0, 150) \tag{10}$$

Базисное решение называется допустимым, если оно неотрицательно.

Таблица 7

Преобразованная симплексная таблица

Базис	В	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
X_3	400	0	0	1	0	0	0	1	0
X_1	320	1	0	0	0	1	0	0	0
X_6	25	-1	0	0	1	0	1	1	0
X_2	500	1	1	0	-1	0	0	-1	0
X_8	150	0	0	0	1	0	0	1	1
F(x)	-5085	-2,76	0	0	6,21	0	0	1,26	0

Переходим к основному алгоритму симплекс-метода.

1. Проверка критерия оптимальности.

Текущий опорный план неоптимален, так как в индексной строке находятся положительные коэффициенты.

2. Определение новой базисной переменной.

В качестве ведущего выберем столбец, соответствующий переменной x_1 , так как это наибольший коэффициент.

3. Определяем новую свободную переменную.

Разрешающий элемент равен (1) и находится на пересечении ведущего столбца и ведущей строки.

Таблица 8

Преобразованная симплексная таблица

Базис	В	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
X_3	400	0	0	1	0	0	0	1	0
X_1	320	1	0	0	0	1	0	0	0
X_6	25	-1	0	0	1	0	1	1	0
X_2	500	1	1	0	-1	0	0	-1	0
X_8	150	0	0	0	1	0	0	1	1
F(x)	-5085	-2,76	0	0	6,21	0	0	1,26	0

4. Пересчет симплекс-таблицы.

Получаем новую симплекс-таблицу:

Таблица 9

Окончательная симплексная таблица

Базис	В	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
X_3	400	0	0	1	0	0	0	1	0
X_1	320	1	0	0	0	1	0	0	0
X_6	345	0	0	0	1	1	1	1	0
X_2	180	0	1	0	-1	-1	0	-1	0
X_8	150	0	0	0	1	0	0	1	1
F(X_2)	-883,2	0	0	0	-6,21	-2,76	0	-1,26	0

Оптимальный план можно записать так:

$$\begin{aligned} x_1 &= 320 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, x_2 = 180 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, x_3 = 400 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \\ F(X) &= 3,45 \cdot 320 + 6,21 \cdot 180 + 4,95 \cdot 400 = 4201,8 \text{ о.е.} \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, с использованием представленных параметров оптимальный план представляет из себя использование 320 кВт·ч от солнечной электростанции, 180 кВт·ч от ветряной электростанции и 400 кВт·ч от дизельной электростанции.

Таким образом, оптимизация гибридной энергосистемы позволяет снизить эксплуатационные расходы за счёт экономичного использования ресурсов. Такой подход может привести к значительной экономии средств на длительной временной перспективе.

Результаты сведены в табл. 10. Показан оптимальный объём электроэнергии, выдаваемый от каждого источника.

Таблица 10

Результаты оптимизации работы источников в рассмотренных ГЭК

Вид источника	СЭС	ВЭС	ДЭС
Кол-во ЭЭ (x_1 - x_3), кВт · ч	320	180	400
$F(X)$, о.е.	4201,8		

Выводы

Использование гибридных электроэнергетических комплексов становится одним из актуальных способов выработки электроэнергии, особенно для снабжения удалённых потребителей.

Симплекс метод, основанный на линейном программировании, позволяет находить оптимальное соотношение при использовании энергоресурсов, опираясь на различные эксплуатационные ограничения.

В рамках рассмотренного гибридного электроэнергетического комплекса определены объёмы электроэнергии, потребляемые от каждого типа источника, обеспечивающие суммарную потребность для потребителя, при этом минимизируя общие затраты на выработку электроэнергии.

Использование симплекс метода представляет собой эффективный подход для обеспечения оптимального использования разнородных источников и экономии энергоресурсов. Применение симплекс метода к управлению гибридными источниками электроэнергии позволяет оптимизировать распределение энергии между различными источниками и является перспективным для обеспечения устойчивого и экономически эффективного энергоснабжения.

Дальнейшее направление исследований будет связано с решением задачи оптимизации выработки электрической энергии гибридным электроэнергетиче-

ским комплексом при изменении мощности потребления в соответствии с определенными (или спрогнозированными) суточными графиками электрической нагрузки, а также программная реализация данной задачи.

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

Библиографический список

1. **Куликов, А.Л.** Использование машинного обучения и искусственных нейронных сетей для распознавания витковых замыканий в силовых трансформаторах / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, А.Н. Совина // *Электричество*. 2022. № 10. С. 34-44. DOI 10.24160/0013-5380-2022-10-34-44
2. **Директор, Л. Б.** И. Л. Майков, Решение задач оптимизации сложных энергетических систем, УБС, 2010, выпуск 28, 274–292
3. **Куликов, А.Л.** Повышение распознаваемости аварийных режимов релейной защитой методами деревьев решений / А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, Д.И. Бездушный // *Электричество*. 2023. № 7. С. 20-34. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-20-34
4. **Wei, Z., & Li, J.** (2021). Optimal design and operation of renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110103. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110103
5. **Xu, L., & Hu, H.** (2020). Advanced optimization techniques for hybrid energy systems. *Energy*, 206, 118160. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118160
6. **Zhou, X., & Wang, L.** (2021). Integration and optimization of hybrid renewable energy systems. *Renewable Energy*, 170, 1001-1012. DOI: 10.1016/j.renene.2021.01.027
7. **Л. Б. Директо, В. М. Зайченко, И. Л. Майков,** Метод оптимизации нестандартных схем энергокомплексов Управление большими системами. Выпуск 31 128 с когенерационными энергетическими установками // *Изв. РАН. Энергетика*. 2010. № 6. С. 121-132.
8. **Sarker, M. R. I., & Sinha, A.** (2021). Optimization techniques for hybrid renewable energy systems: A comprehensive review. *Energy Reports*, 7, 7856-7869. DOI: 10.1016/j.egy.2021.01.001
9. **Хе Хайян,** Тягунов М.Г., Ту Рейн Мин. Выбор и оптимизация гибридных энергетических систем в отдалённых районах Китая // *Вестник МЭИ*. 2022. № 4. С. 40—58. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-4-40-58
10. **Alam, M., & Islam, S.** (2021). Linear programming techniques for hybrid energy system optimization. *Renewable Energy*, 178, 678-690. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.078
11. **Alahakoon, D., & Yu, X.** (2021). Data-driven energy management of virtual power plants: A review. *Renewable and Sustainable*
12. **Liu, X., Gao, M., & Wang, Y.** (2021). Machine learning-based approach: global trends, research directions, and potential implications for power systems. *Energy Reports*, 7, 7233-7248. DOI: 10.1016/j.egy.2020.12.031
13. **Luchetta, A., & Bartolini, A.** (2021). Optimal battery energy storage system scheduling within renewable energy communities. *Energies*, 14(24), 8480. DOI: [10.3390/en14248480](https://doi.org/10.3390/en14248480)
14. **Chen, Y., Zhang, H., & Wang, J.** (2021). Optimized sizing of energy management system for off-grid hybrid
15. **Gao, H., & Chen, Z.** (2021). A hybrid optimization approach for energy management in smart grids. *Applied Energy*, 283, 116221. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116221
16. **González, M. O., & Tadeo, F.** (2020). An efficient optimization strategy for hybrid energy systems in remote communities. *Energy*, 207, 118325. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118325
17. **Mattar, C., & Guzmán, L.** (2021). Off-grid hybrid electrical generation systems in remote communities: Trends and characteristics in sustainability solutions. *Sustainability*, 13(11), 5856. DOI: [10.3390/su13115856](https://doi.org/10.3390/su13115856)

18. **Pandey, R.,** & Singh, S. K. (2021). Review of hybrid renewable energy systems with optimization techniques. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(2), 023501. DOI: 10.1063/5.0041939
19. **Shafiee, M.,** & Zareipour, H. (2021). Data-driven energy management of virtual power plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123655. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123655
20. **Wang, J.,** & Shi, H. (2020). Optimization of hybrid renewable energy systems: A comprehensive review. *Energy Reports*, 6, 2615-2625. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.08.021

A.A. Loskutov, A.S. Simanov

APPLICATION OF THE SIMPLEX METHOD FOR OPTIMAL USE OF AN AUTONOMOUS HYBRID ELECTRIC POWER COMPLEXNizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: In the modern world, energy resources are becoming more and more limited and valuable. The use of hybrid power sources is one of the promising methods for ensuring efficient power supply. Combining various sources of electricity, such as wind, solar, diesel power plants can effectively use and compensate for resource deficiencies through the use of other sources. An important factor for the operation of such sources of electricity is to ensure the efficient use of resources and determine the relationship between the sources of electrical energy used. Effective use of sources allows not only to ensure uninterrupted supply of the consumer, which is especially important in remote regions, but also to reduce economic costs. This article discusses the use of one of the well-known methods for solving linear programming problems - the simplex method in the context of economic optimization of the use of an autonomous hybrid electric power complex. During the research, an analysis was made of the joint use of electricity sources of a typical energy complex and an assessment of efficiency was carried out.

Key words: microenergy system, solution to the optimization problem, simplex method, efficiency of using hybrid power sources.

References

- [1] Kulikov, A.L. The use of machine learning and artificial neural networks for the recognition of loop circuits in power transformers / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, A.N. Sovina // *Electricity*. 2022. No. 10. pp. 34-44. DOI 10.24160/0013-5380-2022-10-34-44
- [2] L. B. Director, I. L. Maikov, Solving problems of optimization of complex energy systems, UBS, 2010, issue 28, 274-292
- [3] Kulikov, A.L. Increasing the recognizability of emergency modes by relay protection using decision tree methods / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, D.I. Soulless // *Electricity*. 2023. No. 7. pp. 20-34. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-20-34
- [4] Wei, Z., & Li, J. (2021). Optimal design and operation of renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110103. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110103
- [5] Xu, L., & Hu, H. (2020). Advanced optimization techniques for hybrid energy systems. *Energy*, 206, 118160. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118160
- [6] Zhou, X., & Wang, L. (2021). Integration and optimization of hybrid renewable energy systems. *Renewable Energy*, 170, 1001-1012. DOI: 10.1016/j.renene.2021.01.027
- [7] L. B. Directo, V. M. Zaichenko, I. L. Maikov, Method of optimization of non-standard schemes of power complexes Management of large systems. Issue 31 128 with cogeneration power plants // *Izv. RAS. Energy*. 2010.No. 6. pp. 121-132.
- [8] Sarker, M. R. I., & Sinha, A. (2021). Optimization techniques for hybrid renewable energy systems: A comprehensive review. *Energy Reports*, 7, 7856-7869. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.01.001
- [9] He Haiyan, Tyagunov M.G., Tu Rein Min. Selection and optimization of hybrid energy systems in remote areas of China // *Bulletin of the MEI*. 2022. No. 4.
- [10] Alam, M., & Islam, S. (2021). Linear programming techniques for hybrid energy system optimization. *Renewable Energy*, 178, 678-690. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.078

-
- [11] Alahakoon, D., & Yu, X. (2021). Data-driven energy management of virtual power plants: A review. *Renewable and Sustainable*
- [12] Liu, X., Gao, M., & Wang, Y. (2021). Machine learning-based approach: global trends, research directions, and potential implications for power systems. *Energy Reports*, 7, 7233-7248. DOI: 10.1016/j.egyр.2020.12.031
- [13] Luchetta, A., & Bartolini, A. (2021). Optimal battery energy storage system scheduling within renewable energy communities. *Energies*, 14(24), 8480. DOI: [10.3390/en14248480](https://doi.org/10.3390/en14248480)
- [14] Chen, Y., Zhang, H., & Wang, J. (2021). Optimized sizing of energy management system for off-grid hybrid
- [15] Gao, H., & Chen, Z. (2021). A hybrid optimization approach for energy management in smart grids. *Applied Energy*, 283, 116221. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116221
- [16] González, M. O., & Tadeo, F. (2020). An efficient optimization strategy for hybrid energy systems in remote communities. *Energy*, 207, 118325. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118325
- [17] Mattar, C., & Guzmán, L. (2021). Off-grid hybrid electrical generation systems in remote communities: Trends and characteristics in sustainability solutions. *Sustainability*, 13(11), 5856. DOI: [10.3390/su13115856](https://doi.org/10.3390/su13115856)
- [18] Pandey, R., & Singh, S. K. (2021). Review of hybrid renewable energy systems with optimization techniques. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(2), 023501. DOI: 10.1063/5.0041939
- [19] Shafiee, M., & Zareipour, H. (2021). Data-driven energy management of virtual power plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123655. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123655
- [20] Wang, J., & Shi, H. (2020). Optimization of hybrid renewable energy systems: A comprehensive review. *Energy Reports*, 6, 2615-2625. DOI: 10.1016/j.egyр.2020.08.021

УДК 621.316.925.1

Л.Р. Романов, М.В. Шарыгин**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрено несколько способов повышения эффективности (чувствительности) токовых защит за счет применения новых измеряемых параметров. Предложенный тип защиты использует в качестве входных информационных параметров аварийные составляющие режима электрической сети. Проведено сравнение предложенных алгоритмов защит с традиционной токовой защитой на базе имитационной модели в программном комплексе *PSCAD*.

Ключевые слова: Токовая защита, многомерная защита, аварийные составляющие, имитационное моделирование, *PSCAD*.

Одним из основных направлений государственной политики Российской Федерации является развитие топливно-энергетического комплекса (ТЭК). В качестве средств для увеличения эффективности объектов ТЭК предпочтение отдается модернизации имеющегося оборудования и внедрению различных цифровых технологий и средств автоматизации, которые позволяют улучшить управляемость и прогнозируемость энергетических систем при их эксплуатации.

Бесперебойное и качественное электроснабжение играет важнейшую роль в обеспечении корректной работы практически всех основных и вспомогательных систем комплекса ТЭК. В свою очередь комплексы релейной защиты и автоматики (РЗА) занимают одну из центральных ролей в обеспечении надежности электроэнергетических систем. Основной задачей РЗА является правильное и однозначное выявление аварийных режимов, коротких замыканий в электрических сетях и их своевременное селективное отключение.

В настоящем исследовании рассматривается наиболее распространенный вид релейной защиты (РЗ) в распределительных сетях с номинальным напряжением 6–35 кВ – токовые защиты. Такой вид защит является наиболее простым, надежным и дешевым среди других видов РЗ. Тем не менее у него имеется и ряд недостатков, например, низкая чувствительность относительно других более совершенных и дорогостоящих вариантов защит [1]. Чувствительность токовой РЗ может изменяться в достаточно большом диапазоне вследствие изменения параметров защищаемой сети (изменение конфигурации сети за местом установки защиты, колебания напряжения, изменение нагрузочных режимов, наличие переходного сопротивления в месте КЗ).

Одним из перспективных способов повышения чувствительности РЗ является добавление в существующие защиты новых информационных параметров о

режиме электрической сети. Это могут быть как токовые направленные защиты, защиты с блокировкой по напряжению, так и защиты по отдельным последовательностям. Однако такие решения приводят к усложнению системы РЗ и соответственно ее удорожанию.

Альтернативным вариантом является использование параметров аварийного режима (ПАР) и информации о доаварийных режимах. С помощью таких методов можно получить многопараметрические защиты, оперирующие параметрами аварийного режима. Примером таких защит являются рассмотренные в [2, 3], которые показали улучшение эффективности относительно традиционной токовой защиты. Также стоит отметить, что применение данного принципа и выделение новых информационных параметров из токового сигнала не приводит к усложнению и удорожанию микропроцессорного терминала РЗ.

В качестве дальнейшей модификации представленного ранее алгоритма [3], реагирующего на приращение модуля действующего значения чисто аварийного тока ($I_{ав}$) и его фазы относительно других токов ($\varphi_{ав}$), синтезируем измерительный орган (ИО) РЗ, который производит вычитание значений аварийных и доаварийных токов между фазами друг-друга. Затем результаты этих математических операций снова вычитаются друг из друга, тем самым получая чисто аварийный ток по комбинациям из двух фаз (I_{AB} , $I_{BC\ ав}$, $I_{CA\ ав}$). Предполагается, что такие токи позволяют повысить чувствительность релейной защиты при несимметричных КЗ в резервной зоне защиты, в особенности при КЗ за трансформатором [4].

Алгоритм работы вышеописанного ИО будет заключаться в определении разности токов фаз A и B , B и C , C и A . Далее из полученных значений в текущий момент времени вычитаются такие же, но с запомненными доаварийными токами. В нашем случае примем время запомненного доаварийного режима равным одному периоду промышленной частоты, то есть 0,02 секунды. В результате вычислений получим чисто аварийные токи сочетания различных фаз. Однако в отличие от формул в [4] для удобства предполагается принять измерения в действующих значениях, чтобы в дальнейшем использовать приращения модулей заданных величин.

Приведем формулы, по которым далее будет производиться построение улучшенного ИО.

Вычисление разности токов всех фаз в текущий и доаварийный момент времени производится согласно следующим формулам:

$$I_{AB} = I_A - I_B; I_{BC} = I_B - I_C; I_{CA} = I_C - I_A; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_{AB\ доав} &= I_{A\ доав} - I_{B\ доав}; I_{BC\ доав} = I_{B\ доав} - I_{C\ доав}; \\ I_{CA\ доав} &= I_{C\ доав} - I_{A\ доав}, \end{aligned} \quad (2)$$

где I_A, I_B, I_C – действующее значение тока соответствующей фазы, измеряемое защитой в текущий момент времени;

$I_{A\ доав}, I_{B\ доав}, I_{C\ доав}$ – действующее значение доаварийного (запомненного) тока соответствующей фазы;

I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} – действующее значение разности токов двух фаз в текущий момент времени;

$I_{AB \text{ доав}}, I_{BC \text{ доав}}, I_{CA \text{ доав}}$ – действующее значение доаварийной (запомненной) разности токов двух фаз.

Имея вычисленные значения разностей токов двух фаз в текущий и доаварийный момент времени, вычислим чисто аварийный ток:

$$\begin{aligned} I_{AB \text{ ав}} &= I_{AB} - I_{AB \text{ доав}} = I_{нб1} ; \\ I_{BC \text{ ав}} &= I_{BC} - I_{BC \text{ доав}} = I_{нб2} ; \\ I_{CA \text{ ав}} &= I_{CA} - I_{CA \text{ доав}} = I_{нб3} , \end{aligned} \quad (3)$$

где $I_{нб1}, I_{нб2}, I_{нб3}$ – токи небаланса при самозапуске нагрузки линии или коротком замыкании, обусловленные несимметрией сети.

Далее произведем следующие математические операции вычитания с токами, тем самым получая результирующий ток:

$$\begin{aligned} |I_{р1.ав}| &= |I_{BC \text{ ав}} - I_{AB \text{ ав}}| ; \\ |I_{р2.ав}| &= |I_{CA \text{ ав}} - I_{BC \text{ ав}}| ; \\ |I_{р3.ав}| &= |I_{AB \text{ ав}} - I_{CA \text{ ав}}| , \end{aligned} \quad (4)$$

где $|I_{р1.ав}|, |I_{р2.ав}|, |I_{р3.ав}|$ – модуль приращения действующего значения результирующего аварийного тока.

Получение значений еще одного информационного параметра – фазы аварийного тока относительно других токов происходит аналогичным образом по формулам 1–4, подставляя вместо тока значение фазы. Таким образом получим аналогичные величины $\varphi_{нб1}, \varphi_{нб2}, \varphi_{нб3}$ и $\varphi_{р1.ав}, \varphi_{р2.ав}, \varphi_{р3.ав}$, которые будут использованы в дальнейших вычислениях. Следуя указанному принципу, получим многопараметрическую защиту, использующую различные параметры аварийного режима.

В перспективе предполагается использовать следующий вариант определения тока срабатывания защиты $I_{сз}$, построенной на вышеописанном принципе:

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot I_{нб \text{ max}} , \quad (5)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки $K_{отс} = 1,1$;

$I_{нб \text{ max}}$ – максимальный из вычисленных по формуле (3) ток небаланса.

Для проверки предложенных алгоритмов многопараметрической токовой защиты рассмотрим участок электрической сети 10 кВ с односторонним питанием, использовавшийся при проверке защиты по $(I_{ав}, \varphi_{ав})$ [3]. Принципиальная схема сети и имитационной модели представлена на рис. 1.

За основу схемы рис.1 а был взят распространенный вариант участка электрической сети, предназначенного для электроснабжения сельской местности, либо вдоль магистрального трубопровода. Такие сети имеют ряд особенностей: значительная протяженность; малые мощности потребителей; неравномерная плотность нагрузки по всей длине воздушных линий [2]. Вследствие перечисленных особенностей ток КЗ имеет малые значения, что усложняет задачу распознавания аварийного режима системой релейной защиты, в особенности это проявляется при КЗ за трансформаторами отпаечных подстанций.

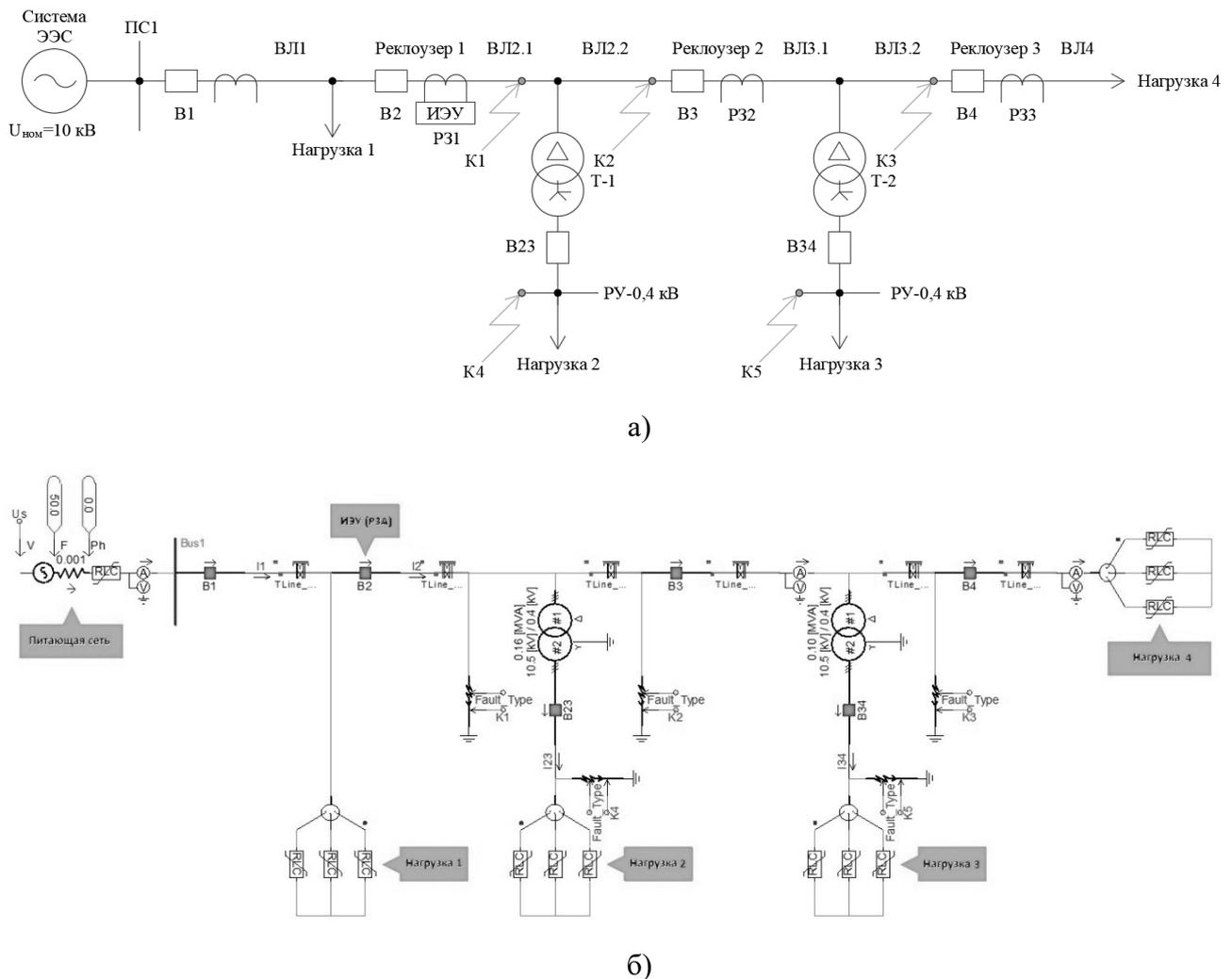


Рис. 1. Принципиальные схемы моделируемой сети:

принципиальная схема участка электрической сети 10 кВ с односторонним питанием (а), имитационная модель участка электрической сети 10 кВ в PSCAD (б)

Ранее предложенный вариант многопараметрической защиты, реагирующей на приращения чисто аварийного тока ($I_{ав}$) и его фазы ($\varphi_{ав}$), уже показал прирост эффективности в данной конфигурации сети. Однако необходимо проверить, представляют ли предложенные комбинации измеряемых параметров (3) и (4) большую информационную ценность для правильного распознавания режима релейной защитой.

Для сравнения эффективности распознавания различных режимов разными видами защит был применен критерий оценки по количеству информации (энтропии) на основе информационной теории Шеннона, подробно рассмотренный в [5]. Результаты вычисленных при моделировании информационных критериев приведены в табл. 1. В табл. 2 приведено сравнение предлагаемых алгоритмов многопараметрической токовой защиты с традиционной.

Таблица 1

Результаты оценки эффективности рассматриваемых алгоритмов

Параметр	Номер алгоритма			
	1	2	3	4
Условная вероятность излишнего отключения P_F , о.е.	0			
Условная вероятность пропуска аварийного режима P_M , о.е.	0,167	0,097	0,162	0,056
Вероятность правильного P_{Π} распознавания, о.е.	0,916	0,952	0,919	0,972
Вероятность ошибочного P_0 распознавания, о.е.	0,084	0,049	0,081	0,028
Энтропия H , бит.	0,414	0,280	0,406	0,184
Информация I , бит.	0,586	0,720	0,594	0,816

Примечание: Номер алгоритма:

№1 – классическая токовая защита (МТЗ, ТО);

№2 – двухпараметрическая токовая защита по чисто аварийному режиму ($I_{ав}, \varphi_{ав}$);

№3 – двухпараметрическая токовая защита, оперирующая разностью чисто аварийных составляющих режима ($I_{нб1}, \varphi_{нб1}$), в соответствии с (3);

№4 – двухпараметрическая токовая защита, оперирующая результирующим чисто аварийным током и его фазой ($I_{р.ав}, \varphi_{р.ав}$), в соответствии с (4).

Таблица 2

Сравнение предлагаемых алгоритмов с традиционной токовой защитой (алг.1)

Параметр	Номер алгоритма		
	2	3	4
Условная вероятность пропуска аварийного режима P_M , о.е.	снижение на 0,070 (7%)	снижение на 0,005 (0,5%)	снижение на 0,111 (11,1%)
Вероятность правильного P_{Π} распознавания, о.е.	увеличение на 0,035 (3,5%)	увеличение на 0,003 (0,3%)	увеличение на 0,056 (5,6%)
Вероятность ошибочного P_0 распознавания, о.е.	снижение на 0,035 (3,5%)	снижение на 0,003 (0,3%)	снижение на 0,056 (5,6%)
Энтропия H , бит.	снижение на 0,134 (13,4%)	снижение на 0,009 (0,9%)	снижение на 0,230 (23,0%)
Информация I , бит.	увеличение на 0,134 (13,4%)	увеличение на 0,009 (0,9%)	увеличение на 0,230 (23,0%)

Из результатов сравнения предлагаемых алгоритмов двухпараметрической защиты (алг. 2, 3, 4) с традиционной токовой (алг.1) следует, что применение дополнительных параметров режима, измеряемых защитой, позволяет улучшить чувствительность защиты. В частности, в ходе исследования рассматривались информационные параметры, которые можно получить из токового сигнала.

Предложенные алгоритмы под номером 2 и 4 показали прирост чувствительности относительно традиционной токовой защиты, улучшение заключается в снижении вероятности пропуска аварийного режима P_M на 7% и 11,1% соответ-

ственно, а также увеличению вероятности правильного распознавания режима защиты $P_{\text{п}}$ - 3,5% и 5,6% соответственно. Результаты показывают и увеличение информационной ценности рассматриваемых параметров на 13,4% и 23%. В особенности данные алгоритмы хорошо себя зарекомендовали при несимметричных КЗ в резервной зоне защиты.

Однако результат сравнения алгоритма 3 с исходной защитой показывает, что не все вновь вводимые информационные параметры режима электрической сети полезны и помогают улучшить эффективность защиты в плане чувствительности. Таким образом алгоритм, измеряющий разность чисто аварийных составляющих режима, практически не дает защите преимущества в правильном распознавании режима относительно традиционной токовой защиты, следовательно его применение нецелесообразно. Также данный случай показывает важность правильного выбора информационных параметров, измеряемых защитой.

Дальнейшее исследование информационной ценности различных электрических параметров с их последующей интеграцией в предложенные алгоритмы позволит еще больше повысить эффективность токовой защиты, тем самым снизив количество потенциально аварийных ситуаций.

Библиографический список

1. **Шнеерсон, Э.М.** Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 539 с.
2. **Шарыгин, М. В.,** Романов Л.Р., Крюков О.В. Совершенствование токовых защит реклоузеров в распределительных сетях 6-35 кВ // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения) : Материа-лы МНТК. Том 3. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2023. – С. 336-339.
3. **Романов, Л. Р.,** Шарыгин М.В. Способы улучшения эффективности цифровых токовых защит в распределительных сетях 6-35 // Актуальные проблемы электроэнергетики, Нижний Новгород, 21 декабря 2023 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023. – С. 288-293.
4. **Клецель, М. Я.,** Никитин К. И., Таронов К. С. Алгоритм для повышения чувствительности резервных защит линий // Омский научный вестник №1 (30) 2005–146–148 с.
5. **Шарыгин, М.В.,** Куликов А.Л. Защита и автоматика систем электроснабжения с активными промышленными потребителями: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС. 2017. 284 с.

L.R. Romanov, M.V. Sharygin

EMERGENCY MODE PARAMETERS USAGE TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF OVERCURRENT PROTECTION

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

Abstract. The article discusses several ways to increase the efficiency (sensitivity) of overcurrent protection using new measured parameters. The proposed type of protection uses the emergency components of the electric network mode as input information parameters. A comparison of the proposed protection algorithms with traditional overcurrent protection based on a simulation model in the PSCAD software package is carried out.

Key words: Overcurrent protection, multidimensional protection, emergency components, simulation modeling, PSCAD.

References

- [1] Shneerson E.H.M. Tsifrovaya releinaya zashchita [Digital Relay Protection]. M.: Energoatomizdat, 2007. 539 s. (in Russian)
- [2] Sharygin M.V., Romanov L.R., Kryukov O.V. Sovershenstvovanie tokovykh zashhit reklozurov v raspredelitel'nykh setyakh 6-35 kV [Improvement of current protection of reclosers in distribution networks of 6-35 kV] // Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XXII Benardosovskie chteniya) : Materialy MNTK. Tom 3. Ivanovo: IGEU im. V.I. Lenina, 2023. – S. 336-339. (in Russian)
- [3] Romanov L. R., Sharygin M.V. Sposoby uluchsheniya effektivnosti cifrovoykh tokovykh zashchit v raspredelitel'nykh setyakh 6-35 [Ways to improve the efficiency of digital overcurrent protection in 6-35 kV distribution networks] // Aktual'nye problemy elektroenergetiki, Nizhny Novgorod, 21 dekabrya 2023 goda. – Nizhny Novgorod: Nizhegorodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva, 2023. – S. 288-293. (in Russian)
- [4] Klecel' M. YA., Nikitin K. I., Taronov K. S. Algoritm dlya povysheniya chuvstvitel'nosti rezervnykh zashchit liniy [Algorithm for Improving the Sensitivity of Reserve Line Protections] // Omskiy nauchnyy vestnik №1 (30) 2005–146–148 s. (in Russian)
- [5] Sharygin M.V., Kulikov A.L. Zashchita i avtomatika sistem ehlektrosnabzheniya s aktivnymi promyshlennymi potrebitelyami [Protection and automation of power supply systems with active industrial consumers]: monografiya. Nizhny Novgorod: NIU RANKhIGS. 2017. 284 s. (in Russian)

УДК 621.3

В.В. Ростовский, А.В. Серебряков, Д.М. Кочеганов

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. В статье рассмотрены научно-технические решения по определению степени работоспособности диагностируемого объекта, проанализировано их применение для автономного генераторного комплекса.

Ключевые слова: область работоспособности, методы контроля работоспособности, запас работоспособности, диагностические параметры.

Современные автономные генераторные комплексы состоят из множества элементов, как следствие, это приводит к возможности возникновения большого количества дефектов. Для определения фактического состояния электрооборудования и его пригодности к дальнейшей эксплуатации необходимо построение системы диагностики и мониторинга технического состояния, позволяющей выявить отклонения технических параметров, сравнивая полученные показания с нормативными данными.

Для определения технического состояния устройств применяются несколько видов исследований, таких как визуальный контроль, рентгеновское, магнитное, ионизирующее, акустическое излучение. Для получения полных сведений о состоянии электрооборудования используют и другие методы, позволяющие судить о техническом состоянии, не прибегая к разборке механизма на составные части. Для проведения диагностических работ различных устройств разрабатываются специальные методики исследований.

Автономный генераторный комплекс (АГК), как и любой объект может иметь два состояния: работоспособное и неработоспособное. Чтобы определить условия работоспособности объекта, состояния разделяются на два подмножества: работоспособное и неработоспособное. Таким образом, требуется определить эксплуатационные допуски — допустимые границы изменения, установленные опытным путём или расчётом. Автономный генераторный комплекс можно считать работоспособным, если все контролируемые параметры находятся в допустимых границах, а сам АГК может выполнять возложенные на него функции. Данная область допустимых границ считается «областью работоспособности».

Таким образом, для контроля работоспособности необходимо определить области исправного и неисправного состояния для каждого элемента, входящего в состав АГК.

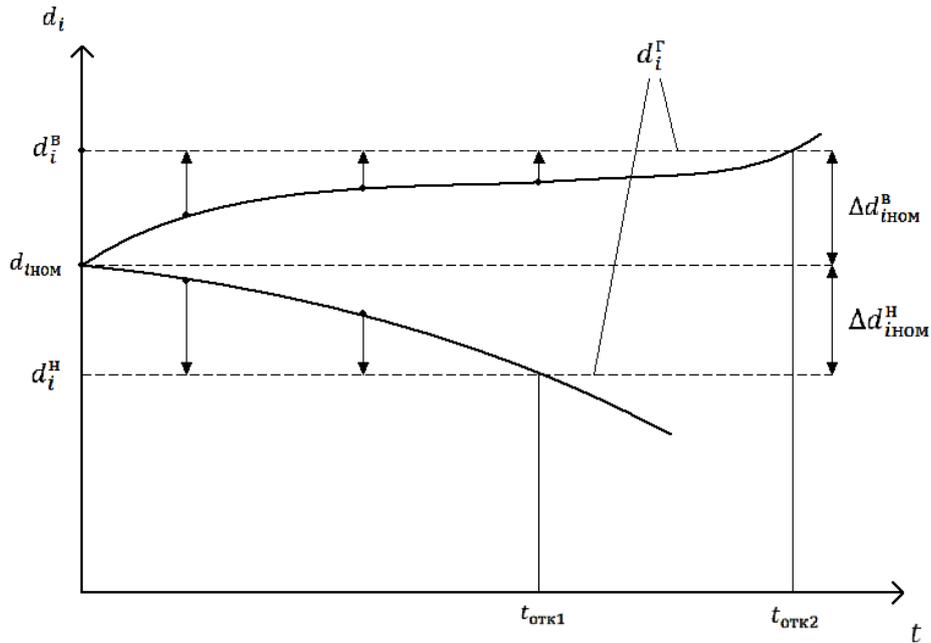


Рис. 1. Область работоспособности

При контроле работоспособности необходимо определить, насколько фактическое состояние удалено от границ области работоспособности (нижней и верхней) (рис. 1). На состояние АГК в условиях эксплуатации влияет множество факторов: старение в условиях эксплуатации, температурные режимы, погодные условия, неточности, допущенные при изготовлении и отладке, и т.д.

Изменение заданных параметров объекта повышает вероятность выхода контролируемых параметров за пределы области работоспособности. Удаление значений диагностических признаков от границ области увеличивает запас работоспособности, а приближение к границам уменьшает его [1].

Для контроля работоспособности электроэнергетического оборудования применяется несколько методов поиска неисправностей:

- метод сравнения реакции реального объекта и эквивалентной модели;
- метод контроля совокупности диагностических параметров;
- метод контроля обобщенного диагностического параметра;
- метод оценки частотных характеристик.

Данные методы зарекомендовали себя при контроле работоспособности электроэнергетического оборудования. Они позволяют существенно сократить время поиска неисправностей, затраты на ремонт, минимизировать время простоя. В основе каждого лежит ряд последовательных проверок, в результате которых делается заключение о состоянии элемента, узла, блока или аппаратуры в целом [2]. Выбор оптимального метода контроля работоспособности зависит от функциональной структуры, конструктивного исполнения, временных графиков работы, температурных режимов и т.д. На основе анализа принимается решение о применении одного из существующих методов или их комбинации.

Таким образом, следует рассмотреть возможность применения известных методов контроля работоспособности АГК, опираясь на его эксплуатационные характеристики.

Метод сравнения реакции реального объекта и эквивалентной модели

Данный метод успешно используется для диагностики сложных динамических систем. Для его применения необходимо создание эквивалентной модели АГК. В качестве эквивалента может использоваться второй аналогичный объект (АГК), физическая модель, либо, что в настоящее время наиболее предпочтительно, точное математическое описание АГК (математическая модель) (рис.2).

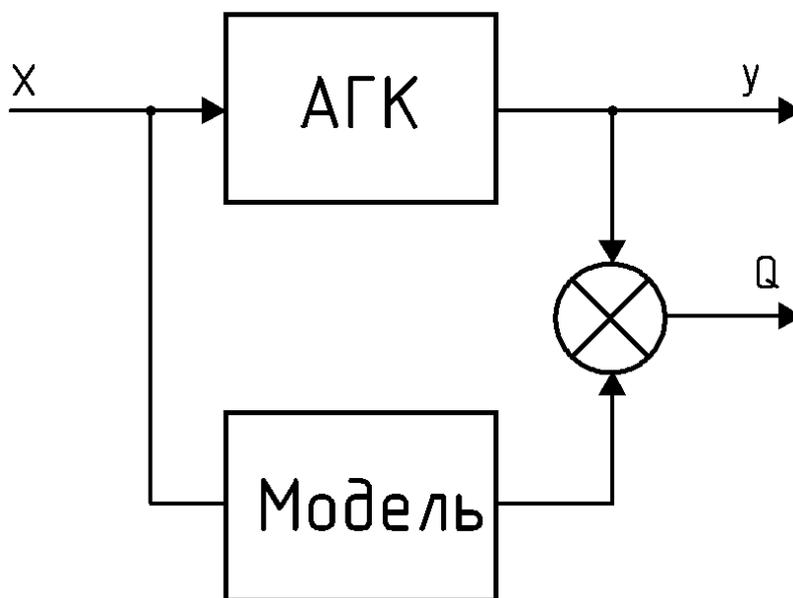


Рис.2. Метод сравнения реакции электроустановки и эквивалентной модели

Суть метода заключается в следующем: на вход одного из элементов АГК и его эквивалентной модели подаётся одинаковый входной тестовый сигнал x , который изменяется по амплитуде с течением времени. На выходе АГК и его модели находится сумматор, показывающий разницу в уровнях выходных сигналов элементов АГК и эквивалентной модели [3].

АГК можно считать работоспособным при выполнении следующего условия

$$Q = |u_{\text{АГК}} - u_{\text{эм}}| \leq Q_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{тр}}$ – требуемое значение разности

В идеальном случае $Q=0$. Это условие выполняется при работоспособном состоянии АГК и создании эквивалентной модели, требуемой точности.

Таким образом, применение данного метода для контроля работоспособности АГК требует создания полноразмерной эквивалентной модели, что неминуемо ведет к высоким финансовым затратам. Создание же математической модели, адекватной объекту, зачастую затруднено. Следует отметить, что данный метод позволяет работать с действующим объектом; в условиях непрерывной эксплуатации АГК это может иметь решающее значение [4].

Метод контроля совокупности диагностических параметров
 $D = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_n)$:

Суть данного метода заключается в выборе некоторого количества диагностических параметров с целью контроля отклонения значения каждого из них от области допустимых пределов. Допустимые пределы изменения устанавливаются на основе опыта эксплуатации и экспертных оценок. Если все диагностические параметры АГК находятся в пределах области, объект считается исправным и работоспособным [5].

При контроле работоспособности АГК необходимо контролировать каждый диагностический параметр и сравнивать его с установленным допуском (рис. 3). Точность метода повышается при увеличении количества контролируемых параметров, однако это ведет к увеличению финансовых затрат. Действующий, непрерывно эксплуатирующийся АГК зачастую не позволяет подать тестовые сигналы в качестве входного воздействия на элементы, а использование рабочего сигнала не всегда адекватно. Это может привести к невозможности применения данного метода контроля работоспособности на некоторых АГК.

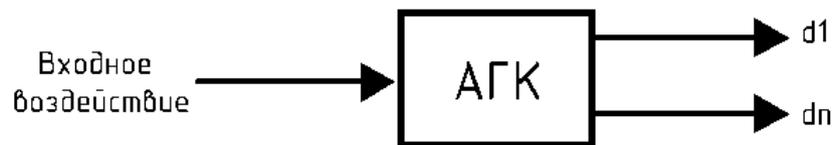


Рис. 3. Метод контроля работоспособности объекта на основе совокупности диагностических параметров

Метод контроля обобщенного диагностического параметра

В основу данного метода положен анализ диагностической модели. На основе анализа определяется некий параметр D , который зависит от других параметров d_n и характеризует состояние элементов или самого АГК в целом [6].

$$D = f(d_1, \dots, d_i, \dots, d_n). \tag{2}$$

Одним из таких параметров в АГК является сопротивление изоляции R_u синхронного генератора (СГ), определяющееся по формуле:

$$R_u = f(U, I_{ym}). \tag{3}$$

Текущие значения R_u сравниваются с результатом предыдущих измерений и, на основе сравнения данных, делается вывод о работоспособности объекта (рис. 4).

Существенное изменение параметра во времени ведет к повышенному износу и возможному нарушению работоспособности. Данный метод может применяться в условиях непрерывной эксплуатации АГК, однако для сравнения данных требуется достаточная для этого база данных (наблюдений). Сравнение показаний с результатом предыдущих измерений на новом объекте не представляется возможным по причине отсутствия данных для сравнения.

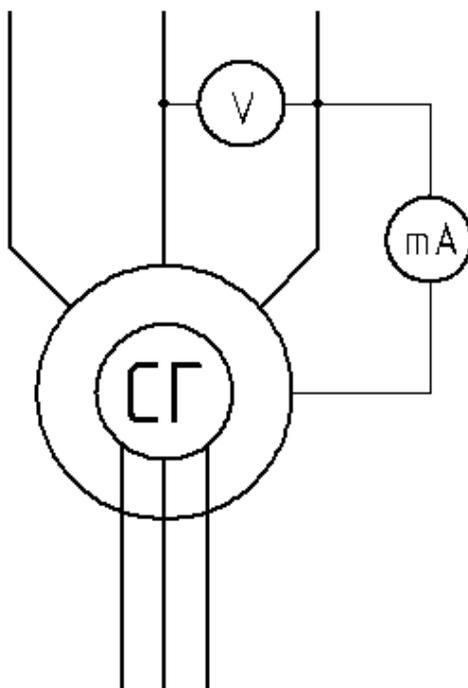


Рис. 4. Метод контроля обобщенного диагностического параметра

Метод оценки частотных характеристик

Данный метод контроля работоспособности основан на подаче тестового сигнала в виде синусоидальной волны в определенном диапазоне частот на вход узла АГК (рис. 5). На основе отклика системы на тестовый сигнал строится амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристика. Сравнение полученных данных с граничными значениями позволяет сделать вывод о работоспособности АГК [7].

Следует отметить, что для подачи такого тестового сигнала необходимо вывести объект из эксплуатации. В некоторых случаях применение данного метода контроля работоспособности АГК не представляется возможным. Однако возможность заранее установить некоторые определенные граничные точки позволяет существенно сократить временные затраты. Таким образом, сделать вывод о работоспособности АГК можно по реакции на сигнал только определенного ряда частот, что является несомненно преимуществом данного метода.



Рис. 5. Метод оценки частотных характеристик

Выводы

В заключение можно сказать, что из рассмотренных методов наиболее оптимальным для контроля работоспособности автономных генераторных комплексов в условиях эксплуатации является метод, основанный на контроле совокупности диагностических параметров. Он достаточно просто реализуется, позволяет работать с действующим объектом, обладает приемлемой точностью.

В свою очередь, обладающий наибольшей точностью метод сравнения реакции электроустановки и эквивалентной модели не является предпочтительным ввиду того, что для его реализации необходимо создать макет реального АГК, что является крайне затратным мероприятием в финансовом и временном аспектах.

Метод, основанный на контроле обобщенного диагностического параметра, наиболее просто реализуется и позволяет достаточно точно определить область работоспособности. Он не требует остановки работы генераторного комплекса, однако для сравнения данных требуется достаточная для этого база данных.

В отличие от перечисленных, метод, основанный на оценивании частотных характеристик, требует остановки работы и временный вывод объекта из эксплуатации для подачи тестового сигнала, хотя и позволяет существенно сократить временные затраты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00424, <https://rscf.ru/project/22-19-00424/>.

Библиографический список

1. **Киселёв, Ю.В.** Основы теории технической диагностики. - Самара: СГАУ, 2004 - 138 с.
2. **Саушев, А. В.** Метод построения границы области работоспособности электротехнических объектов / А. В. Саушев // Электричество. – 1990. – № 4. – С. 14 – 19.
3. **Саушев, А. В.** Запас работоспособности как целевая функция при синтезе технических систем / А. В. Саушев // Межвузовский сборник научных трудов «Математика и ее приложения». – 2011. – Вып. 3. – СПб. – С. 190 – 198.
4. **Мозгалевский, А. В.** Техническая диагностика (непрерывные объекты) / А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.
5. **Назаров, Д. А.** Методы аппроксимации области работоспособности в задаче параметрического синтеза / Д. А. Назаров // Журнал Вологодские чтения: Из-во Дальневосточного гос. тех. ун-та. – 2004. – № 38-1. – С. 179 – 181.
6. **Голубев, К.В.** Диагностика электрических машин по спектру потребляемого тока — альтернативный метод оценки текущего состояния вращающегося оборудования. / Голубев К.В./ Современные методы диагностики электродвигателей. – 2022 – № 3. – С. 3.
7. **Захаров, Н. А.,** Голубев К. В. Интеллектуальная диагностика электрических машин. . / Захаров Н. А., Голубев К. В. / Современные методы диагностики электродвигателей. – 2023 – № 2. – С. 6.

V.V. Rostovsky, A.V. Serebryakov, D.M. Kocheganov

**DETERMINING THE DEGREE OF OBJECT OPERABILITY
AND ANALYSIS OF METHODS FOR MONITORING
ROBOT CAPACITY**

Nizhny Novgorod State Technical University named after. R.E. Alekseeva

Abstract. The article discusses the scientific and technical solutions developed by the authors to determine the degree of performance of the diagnosed object, and proposes methods for monitoring performance.

Key words: performance area, performance monitoring methods, performance reserve, diagnostic parameters.

References

- [1] Kiselev Yu.V. Fundamentals of the theory of technical diagnostics. - Samara: SSAU, 2004 - 138 p.
- [2] Saushev A.V. Method for constructing the boundary of the performance area of electrical objects / A.V. Saushev // Electricity. – 1990. – No. 4. – P. 14 – 19.
- [3] Saushev A.V. Performance reserve as a target function in the synthesis of technical systems / A.V. Saushev // Interuniversity collection of scientific papers “Mathematics and its applications”. – 2011. – Issue. 3. – St. Petersburg. – P. 190 – 198.
- [4] Golubev K.V. Diagnostics of electrical machines based on the spectrum of current consumption is an alternative method for assessing the current condition of rotating equipment. / Golubev K.V./ Modern methods of diagnostics of electric motors. – 2022 – No. 3. – P. 3.
- [5] Zakharov N. A., Golubev K. V. Intelligent diagnostics of electrical machines. . / Zakharov N. A., Golubev K. V. / Modern methods of diagnostics of electric motors. – 2023 – No. 2. – P. 6.
- [6] Mozgalevsky, A. V. Technical diagnostics (continuous objects) / A. V. Mozgalevsky, D. V. Gasarov. – M.: Higher School, 1975. – 207 p.
- [7] Nazarov, D. A. Methods for approximating the performance area in the problem of parametric synthesis / D. A. Nazarov // Journal of Vologda Readings: Issue of the Far Eastern State. those. un-ta. – 2004. – No. 38-1. – P. 179 – 181.

УДК 622.271:629.423.32

И.Ю. Семькина¹, В.М. Завьялов², Я.А. Нечипоренко²

МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева¹
Севастопольский государственный университет²

Аннотация. В статье на примере открытой добычи полезных ископаемых показана актуальность внедрения систем беспроводного заряда для технологического электротранспорта. Отмечено отсутствие методики для оценки стоимости внедрения данной технологии. Предложена структура иерархической модели и параметры ее отдельных компонентов для проведения оценки стоимости жизненного цикла рассматриваемых систем беспроводного заряда.

Ключевые слова: технологический электротранспорт, системы беспроводного заряда, сценарий эксплуатации зарядной инфраструктуры, стоимость жизненного цикла, оптимизация.

Развитие электротранспорта, а также систем искусственного интеллекта создает все больше предпосылок ко внедрению безлюдных технологий для автоматизации технологических процессов крупных территориально распределенных промышленных объектов. Примером является использование для открытых горных работ автономных самосвалов [1, 2], создание аккумуляторных карьерных самосвалов eDumper на базе *KOMATSU HD 605-7*, *BYD V60*, *Volvo HX1* [3], а также БелАЗ-7558Е [4]. Однако все применяемые до сих пор технологии требуют организации проводного подключения к сети электроснабжения для заряда аккумуляторов, что требует либо разработки дополнительных средств автоматизации, либо участия персонала, что противоречит концепции безлюдности. Решением данного вопроса может являться внедрение систем беспроводного заряда [5, 6].

Достоинством этой технологии является возможность совмещения процесса заряда аккумуляторов с отдельными технологическими операциями, что повышает коэффициент использования электротранспорта, а кроме того, дает возможность применения аккумуляторов меньшей емкости. Однако системы беспроводного заряда требуют установки зарядных станций, предусматривающих организацию специальных зарядных площадок или дополнительное оборудование дорожного полотна для заряда во время движения, а также установку дополнительного электрооборудования на самом технологическом электротранспорте, что обуславливает дополнительные затраты. Адекватных данных

для сопоставления этих затрат для аккумуляторных самосвалов с, например, затратами на установку контактной сети для использования самосвалов-троллейбусов или затратами на установку станции проводного заряда с учетом выбытия аккумуляторного самосвала из технологического процесса на время заряда, в настоящий момент нет.

Оценка эффективности использования системы беспроводного заряда для автономного технологического электротранспорта должна учитывать не только капитальные затраты, но и динамику эксплуатационных затрат за весь период функционирования системы, а также затраты на ее утилизацию. Все эти факторы учитывает показатель стоимости жизненного цикла [7]. Существуют работы [8-10], оценивающие стоимость жизненного цикла городских электробусов, в том числе рассматривающие возможность их беспроводного заряда. Однако оценка стоимости жизненного цикла систем беспроводного заряда, в том числе и для технологического электротранспорта, в настоящее время не проводилась.

Для решения такой задачи предлагается использовать иерархическую модель жизненного цикла системы беспроводного заряда, показанную на рис. 1. Состав включенных в нее этапов в целом соответствует [7], однако особенностью этой модели является необходимость предварительного решения двух оптимизационных задач, связанных с параметрами беспроводной зарядной станции и характеристиками зарядной инфраструктуры.



Рис. 1. Модель жизненного цикла системы беспроводного заряда

где P_{Ghs} – мощность единичной зарядной станции; I_{Gh} – ток заряда аккумулятора, величина которого не должна быть ниже I_{Ghmin} ; E_{bat} – расчетная емкость аккумулятора единицы электротранспорта.

Оптимизация беспроводной зарядной станции является многовариантной задачей, включающей как обоснованный выбор ее структуры, схемных и конструктивных решений, так и определение ее параметров, соответствующих критериям оптимизации. Рассматривая отдельные варианты, будем исходить из гипотезы их равной надежности. Для минимизации потерь электроэнергии при эксплуатации с учетом возможных ограничений в качестве критерия оптимизации можно использовать:

$$\begin{cases} \eta \rightarrow \max, \text{ при } \eta \in [\eta_{\min}, 1); \\ I_2 \geq I_{2\min}, \text{ при } U_1 \leq U_{1\max}; \\ x_i, y_i, z_i \leq x_{i\max}, y_{i\max}, z_{i\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где η – КПД зарядной станции, величина которого не может быть ниже η_{\min} ; I_2 – ток принимающей цепи, величина которого определяет ток заряда аккумулятора I_{Gh} , а следовательно не должна быть ниже $I_{2\min}$; U_1 – напряжение передающей цепи, величина которого не может быть выше $U_{1\max}$, зависящего от напряжения сети; x_i, y_i, z_i – габаритные размеры i -ого элемента зарядной станции (передающей и принимающей катушек, конденсаторов резонансного контура и т.д.), имеющие ограничения $x_{i\max}, y_{i\max}, z_{i\max}$.

Оптимизация зарядной станции проводится с использованием математической модели беспроводной зарядной станции, построенной на базе ее схемы замещения, учитывающей влияние геометрии и конструкции, передающей и принимающей катушек, а в качестве метода поиска оптимума может быть использован прямой перебор [13, 14].

Результаты оптимизации зарядной инфраструктуры и единичной беспроводной зарядной станции фиксируют параметры системы беспроводного заряда, так что отдельные этапы жизненного цикла могут быть рассчитаны инженерным или параметрическим методом по аналогии с [15, 16].

Таким образом, предлагаемая модель жизненного цикла системы беспроводного заряда может быть использована для оценки затрат на ее внедрение для автономного технологического электротранспорта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Библиографический список

1. **Плаkitкин, Ю.А.** Цифровизация экономики угольной промышленности России – от «Индустрии-4.0» до «Общества 5.0» / Ю.А. Плаkitкин, Л.С. Плаkitкина // Горная Промышленность. – 2018. – №4 (140). – 2018. – С. 22. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-4-140-22-30.
2. **Ананьев, К.А.** Разработка варианта гидравлической системы поворота автономного карьерного вагона.

- ерного самосвала / К.А. Ананьев, А.Н. Ермаков, Д.М. Дубинкин [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 5(157). – С. 3-9. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-3-9. – EDN NGMQVN.
3. **Черепанов, В.А.** Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий / В.А. Черепанов, А.Г. Журавлев, И.А. Глебов, М.А. Чендырев // Проблемы недропользования. – 2019. – № 1(20). – С. 33-49. – DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033. – EDN ТТЕРЕУ.
 4. **Замятин, И.Д.** Анализ перспектив развития конструкции карьерных самосвалов // Вопросы устойчивого развития общества. – 2021. – № 6. – С. 641-651. – EDN GFEOGK.
 5. **Chen, H.** Modular four-channel 50 kW WPT system with decoupled coil design for fast EV charging / Chen H., Qian Z., Zhang R., Zhang Z. [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 136083-136093. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3116696.
 6. **Завьялов, В.М.** Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина, Е.А. Дубков, А.С. Велиляев // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 428-442. – EDN JSNTAQ.
 7. ГОСТ Р 27.202–2012. Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла. Введ. 1.04.2013. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
 8. **Кудряшов, М.А.** Методический подход к организации перевозок на электробусных маршрутах / М.А. Кудряшов, А.В. Прокопенков, Р.С. Айриев // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18, № 5(90). – С. 152-170. – DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-152-170. – EDN AIXBCW.
 9. **Lajunen, Antti.** Lifecycle Costs and Charging Requirements of Electric Buses with Different Charging Methods // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 172. – P. 56-67. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.066.
 10. **Luo, Xiaoling.** Joint Design of Electric Bus Transit Service and Wireless Charging Facilities / Xiaoling Luo, Wenbo Fan // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2023. – Vol. 174. – P. 103114. – DOI: 10.1016/j.tre.2023.103114.
 11. **Воронов, А.Ю.** Обзор моделей диспетчеризации карьерного автотранспорта / А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин, Ю.Е. Воронов // Горная промышленность. – 2022. – № 6. – С. 111-121. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-111-121. – EDN LKXTRC.
 12. **Воронов, Ю. Е.** Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом / Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин, О.С. Максимова // Уголь. – 2023. – № 9(1171). – С. 75-83. – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83. – EDN NYKHNY.
 13. **Hasan, N.** A practical implementation of wireless power transfer systems for socially interactive robots / Hasan N., Cocar I., Amely T., Wang H. [et al.] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015. – pp. 4935-4942.
 14. **Zavyalov, V.** Constrained Efficiency Optimization for the Wireless Charging System with LC-Series Compensating Topology [具有LC串联补偿拓扑结构的无线充电系统的约束效率优化] / Valery Zavyalov, Irina Semykina, Evgeny Dubkov, Amet-Khan Velilyaev, Amr Refky // Transactions of China Electrotechnical Society [电工技术学报]. – 2024. – Vol. 39. – No. 6. – DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222371.
 15. **Тихонов, А.И.** Применение показателя стоимости жизненного цикла инновационного изделия на авиапромышленном предприятии / А.И. Тихонов, Н.М. Лазников, Т.И. Зуева // Труды МАИ. – 2013. – № 70. – С. 24. – EDN RNJHLH.
 16. **Баженов, В.И.** Методика расчета стоимости жизненного цикла для оборудования, систем и сооружений водоснабжения и водоотведения / В.И. Баженов, С.Е. Березин, Г.А. Самбурский // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2017. – № 4. – С. 34-41. – EDN YKZLFF.

I.YU. Semykina¹, V.M. Zavyalov², YA. A. Nechiporenko²

LIFE CYCLE MODEL OF WIRELESS CHARGING SYSTEMS FOR AUTONOMOUS TECHNOLOGICAL ELECTRIC VEHICLES

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University¹
Sevastopol State University²

Abstract. On the example of open-pit mining, the article shows the urgency of wireless charging systems for technological electric vehicles and a lack of methodology for estimating the cost of this technology implementation. For assessing the life cycle cost of the wireless charging systems under consideration the article proposes the hierarchical structure of the life cycle model and the parameters of its certain components.

The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 075-03-2024-082-2).

Key words: technological electric vehicle, wireless charging system, charging infrastructure operating scenario, life cycle cost, optimization.

References

- [1] Iu.A. Plakitkin, L.S. Plakitkina, “Тсифровизатсиа економики уголнои промышленности Росси – от «Индустрии-4.0» до «Общества 5.0» [Digitization of the Russian coal sector economy – from industry 4.0 to society 5.0]”, *Gornaia Promyshlennost [Russian Mining Industry]*, no. 4(140), pp. 22, 2018. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-4-140-22-30 (in Russian).
- [2] K.A. Ananyev, A.N. Ermakov, D.M. Dubinkin [et al.], “Razrabotka varianta gidravlicheskoй sistemy povorota avtonomnogo karyernogo samosvala [Development of a hydraulic steering system option autonomous mining dump truck]”, *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining Equipment and Electromechanics]*, no. 5(157), pp. 3-9, 2021. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-3-9 (in Russian).
- [3] V.A. Cherepanov, A.G. Zhuravlev, I.A. Glebov, M.A. Chendyrev, “Obzor transporta s elektropitaniey v fokuse razvitiia gornodobyvaiushchikh predpriyatii [Overview of transport with power supply in focus of mining industry development]”, *Problemy nedropolzovaniia [Problems of Subsoil Use]*, no. 1(20), pp. 33-49, 2019. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.033 (in Russian).
- [4] I.D. Zamiatin, “Analiz perspektiv razvitiia konstruktsii karernykh samosvalov [Analysis of prospects for the development of mining dump truck designs]”, *Voprosy ustoichivogo razvitiia obshchestva [Issues of sustainable development of society]*, no. 6, pp. 641-651, 2021 (in Russian).
- [5] Chen H., Qian Z., Zhang R., Zhang Z. [et al.], “Modular four-channel 50 kW WPT system with decoupled coil design for fast EV charging”, *IEEE Access*, no. 9, pp. 136083-136093, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3116696.
- [6] V.M. Zavyalov, I.Yu. Semykina, E.A. Dubkov, A.S. Velilyaev, “The wireless charging system for mining electric locomotives”, *Journal of Mining Institute*, vol. 261, pp. 428-442, 2023.
- [7] Dependability in technique. Dependability management. Life cycle costing. Introduced April 01, 2013. Moscow: Standardinform GOST R 27.202-2012., pp. 15, 2014 (in Russian).
- [8] M.A. Kudriashov, A.V. Prokopenkov, R.S. Ayriev, “Metodicheskiy podhod k organizatsii perevozok na elektrobushnykh marshrutakh [Methodical approach to organisation of transportation on electric bus routes]”, *Mir transporta [World of Transport and Transportation]*, vol. 18, no. 5(90), pp. 152-170, 2020. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-152-170 (in Russian).

- [9] Antti Lajunen, “Lifecycle Costs and Charging Requirements of Electric Buses with Different Charging Methods”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, pp. 56-67, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.066.
- [10] Xiaoling Luo, Wenbo Fan, “Joint Design of Electric Bus Transit Service and Wireless Charging Facilities”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 174, pp. 103114, 2023. DOI: 10.1016/j.tre.2023.103114.
- [11] A.Iu. Voronov, D.M. Dubinkin, Iu.E. Voronov, “Obzor modeley dispetcherizatcii kar`ernogo avtotransporta [An overview of models for truck dispatching in open-pit mines]”, *Gornaia Promyshlennost [Russian Mining Industry]*, no. 6, pp. 111-121, 2022. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-111-121 (in Russian).
- [12] Iu.E. Voronov, A.Iu. Voronov, D.M. Dubinkin, O.S. Maksimova, “Dispetcherizatciia v kar`ernykh ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksakh s bespilotnym transportom [Dispatching in truck-shovel systems with unmanned transport at open-pit mines]”, *Gornaia Promyshlennost [Russian Mining Industry]*, no. 9(1171), pp. 75-83, 2023. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-83 (in Russian).
- [13] Hasan N., Cocar I., Amely T., Wang H. [et al.], “A practical implementation of wireless power transfer systems for socially interactive robots”, “2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)”. Montreal, QC, Canada, pp. 4935-4942, 2015.
- [14] Valery Zavyalov, Irina Semykina, Evgeny Dubkov, Amet-Khan Velilyaev, Amr Refky, “Constrained Efficiency Optimization for the Wireless Charging System with LC-Series Compensating Topology [具有LC串联补偿拓扑结构的无线充电系统的约束效率优化]”, *Transactions of China Electrotechnical Society [电工技术学报]*, vol. 39, no. 6, 2024. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222371.
- [15] A.I. Tihonov, N.M. Laznikov, T.I. Zueva, “Primenenie pokazatelia stoimosti zhiznennogo tsicla innovatsionnogo izdeliia na aviapromy`shlennom predpriatii [Application of the life cycle cost indicator of an innovative product at an aircraft industrial enterprise]”, *Trudy MAI*, no. 70, pp. 24, 2013 (in Russian).
- [16] V.I. Bazhenov, S.E. Berezin, G.A. Samburskiy, “Metodika rascheta stoimosti zhiznennogo tsicla dlia oborudovaniia, sistem i sooruzheniy vodosnabzheniia i vodootvedeniia [Methodology for calculating life cycle costs for equipment, systems and structures of water supply and sanitation]”, *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniia i vodootvedeniia [Best available water supply and wastewater technologies]*, no. 4, pp. 34-41, 2017 (in Russian).

УДК 621.316.11

Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов, Е.В. Крюков, Д.А. Гусев

ИССЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ И ИСТОЧНИКОМ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Статья посвящена исследованию режимов работы распределительной электрической сети среднего напряжения при подключении ветроэнергетической установки (ВЭУ) и тиристорного регулятора напряжения (ТРН). Решается задача управления перетоком активной мощности при питании нагрузок от централизованной энергосистемы (ЦЭС) и ВЭУ. Для проведения исследований в программном комплексе *PSCAD* разработана имитационная модель участка электрической сети с ВЭУ и ТРН. Рассмотрены режимы работы сети при поперечном регулировании ТРН в режиме запаздывания выходного напряжения. Результаты исследования показали возможность управления ТРН перетоками активной мощности от ЦЭС и ВЭУ к нагрузке. Подключение ТРН к сети с распределенной генерацией на основе ВЭУ позволит управлять режимами работы сети, обеспечивая бесперебойность и эффективность электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: тиристорный регулятор напряжения, распределённая генерация, поперечное регулирование, имитационная модель.

Одним из главных приоритетов государственной энергетической политики Российской Федерации является развитие распределенной генерации (РГ) на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. Интеграция РГ в электроэнергетические системы (ЭЭС) позволяет повысить надёжность и эффективность электроснабжения потребителей. Ожидается, что в перспективе централизованные ЭЭС трансформируются в централизованно-распределённые энергосистемы [2]. При интеграции в распределительную электрическую сеть (РЭС) среднего напряжения энергоустановок РГ на базе ВИЭ со стохастическим характером выработки электроэнергии возникает необходимость активно-адаптивного управления перетоками мощности, обеспечивающего стабильность и качество электроснабжения потребителей.

Проблему управления перетоками мощности позволяет решить тиристорный регулятор напряжения (ТРН) [3], принцип действия которого состоит в автоматическом изменении с помощью вольтодобавки амплитуды выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (продольное регулирование) и угла фазового сдвига δ между $U_{\text{вх}}$ ($\delta_{\text{вх}}$) и $U_{\text{вых}}$ ($\delta_{\text{вых}}$) (поперечное регулирование). Регулирование амплитуды и фазы выходного напряжения ТРН позволяет изменять как величину, так и направление потоков активной и реактивной мощности [4].

Цель – исследование влияния поперечного регулирования ТРН на параметры электрической сети с РГ на основе ВИЭ.

Модуль поперечного регулирования реализует три режима: базовый (, без регулирования, $\delta = 0$); запаздывания (вектор $U_{\text{ВЫХ}}$ отстаёт по фазе от $U_{\text{ВХ}}$, $\delta_{\text{ВЫХ}} < \delta_{\text{ВХ}}$) и опережения (вектор $U_{\text{ВЫХ}}$ опережает по фазе от $U_{\text{ВХ}}$, $\delta_{\text{ВЫХ}} > \delta_{\text{ВХ}}$). Угол фазового сдвига при максимальном режиме составляет: $\delta = +5^\circ$ (режим опережения); $\delta = -5^\circ$ (режим запаздывания).

В работе рассматривается участок РЭС с ТРН и ВИЭ. Нагрузка получает питание как от ЦЭС, так и от ВИЭ (рис. 1).

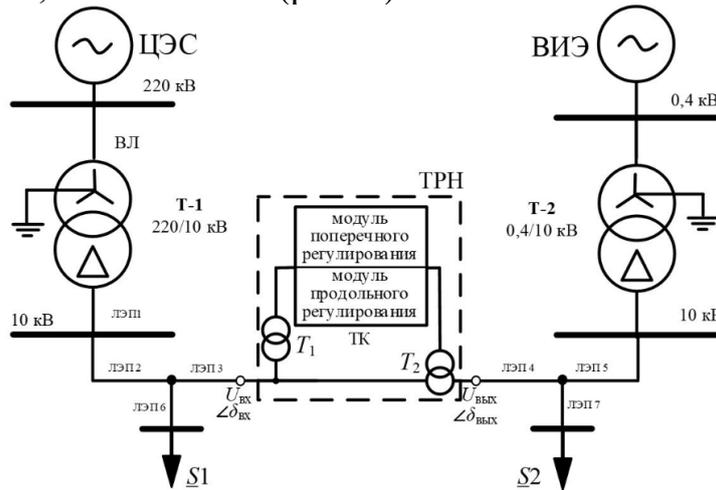


Рис. 1. Участок РЭС с ВИЭ и ТРН: T_1 и T_2 – шунтовый и серийный трансформаторы; S_1 , S_2 – нагрузка; ТК – тиристорный коммутатор

Для проведения исследований разработана PSCAD-модель участка РЭС, основными элементами которой являются ЦЭС, ветроэнергетическая установка (ВЭУ) с $P_{\text{НОМ}} = 6000$ кВт [5, 6], ТРН, нагрузка и ЛЭП (рис. 2). Параметры элементов РЭС и модель ВЭУ рассмотрены в [7]. Нагрузки S_1 и S_2 получают питание от ЦЭС и ВЭУ.



Рис. 2. PSCAD-модель участка РЭС с ВЭУ и ТРН: $S_{1\text{НОМ}} = 3510 + j1620$ кВ·А; $S_{2\text{НОМ}} = 3993 + j1722$ кВ·А

PSCAD-модель позволяет исследовать режимы электрической сети при работе модулей продольного и поперечного регулирования ТРН (рис. 3).



Рис. 3. *PSCAD*-модель ТРН: 1 и 4 – блоки шунтового и серийных трансформаторов; 2 и 3 – модули поперечного и продольного регулирования фаз *A*, *B* и *C* блока тиристорного коммутатора; 5 – панель управления режимами регулирования ТРН; 6 – измерительные приборы

На рис. 4 показан пример реализации блока тиристорного коммутатора для модуля поперечного регулирования (фаза *C*).

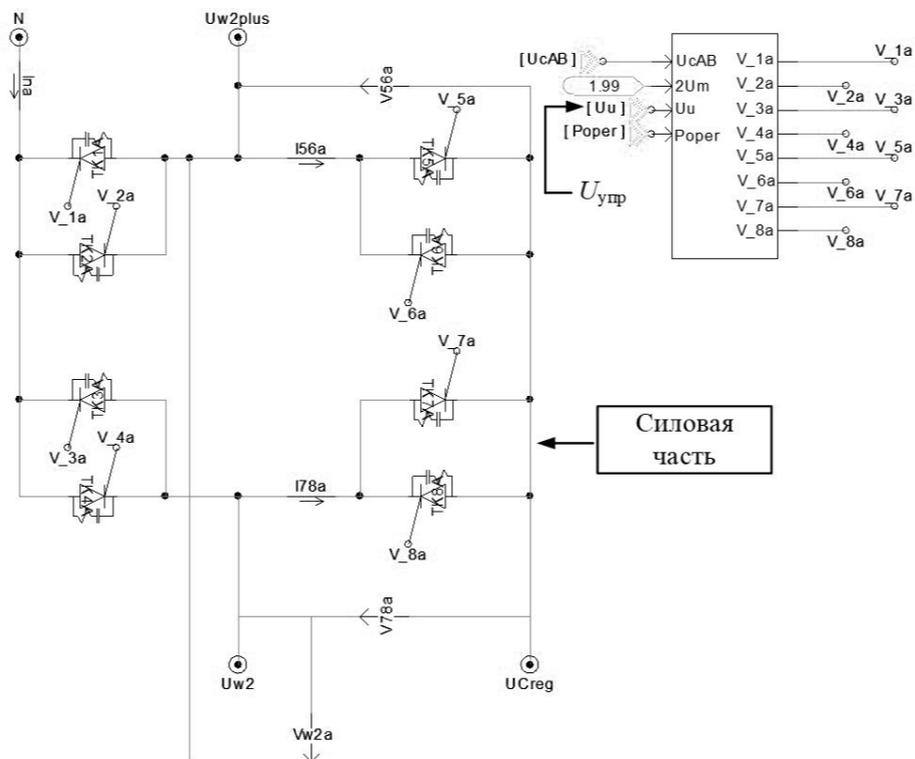


Рис. 4. Силовая часть блок тиристорного коммутатора ТРН модуля поперечного регулирования (фаза *C*) в *PSCAD*

Регулирование амплитуды и фазового сдвига напряжения реализуется с помощью напряжения управления $U_{упр}$, определяющего значение углов включения тиристоров α_1 и α_2 и изменяющегося в пределах от 0 до 2 отн.ед. ($U_{упр}=2$ – режим прямой передачи; $U_{упр}=0$ – максимальный режим регулирования). За базисное значение принята амплитуда опорного пилообразного напряжения схемы импульсно-фазового управления. Она предназначена для формирования импульсов включения тиристоров в моменты времени, соответствующие равенству напряжения управления и опорного напряжения.

На рис. 5 показаны результаты исследования режимов работы сети при поперечном регулировании ТРН в режиме запаздывания выходного напряжения (изменение активной мощности до и после регулирования ТРН, напряжения на входном и выходном зажимах ТРН).

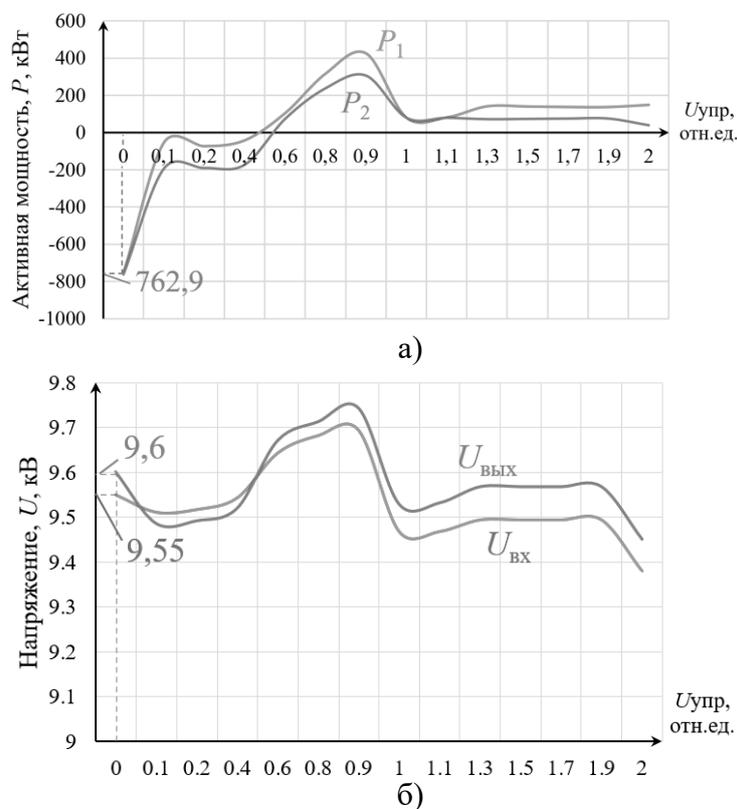


Рис. 5. Изменение величин (в режиме запаздывания выходного напряжения): а – активная мощность до P_1 и после P_2 регулирования ТРН; б – линейное напряжение на входном $U_{вх}$ и выходном $U_{вых}$ зажимах ТРН

При работе модуля поперечного регулирования в режиме запаздывания выходного напряжения в диапазоне $U_{упр}$ от 2 до 0,8 отн.ед. нагрузка S_2 получает питание как от ВЭУ, так и от ЦЭС (рис. 5, а). При $U_{упр}=0,5$ происходит изменение направления перетока активной мощности, передаваемой через ТРН. Напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$ изменяются незначительно (рис. 5, б).

На рис. 6 показано потокораспределение активной мощности по отношению к узлам нагрузки S_1 и S_2 при максимальном режиме регулирования ТРН.

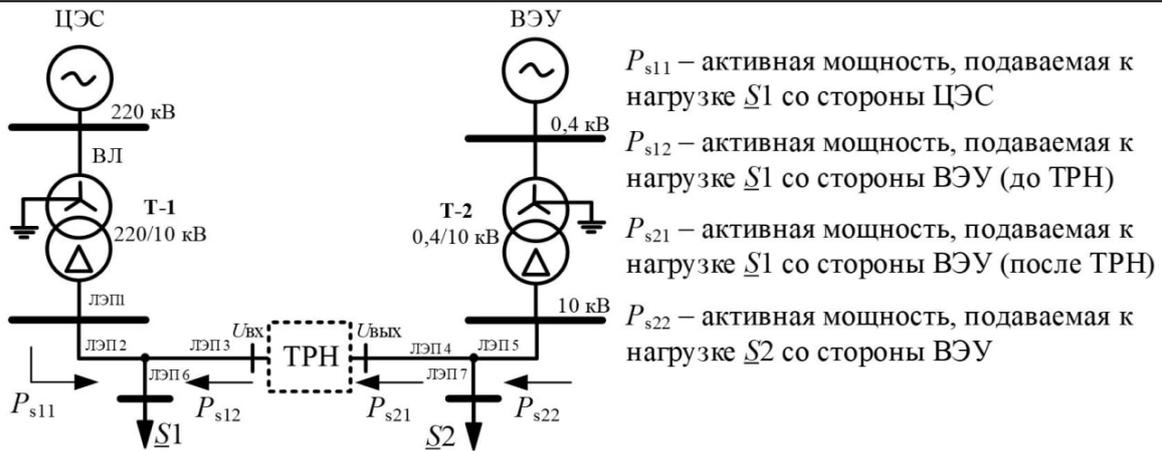


Рис. 6. Потокораспределение в электрической сети по отношению к узлам нагрузки $S1$ и $S2$

На рис. 7 приведены графики изменения перетоков активной мощности к $S1$ и $S2$ от ЦЭС и ВЭУ для режима запаздывания напряжения.

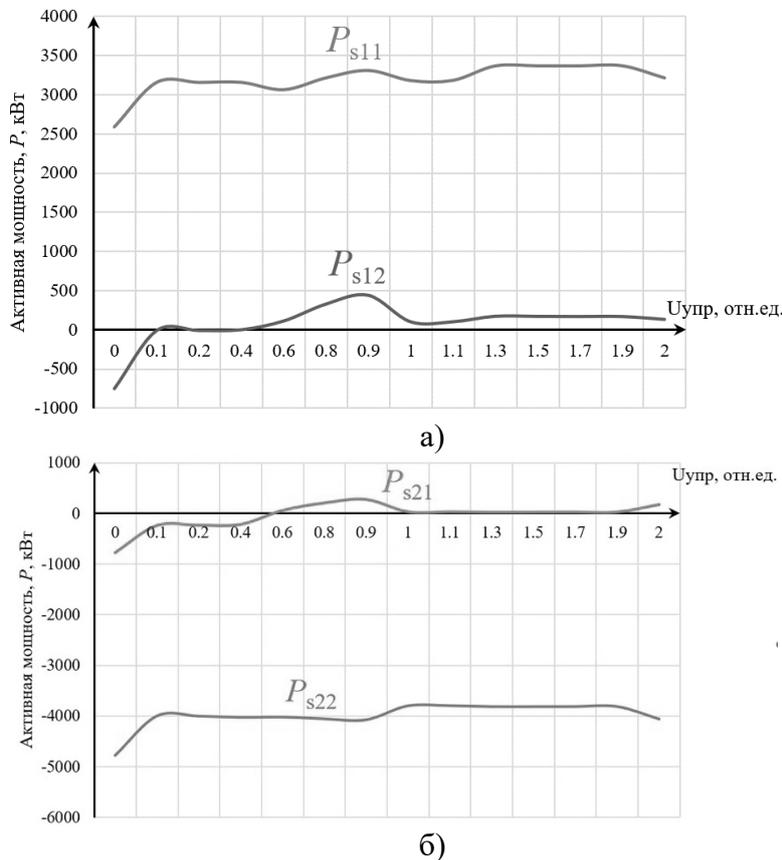


Рис. 7. Перетоки активной мощности от ЦЭС и ВЭУ к нагрузкам (в режиме запаздывания выходного напряжения): а – $S1$; б – $S2$

В базовом режиме нагрузка $S1$ питается от ЦЭС ($P_{s11} = 3318$ кВт) (рис. 7, а); нагрузка $S2$ в большей степени питается от ВЭУ ($P_{s22} = 4160$ кВт), также получает питание от ЦЭС ($P_{s12} = 170,9$ кВт) (рис. 7, б). Перераспределение активной мощности от источников (ЦЭС и ВЭУ) происходит за счёт изменения перетока

активной мощности от ВЭУ при $U_{\text{упр}}=0,5$ и дальнейшем увеличении значения активной мощности. При максимальном режиме регулирования ТРН снижается питание нагрузки $\underline{S1}$ от ЦЭС ($P_{s11} = 2592$ кВт) и повышается питание от ВЭУ ($P_{s12} = 745,4$ кВт) (рис. 7, а); нагрузка $\underline{S2}$ питается от ВЭУ ($P_{s22} = 4778$ кВт) (рис. 7, б).

Регулирование ТРН в режиме опережения выходного напряжения позволит обеспечить питание нагрузки $\underline{S1}$ от ЦЭС и снизить зависимость нагрузки $\underline{S2}$ от ВЭУ (при отсутствии ветра) за счёт изменения перетока активной мощности от ЦЭС.

Выводы. Результаты исследования режимов работы сети при поперечном регулировании ТРН в режиме запаздывания выходного напряжения показали возможность управления ТРН перетоками активной мощности и обеспечения питания нагрузки от источника РГ (ВЭУ).

Внедрение ТРН позволит обеспечить надёжность электроснабжения ответственных потребителей, также экономию электроэнергии за счёт перераспределения активной мощности и питания нагрузки от источника РГ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-29-00872, <https://rscf.ru/project/24-29-00872/>.

Библиографический список

1. Прогноз научно-технологического развития отраслей ТЭК России на период до 2035 года
2. **Подковальников, С.В.** Смена парадигмы управления электроэнергетическими системами // *Электричество*, 2024. – №3. – С. 4–15.
3. **Sosnina, E.,** Asabin, A., Kralin, A., Kryukov, E. Voltage Control with Thyristor-Regulated Booster Transformer // *International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Nagasaki, Japan, 2018. – P. 202-207.
4. **Sosnina, E.,** Bedretdinov, R., Kryukov, E., Gusev, D. Modes Investigation of the Electric Network Operating on the Energy Internet Principle // *2023 14th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Sousse, Tunisia, 2023. – P. 1-6.
5. **Рамадан, А.В.,** Елистратов В.В. Моделирование режимов работы сетевой ветроэнергетической установки с синхронным генератором на постоянных магнитах // *Электричество*, 2019. – № 7. – С. 11–22.
6. **Шатчилембе, В.Л.,** Фролов В.Я., Таджибаев А.И. Имитационное моделирование режимов работы ветроэлектростанции на базе трёхфазного синхронного генератора с постоянными магнитами // *Электричество*, 2024. – № 8. – С. 72–78.
7. **Бедретдинов, Р. Ш.,** Крюков Е.В., Гусев Д.А. Имитационная модель электрической сети с тиристорным регулятором мощности и возобновляемыми источниками энергии // *Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции*, 2023. – С. 342-349.

E.N. Sosnina, R.S. Bedretdinov, E.V. Kryukov, D.A. Gusev,

INVESTIGATION OF THE OPERATING MODES OF AN ELECTRIC NETWORK WITH DISTRIBUTED GENERATION AND A THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR

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

Abstract. The article discusses the operation of an electrical network with distributed generation (DG) – wind turbine (WT), using a Thyristor Voltage Regulator (TVR). To conduct research using the PSCAD software, a simulation model of a network with WT and TVR has been developed. A study of the network operation modes with the TVR quadrature regulation in the output voltage delay mode has been conducted. The research results showed the possibility of active power flows control to consumers from a traditional source and WT using TVR. The integration of TVR into the grid with a WT enables the regulation of network operations, ensuring reliable power supply to customers.

Key words: thyristor voltage regulator, distributed generation, in-phase regulation, simulation model.

References

- [1] Forecast of scientific and technical development of the fuel and energy complex of Russia for the period up to 2035.
- [2] S.V. Podkoyalnikov, A Paradigm Shift in the Management of Electric power systems // *Elektrichestvo*, 2024. – №3. – pp. 4–15.
- [3] E.N. Sosnina, A.A. Asabin, A.A. Kralin and E.V. Kryukov, Voltage Control with Thyristor-Regulated Booster Transformer // *International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Nagasaki, Japan, 2018. – pp. 202-207.
- [4] E. Sosnina, R. Bedretdinov, E. Kryukov and D. Gusev, Modes Investigation of the Electric Network Operating on the Energy Internet Principle // *2023 14th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Sousse, Tunisia, 2023. – pp. 1-6.
- [5] A.V. Ramadan, V.V. Elistratov, Simulation of the Operating Modes of a Network Wind Power Plant With a Synchronous Generator on Permanent Magnets // *Elektrichestvo*, 2019. – №7. – pp. 11–22.
- [6] V.L. Satchilembe, V.Y. Frolov, A.I. Tadzhibaev, Simulating the Operation Modes of a Wind Farm with a Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator // *Elektrichestvo*, 2024. – №8. – pp. 72–78.
- [7] R.S. Bedretdinov, E.V. Kryukov, D.A. Gusev, Simulation model of an electrical network with a thyristor power regulator and renewable energy sources // *Current problems of the electric power engineering: Collection of scientific and technical articles of the IX All-Russian (XLII regional) scientific and technical Conference*, 2023. – pp. 342-349.

УДК 004.032.26:621.352.6

А.В. Шалухо, И.А. Липужин, А.Н. Санников, Ю.Н. Шувалова

РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ НА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аннотация. Статья посвящена вопросам разработки рекуррентной нейронной сети для прогнозирования выходных характеристик топливных элементов при изменении внешних условий их работы. Разрабатываемая нейронная сеть предназначена для применения в интеллектуальных системах управления энергоустановками на топливных элементах и направлена на обеспечение адаптивности управления к изменяющимся температурным условиям окружающей среды.

Ключевые слова: топливные элементы, рекуррентная нейронная сеть, система управления, адаптивность.

Топливные элементы (ТЭ) относятся к ключевым технологиям водородной энергетики. Для повышения эффективности и надежности работы перспективным является объединение ТЭ с другими типами источников и накопителей электроэнергии в единую энергоустановку [1]. При этом требуется решение задачи оптимального распределения мощности между всеми входящими в состав энергоустановки источниками.

Особенность ТЭ заключается в том, что их выходные характеристики в процессе работы изменяются (обратимо или необратимо) под воздействием внешних и внутренних факторов. В результате реальная вырабатываемая мощность и потребление водорода ТЭ будут отличаться от предполагаемых (паспортных) значений. Если данные изменения не будут учтены при управлении энергоустановкой с ТЭ, это приведет к повышению расхода водорода, снижению времени автономной работы, а также может стать причиной полного отключения энергоустановки.

Перспективное решение данной проблемы связано с применением искусственных нейронных сетей (ИНС).

В настоящее время применение технологий ИНС активно рассматривается для решения ряда задач, связанных с прогнозированием характеристик ТЭ. Так, в [2] предложено использование ИНС для оценки производительности ТЭ. Разработанный алгоритм позволил получить лучшие результаты прогнозирования выходных характеристик по сравнению с использованием генетического алгоритма и алгоритмом роя частиц. В [3] рассматривается применение нейросетевых технологий для диагностики работы ТЭ. Предложенный подход связан с моделированием работы системы в различных режимах работы, которые позволяют

оценивать эффективность и степень деградации ТЭ. Точность полученных результатов составила 93%. Прогнозирование производительности ТЭ с помощью ИНС также представлено в [4]. Погрешность предложенного авторами метода составила 0,16-0,27% по сравнению с фактическими измеренными значениями.

Таким образом, анализ научных работ показал, что ИНС можно рассматривать в качестве эффективного подхода к прогнозированию изменения характеристик ТЭ, что, в свою очередь, позволит обеспечить адаптивность управления энергоустановками с ТЭ.

Целью данной работы является разработка и апробация ИНС для прогнозирования текущих характеристик ТЭ при изменяющейся температуры окружающей среды.

Алгоритм управления энергоустановкой на ТЭ с применением ИНС

Авторами предложен адаптивный алгоритм управления энергоустановкой с ТЭ (рис. 1).

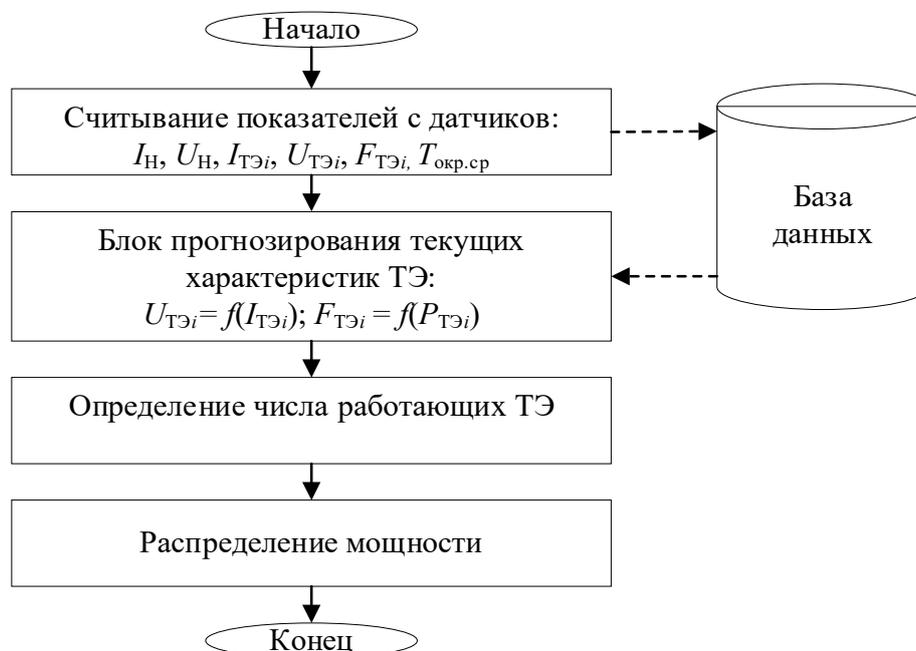


Рис. 1. Блок-схема адаптивного алгоритма управления энергоустановкой с ТЭ: I_n – ток нагрузки, U_n – напряжение нагрузки, $I_{TЭi}$ – ток i -го ТЭ, $U_{TЭi}$ – напряжение i -го ТЭ, $F_{TЭi}$ – расход i -го ТЭ, $T_{окр.ср}$ – температура окружающей среды

Распределение мощности между ТЭ, входящими в состав энергоустановки, осуществляется с учетом изменения их выходных характеристик. В Блоке прогнозирования текущих характеристик задаются выходные характеристики ТЭ с учетом изменений температуры окружающей среды. На основе этих характеристик определяется состав работающих, отключаемых, работающих на холостом ходу ТЭ и распределяется мощность нагрузки между ТЭ.

Для прогнозирования текущей характеристик ТЭ с учетом температуры окружающей среды (в данный момент времени) предложено использовать рекуррентную нейронную сеть (РНС).

Главной особенностью РНС является способность нейронов передавать информацию между слоями, что позволяет фиксировать и сохранять предыдущие состояния сети на определенном шаге. К преимуществам РНС относятся способность масштабирования и хорошая точность прогнозирования в задачах моделирования последовательных данных.

Для создания архитектуры РНС использованы библиотеки глубокого обучения на базе языка программирования Python.

Структура разрабатываемой РНС приведена на рис. 2.

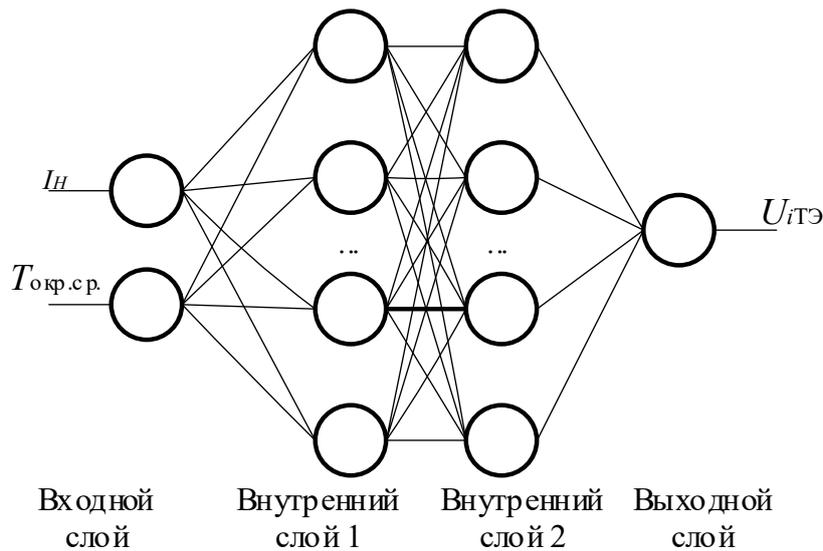


Рис. 2. Структура разрабатываемой РНС:

I_n – ток нагрузки, $T_{окр.ср.}$ – температура окружающей среды, $U_{iТЭ}$ – напряжение i -го ТЭ

РНС состоит из двух внутренних слоев. В качестве входных сигналов РНС используется ток нагрузки и температура окружающей среды, выходным сигналом является напряжение ТЭ.

Разработка математических и компьютерных моделей для обучения ИНС

В качестве объекта исследований был принят ТЭ с полимерной протонообменной мембраной мощностью 1 кВт. Обучение РНС основано на наборе данных, содержащих значения вольтамперных характеристик (ВАХ) ТЭ, которые соответствуют различным температурам. Для формирования обучающих данных на первом этапе разработана математическая модель, описывающая происходящие внутри ТЭ электрохимические процессы. Далее для оптимизации процесса сбора данных на основе математической модели в программе *Matlab R2020b* была разработана имитационная компьютерная модель.

Разработанная математическая модель описывает взаимосвязи между температурой окружающей среды и внутренней температурой ТЭ T , концентрацией кислорода CO_2 и влажностью мембраны.

Для определения напряжения ТЭ $U_{ТЭ}$ используется выражение:

$$U_{ТЭ} = (E_{Нернста} - U_{акт} - U_{ом} - U_{трансп}) \cdot n, \tag{1}$$

где $E_{\text{Нернста}}$ – потенциал Нернста, В; $U_{\text{акт}}$ – активационные потери, В; $U_{\text{ом}}$ – омические потери, В; $U_{\text{трансп}}$ – транспортные потери, В; n – количество мембранных электродных блоков, шт.

Уравнение для расчета потенциала Нернста получено из уравнения свободной энергии Гиббса, и позволяет определять потенциал ячейки при различных условиях [1]:

$$E_{\text{Нернста}} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln(P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{0.5}), \quad (2)$$

где E^0 – стандартный потенциал Нернста при нормальном давлении, В; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); F – постоянная Фарадея, Кл/моль; T – температура ТЭ, К; P_{H_2} – парциальное давление водорода, бар; P_{O_2} – парциальное давление кислорода, бар.

Активационные потери определяются как потери, необходимые для начала химической реакции между реагентами:

$$U_{\text{акт}} = \beta_1 + \beta_2 T + \beta_3 T \ln(C_{\text{O}_2}) + \beta_4 T \ln(i), \quad (3)$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – параметрические константы, C_{O_2} – концентрация кислорода, м³; i – ток, А.

Омические потери – это потери, обусловленные сопротивлением ТЭ:

$$U_{\text{ом}} = i \cdot R_{\text{ТЭ}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{ТЭ}}$ – сопротивление ТЭ, Ом, зависящее от влажности мембраны.

Транспортные потери связаны с концентрацией водорода и кислорода на аноде и катоде соответственно:

$$U_{\text{трансп}} = B \ln\left(1 - \frac{i}{i_{\text{max}}}\right), \quad (5)$$

где $B = RT/2F$ – константа, i_{max} – максимальный ток ТЭ, А.

В статье представлена часть разработанной математической модели (не приведены все взаимосвязи между входными и выходными параметрами РНС).

Обучение и тестирование ИНС

Для обучения РНС была сформирована база данных, содержащая 5 тысяч записей: значения напряжения, тока и температуры ТЭ. Исходные данные были разделены на обучающую и тестовую выборку в пропорции 75% и 25%, соответственно.

Для оценки точности прогнозирования РНС выбраны две метрики – среднеквадратичная ошибка (MSE) и средняя абсолютная ошибка (MAE).

MSE определяет среднеквадратичную разницу между прогнозируемыми значениями и фактическими значениями в наборе данных и рассчитывается по выражению:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2, \quad (6)$$

где MSE – среднеквадратичная ошибка, В²; y_i – фактическое значение, В; \hat{y} – абсолютная ошибка, В; n – число измерений, шт.

MAE показывает степень несоответствия между фактическими и прогнозируемыми значениями и вычисляется по следующей формуле:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}|}{n}, \quad (7)$$

где MAE – средняя абсолютная ошибка, В.

Результат обучения РНС на 500 эпохах приведен на рис. 3.

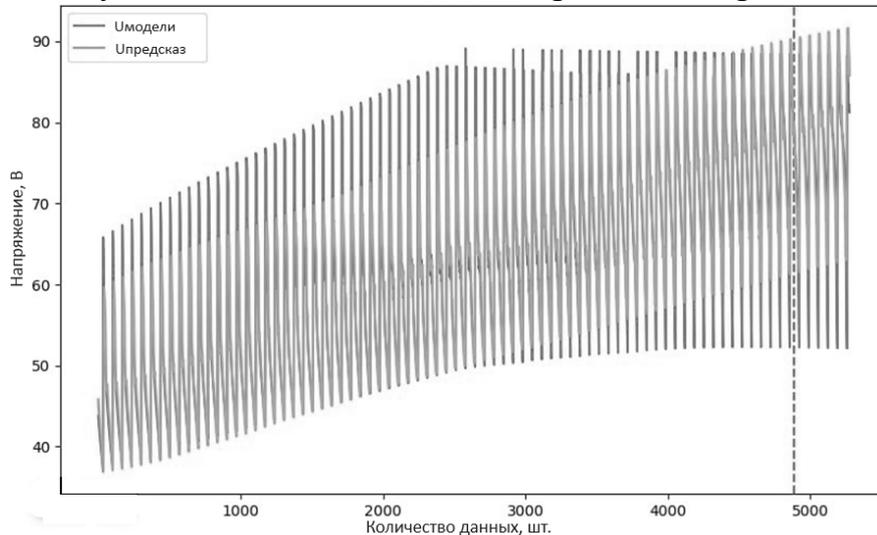


Рис. 3. Результат обучения РНС на основе 5 000 записей: $U_{\text{модели}}$ – напряжение ТЭ в обучающей выборке, В; $U_{\text{предск}}$ – напряжение ТЭ, предсказанное РНС, В

В результате тестирования значение MSE составило 116,61, а значение $MAE = 9,55$. Чем ближе значения обеих метрик к нулю, тем точнее результат прогнозирования. Исходя из результатов тестирования, для повышения точности прогнозирования исходная база данных была расширена до 15 тысяч измерений и дополнена дополнительным параметром – влажностью мембрано-электродного блока.

График обучения РНС на основе расширенной базы данных представлен на рис. 4.

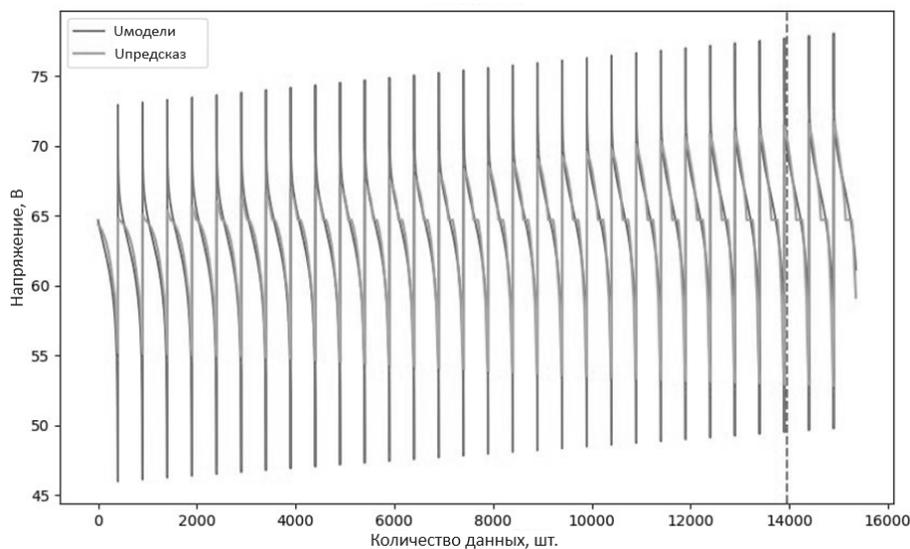


Рис. 4. Результат обучения РНС на основе 15 000 записей: $U_{\text{модели}}$ – напряжение ТЭ в обучающей выборке, В; $U_{\text{предск}}$ – напряжение ТЭ, предсказанное РНС, В

Из графика на рис. 4 видно, что экспериментальные значения фактически совпадают со значениями, прогнозируемыми РНС. Среднеквадратичная ошибка MSE в данном случае составила 1,16, а средняя абсолютная ошибка MAE равна 0,74, что свидетельствует о высокой степени обученности рекуррентной нейронной сети. Значения ВАХ, полученные с помощью математической модели, и ВАХ, предсказанные с помощью РНС, при различной температуре окружающей среды полностью совпали (рис. 5).

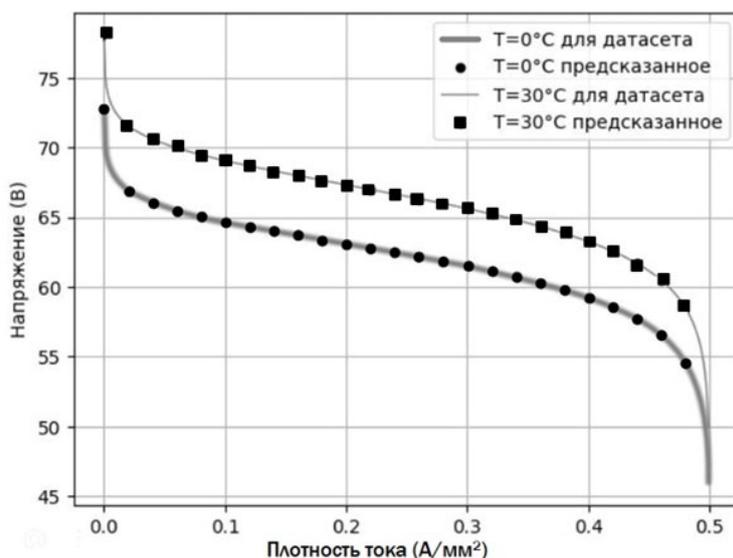


Рис. 5. Сравнение ВАХ

Таким образом, полученные результаты подтвердили перспективы применения разработанной РНС в системах управления энергоустановками с ТЭ. Дальнейшие исследования будут направлены на верификацию и доработку РНС с помощью физической модели энергоустановки и климатической камеры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00804, <https://rscf.ru/project/24-29-00804/>.

Библиографический список

1. **Бедретдинов, Р.Ш.** Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 47-58.
2. **Askarzadeh A., Rezazadeh A.** Artificial immune system-based parameter extraction of proton exchange membrane fuel cell // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2011. № 33(4). С. 933–938. doi: 10.1016/j.ijepes.2010.12.036.
3. **Гайсин Н.Р., Денисов Е.С.** Нейросетевая модель для диагностики критических режимов работы водородного топливного элемента // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 2020.
4. **Han I.-S., Chung C.-B.** Performance prediction and analysis of a PEM fuel cell operating on pure oxygen using data-driven models: A comparison of artificial neural network and support vector machine // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. № 41(24). С. 10202–10211. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.247.

A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, A.N. Sannikov, Y.N. Shuvalova

DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK CONTROL SYSTEM FOR A FUEL CELL POWER SYSTEM

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev

Abstract. The article is devoted to the development of a recurrent neural network for forecasting the output characteristics of fuel cells with changing external conditions of their operation. The neural network is designed for application in intelligent control systems for fuel cell power system and is aimed at ensuring control adaptability to changing environmental temperature conditions.

Key words: fuel cells, recurrent neural network, control system, adaptability.

References

- [1] Bedretdinov R.S. Economic assessment of the effectiveness of the use of a hybrid energy complex based on hydrogen // Intelligent electrical engineering. 2021. No. 4. pp. 47-58.
- [2] Askarzadeh A., Rezazadeh A. Artificial immune system-based parameter extraction of proton exchange membrane fuel cell // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2011. № 33(4). С. 933–938. doi: 10.1016/j.ijepes.2010.12.036.
- [3] Gaisin N.R., Denisov E.S. Neural network model for diagnostics of critical modes of operation of a hydrogen fuel cell // Information technologies in electrical engineering and electric power industry: materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference, Cheboksary, 2020.
- [4] Han I.-S., Chang S.-B. Performance prediction and analysis of a PEM fuel cell operating on pure oxygen using data-driven models: A comparison of artificial neural network and support vector machine // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. № 41(24). С. 10202–10211. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.247.

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

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

Редактор **О.В. Пугина**
Компьютерный набор и верстка **А.В. Смирнова**

Подписано в печать 04.12.2024. Формат 60 x 84^{1/16}.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 25,75.
Тираж 30 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.