

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***

Нижний Новгород 2022

**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, 2022. –  
284 с.

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

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

В сборник включены материалы VIII Всероссийской (XLI 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**,  
проф. **В.Г. Титов**, проф. **А.И. Чивенков**,  
доц. **Е.В. Бычков**, доц. **А.А. Кралин**, доц. **А.А. Севостьянов**,  
доц. **Е.В. Крюков**

**УДК 550.534.524**

**ISBN 978-5-502-01587-5**

**© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2022**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....</b>	<b>6</b>
Алешин Д.А. Оптимизация алгоритмов управления двухканальным безмостовым выпрямителем.....	6
Кравчук А.А., Гаврилова С.В. Разработка устройства плавного пуска электропривода горизонтального перемещения.....	12
Кралин Ал.А., Крюков Е.В., Кралин Ан.А. Моделирование катушки с ферромагнитным сердечником в SIMULINK.....	19
Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Кудряшов Д.А. Магнитоэлектрический генератор для регулирования скорости перемещения регулирующего органа ядерного реактора .....	25
Ступин Н.Е., Ваняев В.В. Лабораторный стенд «Активный выпрямитель напряжения».....	31
Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Трехфазный бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты.....	37
Таболин И.И., Кузьменко Р.Ю., Данилов А.Д. Выбор технического решения регулятора мощности солнечной батареи для аппаратуры регулирования и контроля бортовой сети комического аппарата.....	44
Ульянов Д.А., Вихорев Н.Н. Анализ коммутационных процессов в гибридном источнике бесперебойного питания.....	50
<b>Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....</b>	<b>57</b>
Абузьяров Т.Х. Анализ гармонического состава потребляемого тока двойной инверторной системы в составе шагового электропривода.....	57
Андрюхин М.В., Серов А.В., Титов В.Г. Оптимизация контуров регулирования электропривода с помощью инструмента MATLAB SIMULINK.....	64
Беленов Д.А., Багрянцев И.А., Мещеряков В.Н. Уменьшение токов и моментов при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором путем очередной подачи фазных напряжений.....	74
Бердников И.Е., Слuzов А.П., Смирнов С.А., Соколов В.В. Тяговый электропривод на базе вентильного двигателя с микропроцессорным управлением.....	80
Гордеев Б.А., Ермолаев А.И., Охулков С.Н., Плехов А.С., Степанов К.С. Измерение угловой деформации вращающихся валов ультразвуковым измерителем вибрации.....	87
Гордеев Б.А., Ермолаев А.И., Плехов А.С., Титов Д.Ю. Стенд для испытаний управляемых магнитореологических муфт.....	98
Дарьенков А.Б., Бердников И.Е., Слuzов А.П., Соколов В.В. Технические решения и схемотехника модуля дискретного выхода для устройств АСУТП на отечественной элементной базе .....	103
Дмитриева В.В., Дзюин Д.В. Анализ, моделирование и синтез управления многодвигательной электромеханической системой технологической установки подачи воды теплоэлектростанции.....	110
Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Стеклов А.С. Применение системы Такаги-сугено-канга для оценки условий работы фотоэлектрических преобразователей..	117
Ребенков Е.С., Майорова Н.Д. Формула передаточной функции скоростей многомассового многодвигательного частотного электропривода.....	123

<b>Слядзевская К.П., Мотина О.А.</b> Оптимизация контура скорости электропривода по схеме «ШИП – ДПТ НВ» в соответствии с нормированной стандартной передаточной функцией разомкнутой системы.....	128
<b>Федотов В.В., Рожков В.В.</b> Оптимизация структуры векторного частотно-токового управления следящим асинхронным электроприводом.....	133
<b>Секция 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....</b>	141
<b>Альшахери А.М.</b> Решение проблемы защиты распределительной сети 6-35 кВ микрогрид за счет автоматизации расчёта параметров срабатывания .....	141
<b>Бирюлин В.И., Куделина Д.В.</b> Расчетная модель определения срока службы изоляции при несинусоидальных токах .....	146
<b>Заславский И.С., Воронин В.А.</b> Использование авторегрессионных моделей для прогнозирования электрических нагрузок угольных шахт.....	154
<b>Крюков А. В., Середкин Д. А., Фесак И. А.</b> Моделирование электромагнитных полей трехфазных тяговых сетей с учетом гармонических искажений.....	160
<b>Кузьменко Р.Ю., Таболин И.И., Данилов А.Д.</b> Проблемы мажоритирования сигналов в микроконтроллерном модуле управления зарядно-разрядным устройством.....	166
<b>Лахлах М.Х., Чо Г.Ч.</b> Расчет коммутационных перенапряжений при синхронизированном включении высоковольтной кабельной линии .....	174
<b>Лоскутов А.А., Петров И.А.</b> Функциональные испытания терминала токовой защиты SPAC 801 с применением программно-аппаратного комплекса RTDS NOVACOR.....	183
<b>Малофеев И. В.</b> Использование интеллектуальных приборов учета в сетях 0,4 кВ МКД.....	194
<b>Ситников С.А., Шайтор Н.М.</b> Совершенствование устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования за счет применения органа сопротивления.....	198
<b>Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ.....</b>	209
<b>Бурмакин О.А., Гуляев В.В., Андреев Г.А., Крупин К.А.</b> Модель электроэнергетической системы в среде MATLAB SIMULINK.....	209
<b>Мицкевич Р.В., Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Рудник В.Е.</b> Анализ устойчивости системы автоматического управления на основе свободно конфигурируемой структуры виртуального синхронного генератора .....	218
<b>Мицкевич Р.В., Рубан Н.Ю.</b> Оценка эффективности применения способа разгрузки оборудования и накопителей энергии для обеспечения участия фотоэлектрических электростанций в процессе регулирования частоты.....	225
<b>Петрицкий С.А., Шалуха А.В., Бедретдинов Р.Ш., Шароватов Р.А.</b> Разработка системы эксплуатационной безопасности для энергетического комплекса на основе водородных топливных элементов .....	232
<b>Разживин И.А., Мицкевич Р.В., Космынина Н.М.</b> Анализ эффективности системы согласования управления суперконденсатором и кинетической энергией ветроэнергостановок для обеспечения частотного отклика.....	241
<b>Рудник В.Е., Разживин И.А., Космынина Н.М., Литвинов С.А.</b> Особенности управления солнечной электростанцией в сетях с низкой инерцией.....	248

---

<b>Сахиб Д.А.</b> Обзор проблемы использования цифровой релейной защиты (РЗ) для электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии.....	253
<b>Хватов О.С, Кобяков Д.С.</b> Варианты структуры регулятора оборотов асинхронной дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения .....	258
<b>Шалухо А.В., Бедретдинов Р. Ш., Липужин И.А., Шувалова Ю.Н.</b> Исследование работы низкотемпературного топливного элемента с полимерной протонообменной мембраной.....	264

---

---

**Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

---

УДК 621.314

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_6

Д.А. Алешин

**ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ  
ДВУХКАНАЛЬНЫМ БЕЗМОСТОВЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ**Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексева

**Аннотация:** В статье рассмотрены структура двухканального безмостового выпрямителя и принципы управления силовыми ключами. Приведены осциллограммы работы и тока накопительного дросселя при синхронном и раздельном управлении каналами выпрямителя. Представлены выводы и рекомендации к способу управления двухканальным безмостовым выпрямителем.

**Ключевые слова:** однофазные выпрямители, корректоры коэффициента мощности, безмостовые выпрямители, синусоидальный потребляемый ток, инвертирующий преобразователь.

С ростом потребителей постоянного тока из-за увеличения количества ЭВМ, офисной техники и импульсных преобразователей остро встал вопрос, связанный с минимизацией негативного влияния выпрямительных устройств с промежуточным емкостным фильтром на питающую сеть. В качестве решения проблемы, помимо традиционной пассивной фильтрации, широкое распространение получили активные фильтры на базе полупроводниковых приборов [1]. Примером описанных устройств является корректоры коэффициента мощности (ККМ) [2,3]. ККМ потребляют из питающей сети активный квазисинусоидальный ток с малым коэффициентом нелинейных искажений. Однако у типовых корректоров коэффициента мощности существуют недостатки, которые ограничивают их использование. Наиболее распространенный изъян - отсутствие общей нейтрали питающей сети и нагрузки из-за использования входного диодного моста, вследствие чего человек, работающий с нагрузочной частью оборудования, может оказаться под электрическим потенциалом, опасным для жизни.

Существует отдельная категория ККМ, у которых присутствует общая нейтраль - безмостовые выпрямители [4,5]. Одним из них является двухканальный безмостовой выпрямитель, представленный на рис. 1, который содержит в своем составе два инвертирующих конвертера, работающих каждый в свой полупериод питающего напряжения, и формирующих квазисинусоидальный ток потребления за счет алгоритмов управления силовыми транзисторными ключами [6,7].

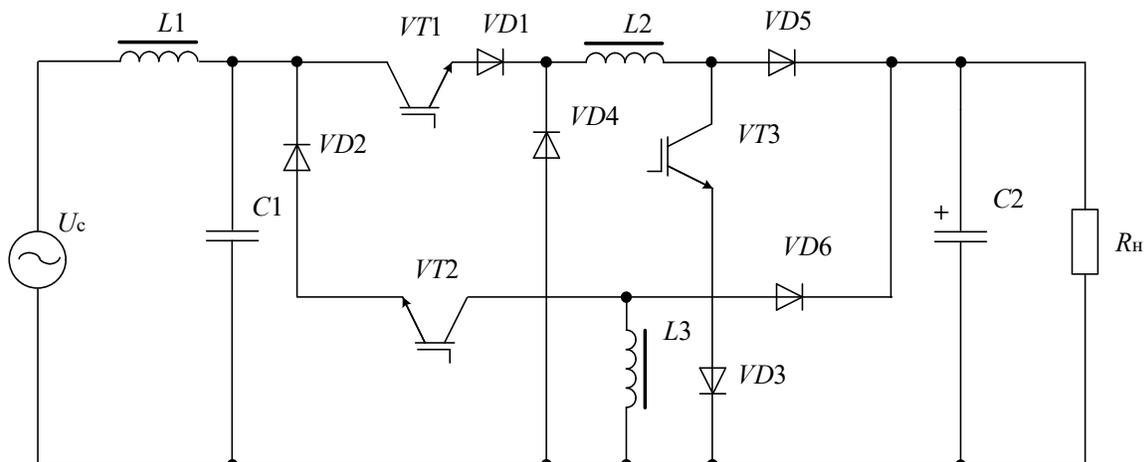


Рис. 1. Двухканальный безмостовой выпрямитель

Для отработки алгоритмов работы и оптимизации параметров элементов устройства была разработана имитационная модель преобразователя, представленная на рис. 2.

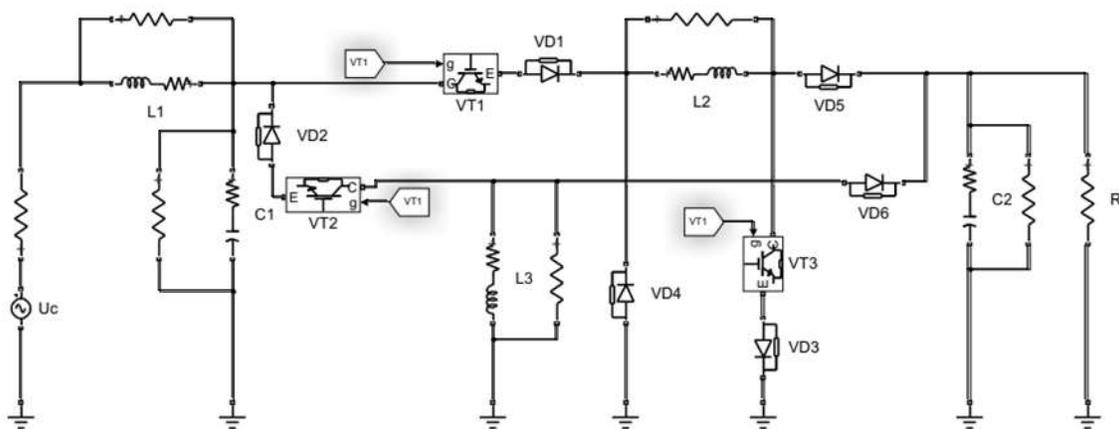


Рис. 2. Имитационная модель двухканального безмостового выпрямителя

Параметры элементов модели:

Входной фильтр:  $L1 = 3,3$  мГн,  $C1 = 0,33$  мкФ.

Накопительные дроссели:  $L2 = L3 = 0,1$  мГн.

Выходной емкостной фильтр  $C2 = 2$  мФ.

Мощность нагрузки 2 кВт с выходным напряжением 200 В.

Частота коммутации силовых ключей– 33 кГц

Каждому реактивному элементу параллельно подключен высокоомный резистор.

На рис. 3 и 4 приведены графики изменения входного напряжения и потребляемого из сети тока.

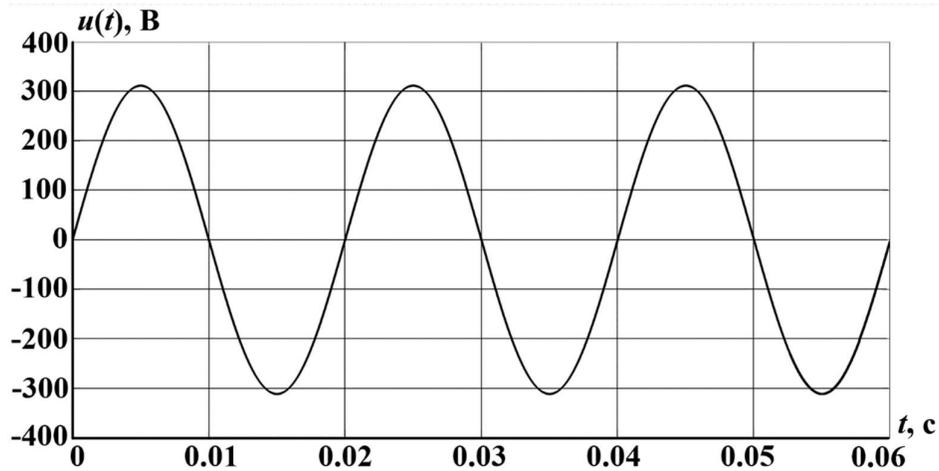


Рис. 3. График изменения входного сетевого напряжения

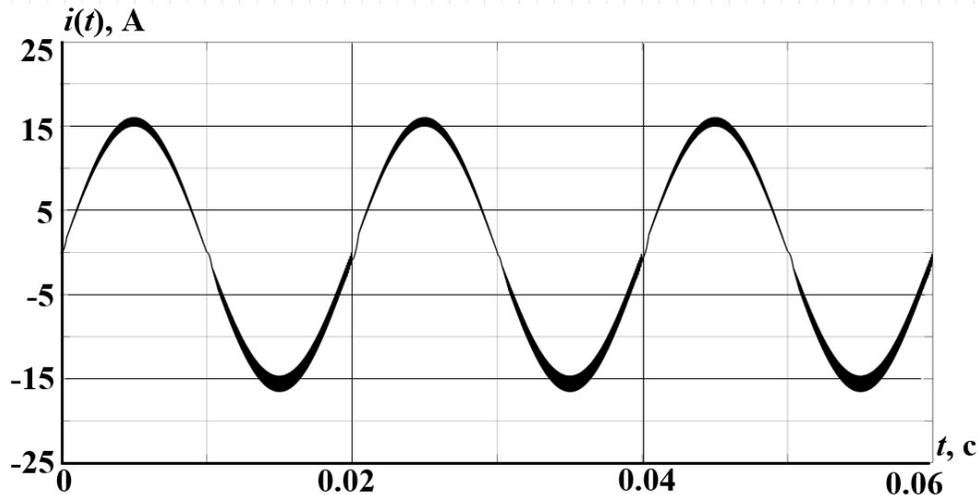


Рис. 4. График изменения потребляемого из сети тока

Как видно из графиков, форма тока повторяет форму входного напряжения, однако ток содержит высокочастотную составляющую из-за работы силовых ключей. Уменьшение величины этой составляющей осуществляется с помощью применения входного  $LC$ -фильтра.

Стоит также отметить, что фазовый угол напряжения совпадает с фазовым углом тока, следовательно, реактивная мощность, потребляемая из сети, стремится к нулю.

Однако при всех преимуществах двухканального безмостового выпрямителя существует проблема при синхронном управлении силовыми ключами. Под синхронным управлением подразумевается одновременная подача импульсов управления на все три транзисторных ключа. Данный способ не приводит к аварийным режимам, поскольку существует токовая развязка, обеспеченная диодами, которые разграничивают ток сети и ток нагрузки. Но в момент функционирования конвертора, работающего в отрицательный полупериод питающего

напряжения, через накопительный дроссель  $L2$  (относящейся к конвертеру, работающему в положительный полупериод) протекает ток (рис. 5). Ток начинает нарастать в момент, когда напряжение дросселя  $L1$  по величине достигает напряжения выходного емкостного фильтра  $C2$ , и начинает спадать, когда транзисторные ключи закрываются.

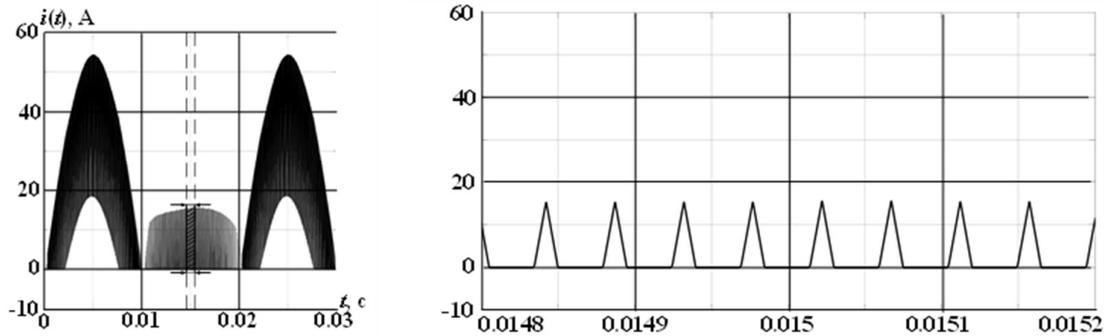


Рис. 5. График изменения тока накопительного дросселя  $L2$

Решением проблемы является разделение импульсов управления по полупериоду, что приводит к несущественному усложнению системы управления. Дополнительный измерительный прибор не требуется, поскольку в составе устройства находится датчик напряжения, измеряющий входное напряжение преобразователя. График изменения тока накопительного дросселя  $L2$  при раздельном управлении представлен на рис. 6.

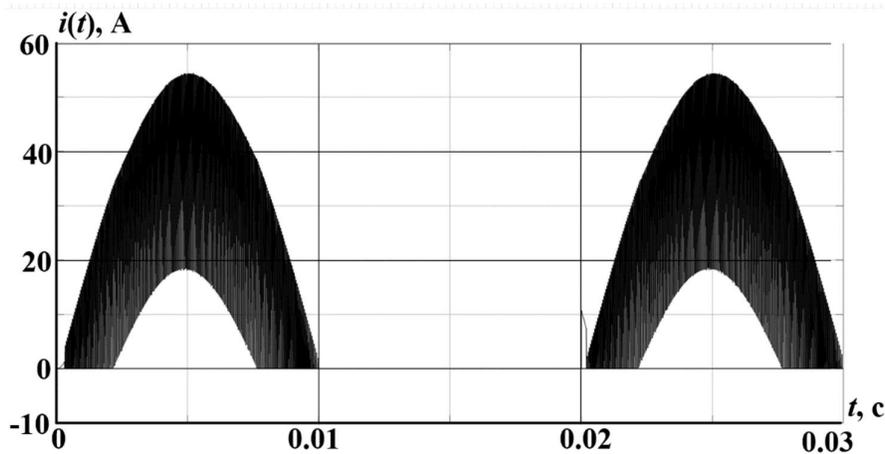


Рис. 6. График изменения тока накопительного дросселя  $L2$  при раздельном управлении

В ходе моделирования были получены энергетические характеристики преобразователя, а именно: КПД; коэффициент нелинейных искажений (КНИ); коэффициент пульсаций выходного напряжения (К.П.); постоянная составляющая потребляемого тока ( $I_0$ ). Данные представлены в табл. 1 для двух способов управления.

Таблица 1

## Энергетические показатели преобразователя при различных способах управления

Способ управления	КПД, %	КНИ, %	К.П., %	$I_0$ , А
Симметричный	96,6	5,64	4,32	0,13
Несимметричный	96,3	5,84	4,21	0,12

Проанализировав таблицу, можно сказать, что изменение показателей не существенное. Практически все величины отличаются на десятые доли процента. Но поскольку трудозатраты для осуществления разделения импульсов управления каналов преобразователя малы, оптимальным решением является использования отдельного способа управления.

## Библиографический список

1. **Мелешин, В.И.** Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. - М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
2. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. - М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
3. **Моин, В.С.** Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с
4. **Кук, С.** Безмостовой преобразователь корректора коэффициента мощности с КПД до 98% и КМ 0,999 // Электронные компоненты №8, 2010. – 45-50 с.
5. **Fardoun, A. A.** A bridgeless resonant pseudo boost PFC rectifier / A. A. Fardoun, E. H. Ismail, M. A. Al-Saffar, A. J. Sabzali // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, Nov. 2014. - pp. 5949-5960.
6. **Алешин, Д.А.** Двухканальный безмостовой выпрямитель / Д.А. Алешин, Н.Н. Вихорев // Интеллектуальная электротехника, 2019. - 91-99 с.
7. **Чивенков, А.И.** Two-Channel Bridgeless Power Factor Corrector / А.И. Чивенков, Ю.Ф. Вагапов, Д.А Алешин // *Электричество* №3, 2022. - 22–29 с.

D.A. Aleshin

## OPTIMIZATION OF CONTROL ALGORITHMS TWO-CHANNEL BRIDGELESS RECTIFIER

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

**Abstract:** The article considers the structure of a two-channel bridgeless rectifier and the principles of power switch control. Oscillograms of the operation and current of the storage inductor are given for synchronous and separate control of the rectifier channels. Conclusions and recommendations for the method of controlling a two-channel bridgeless rectifier are presented.

**Key words:** single-phase rectifiers, power factor correctors, bridgeless rectifiers, sinusoidal current consumption, inverter converter.

### References

- [1] V.I. Meleshin, D.A. Ovchinnikov, “Upravlenie tranzistornimi preobrazovatelymi electroenergii [Control of transistorized power converters]”, Moscow: Technosfera, 2011, pp. 576 (in Russian).
- [2] V.I. Meleshin, “Tranzistornay preobrazovatel'nay tehnika [Transistor converter technology]”, Moscow: Technosfera, 2005, pp. 632 (in Russian).
- [3] V.S. Moin, “Stabilizirovannii tranzistornii preobrazovately [Stabilized transistor converters]”, Moscow: Energoatomizdat, 1984, pp. 376 (in Russian).
- [4] C. Kuk, “Bezmostovoi preobrazovatel korrektora koefficienta mozhnosti s KPD do 98% I KM 0,999 [Bridgeless power factor corrector converter with efficiency up to 98% and PF 0.999]”, *Electronnie componenti [Electronic components]*, 2010, pp 45 - 50 (in Russian).
- [5] Fardoun A. A., Ismail E. H., Al-Saffar M. A., Sabzali A. J. A bridgeless resonant pseudo boost PFC rectifier // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, Nov. 2014. - pp. 5949-5960.
- [6] D.A. Aleshin, N.N. Vihorev, “Dvuhkanalnii bezmostovoi viprymitel [Two-channel bridgeless rectifier]”, *Intelectualnay electrotehnika [Smart Electrical Engineering]*, 2019, pp 91 - 99 (in Russian).
- [7] A.I. Chivenkov, U.F. Vagapov, D.A. Aleshin, Two-Channel Bridgeless Power Factor Corrector, *Electrichestvo [Electricity]* №3, 2022, pp 22-29 (in Russian).

УДК 621.3.077

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_12

**А.А. Кравчук, С.В. Гаврилова****РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ**

Ульяновский государственный технический университет

**Аннотация:** В статье рассмотрены разработанные авторами научно-технические решения по реализации плавного пуска электропривода горизонтального перемещения. Приведены схемы и математическое описание рассматриваемой системы.

**Ключевые слова:** электропривод, горизонтальное перемещение, грузоподъемное оборудование.

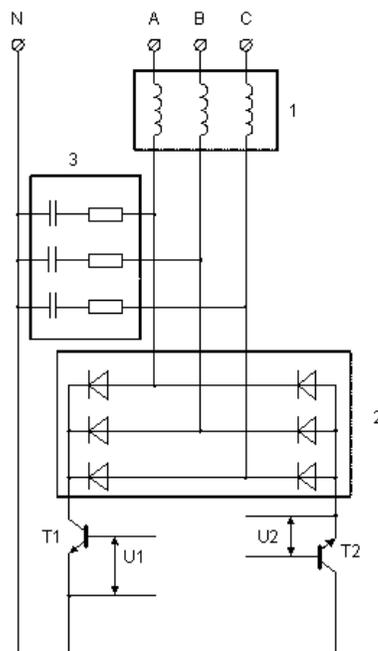
Ликвидация ручных погрузочно-разгрузочных работ, исключение тяжелого ручного труда при выполнении основных и вспомогательных производственных операций являются неотъемлемыми составляющими научно-технического прогресса. Автоматизация современного производства, подразумевающая использование современных поточных технологических и автоматизированных линий, непосредственно связана с использованием разнообразных грузоподъемных механизмов. Поэтому применение данного оборудования во многом определяет эффективность современного производства, а уровень механизации технического производства – степень совершенства и производительность предприятия. Высокой интенсивности производства невозможно добиться без использования эффективных и надежных средств транспортировки материалов и готовой продукции. В каждом рабочем цикле имеют место неустановившиеся режимы работы электропривода: пуски, реверсы, торможения, оказывающие существенное влияние на производительность механизма, на КПД установки и на ряд других факторов. Все эти условия предъявляют к электроприводу сложные требования в отношении надежности и безопасности. Развитие грузоподъемного машиностроения связано с созданием качественно новых видов подъемно-транспортных машин и механизмов, модернизацию уже имеющихся, повышение грузоподъемности и надежности машин при одновременном значительном снижении их металлоемкости, увеличение производительности оборудования благодаря применению широкого регулирования скоростей механизмов, увеличение области применения машин непрерывного транспортирования путем расширения нормальных рядов машин как в направлении создания мощных и сверхмощных машин (в том числе конвейеров для транспортирования сыпучих грузов на расстояние, превышающее 100 км), так и в направлении создания машин легкого и особо легкого типов (подвесные конвейеры). Одним из разновидностей подъемно – транспортными машин является краны мостового типа.

Важнейшим элементом электрооборудования подъемно-транспортных машин является электрический двигатель. Он имеет значительные преимущества

перед двигателями других типов: возможность выбора мощности в широком диапазоне; сближение с механизмом; получение требуемого диапазона частот вращения с плавным регулированием и осуществление автоматизации производственного процесса простыми средствами; быстрота пуска и остановки; большой срок службы; простота в ремонте и эксплуатации.

Для многих электроприводов является существенным учет колебаний звеньев, соединенных гибкими и упругими связями. Так, электропривод крановой тележки должен не только выполнить перемещение груза массы  $m$  на расстояние  $L$  за время  $T$ , но и обеспечить, гашение колебаний груза, т. е. обеспечить чтобы при  $t \geq T$  и скорость груза, и его отклонение от вертикали обращались бы в нуль; в противном случае требуется время для затухания колебаний и быстродействие привода будет снижено[1].

Для обеспечения управляемого подъема и перемещения необходимо использовать регулируемый ЭП с возможностью торможения. Одним из вариантов является использование транзисторного регулятора напряжения (ТрРН) [3], принципиальная схема которого приведена на рис.1. Входное переменное напряжение поступает через обмотки статора двигателя на трехфазный выпрямительный мост, полярные выходы которого через транзисторы Т1 и Т2, работающие в ШИМ-режиме, подключены к нулевому проводу питающего напряжения.



**Рис. 1. Схема транзисторного регулятора напряжения:**

1 - обмотки статора двигателя, 2 - трехфазный выпрямительный мост, 3 - RC-цепи

Точки подключения обмоток статора к трехфазному выпрямительному мосту подключены также к нулевому проводу через RC-цепи. Предлагаемая схема уменьшает бросок тока за счет плавного наращивания напряжения на статорных обмотках по требуемому закону.

При синхронных и равных по длительности сигналах ШИМ осуществляется плавный пуск. При синхронных и не равных по длительности сигналах осуществляется динамическое торможение. RC цепи служат для снижения коммутационных перенапряжений.

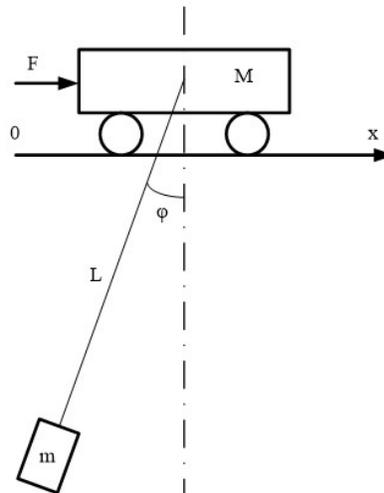
Использование предлагаемого транзисторного регулятора напряжения позволяет осуществлять плавный пуск и динамическое торможение асинхронного электродвигателя. Плавное нарастание и снижение скорости на механизме перемещения позволяет избежать раскачивания груза.

В модели системы управления приводом перемещения электрической тали (ЭТ) применяется механическая система, представленная структурной схемой (рис. 2).

Динамика предлагаемой системы описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} - mL(\ddot{\phi} \cos \phi - \dot{\phi}^2 \sin \phi) + k_{\text{ТР}2}\dot{x} = F(t, \phi, \dot{\phi}, x, \dot{x}) \\ mL^2\ddot{\phi} - mL\ddot{x} \cos \phi + mgL \sin \phi + k_{\text{ТР}1}^*\dot{\phi} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x(t)$  – закон движения тележки;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $k_{\text{ТР}1}, k_{\text{ТР}2}$  – коэффициенты трения.



**Рис. 2. Механическая система привода перемещения**

$M$  – масса тележки,  $m$  – масса груза,  $L$  – длина подвеса,  $F$  – сила, приложенная к тележке, она опосредовано зависит от  $\phi, \dot{\phi}, x, \dot{x}$ , между ними существует обратная связь,  $\phi$  – угол смещения груза от вертикали

В линейной постановке уравнения динамики системы примут вид:

$$\begin{cases} (M + m)\dot{V} - mL\ddot{\phi} + k_{\text{ТР}2}V = F(t) \\ L\ddot{\phi} - \dot{V} + g\phi + k_{\text{ТР}1}^*\dot{\phi} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_{\text{ТР}1} = k_{\text{ТР}1}^*/mL$ .

В целях создания замкнутой системы управления используем датчики ускорения и момента. Особенностью предлагаемой схемы является использование

вычислителя угла отклонения по сигналам указанных датчиков. Для этого используем формулу:

$$\bar{F} - (M + m)\bar{V}p = -mL\bar{\phi}p^2. \quad (3)$$

Передаточная функция  $W_X(p)$  цепи от  $F$  до  $\dot{V}$  имеет вид:

$$W_X(p) = \frac{1}{M} \frac{g + K_{TP1}p + Lp^2}{\alpha g + \alpha K_{TP1}p + Lp^2}, \quad (4)$$

где  $\alpha = 1 + \frac{m}{M}$ ;  $p$  – параметр преобразования Лапласа.

На основе выражения (3) была разработана схема нахождения угла  $\phi$  (рис. 3).

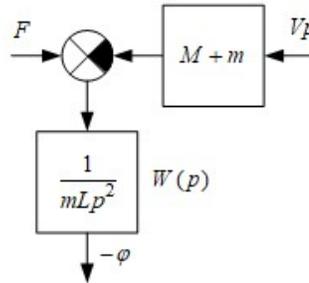


Рис. 3. Структурная схема вычислителя угла

Наличие интегрирующего звена второго порядка в  $W(p)$  (рис.3) может привести к накоплению ошибки в процессе работы. Поэтому заменяем его на апериодическое звено второго порядка.

$$W'(p) = \frac{K_1}{(T_1p + 1)^2}. \quad (5)$$

Выбор элементов  $K_1$  и  $T_1$  апериодического звена в структуре (рис. 3.) необходимо производить из условий наибольшего приближения его динамических свойств к характеристикам интегрирующего звена. В качестве критерия идентичности можно принять совпадение амплитудно-частотных характеристик в окрестности частоты среза [2]. Приравнивая частоты среза в обоих случаях, получим условия для выбора параметров модели.

В формуле (5)  $K_1$  и  $T_1$  выбираются из условия совпадения ЛАХ  $W(p)$  и  $W'(p)$  в области частоты среза.

$$K_1 = \frac{T_1^2}{mL} \quad (6)$$

Оценим чувствительность вычисленного сигнала  $\phi$  к изменениям  $m$  и  $L$ . Расчетное выражение для  $W_\phi(p)$  при условии, что при перемещении масса тележки  $M$  не изменяется, принимает вид:

$$W_\phi(p) = \frac{mVp}{(\sqrt{mL}p + 1)^2}. \quad (7)$$

Для получения функций чувствительности воспользуемся формулой:

$$S_X^{W_X} = \frac{dW_X(p)}{dX} \frac{X}{W_X(p)}, \quad (8)$$

где  $W_X(p)$  – передаточная функция звена;  $X$  – параметр передаточной функции;  $S_X^{W_X}$  – чувствительность передаточной функции  $W_X(p)$  к параметру  $X$ .

После вычисления функций чувствительности получаем:

$$S_m^{W_\phi} = \frac{1 - \sqrt{mLp}}{1 + \sqrt{mLp}}, \quad (9)$$

$$S_L^{W_\phi} = \frac{-\sqrt{mLp}}{1 + \sqrt{mLp}}, \quad (10)$$

На основе [2] и формулы (3), учитывая силы трения, получим:

$$M\bar{V}p = \bar{F} - m(\bar{V}p - L\bar{\phi}p^2) - \bar{V}K_{TP2}, \quad (11)$$

$$\bar{\phi}(Lp^2 + K_{TP1}p + g) = \bar{V}p. \quad (12)$$

Согласно этим уравнениям можно вычислить передаточную функцию, связывающую  $\phi$  с сигналом датчика ускорения.

$$\phi = \frac{1}{g + K_{TP1}p + Lp^2} \dot{V} = W'_\phi(p) \dot{V}, \quad (13)$$

где  $K_{TP1}$ ,  $K_{TP2}$  – коэффициенты трения для  $m$ ,  $M$ .

Оценим чувствительность передаточной функции (11) к изменениям  $L$  и  $K_{TP1}$ :

$$S_{K_{TP1}}^{W_\phi} = \frac{-1}{Lp^2 + K_{TP1}p + g}, \quad (14)$$

$$S_L^{W_\phi} = \frac{-p}{Lp^2 + K_{TP1}p + g}. \quad (15)$$

Анализ выражений (9) и (10) показывает, что:

— в низкочастотной области чувствительность к  $L$  ниже при определении  $\phi$  с помощью двух датчиков;

— в низкочастотной области при определении  $\phi$  с помощью двух датчиков чувствительность вычисленного сигнала выше к изменениям  $m$ , чем к  $L$ .

На основании проведенных исследований был сделан вывод, что изменение параметров по технологическим требованиям приводит к раскачиванию груза и рывкам, что может быть причиной нарушения технологического процесса и повреждений оборудования, что обуславливает использование силовых регуляторов, датчиков и алгоритмов управления. Было предложено использовать транзисторный регулятор напряжения, который позволяет обеспечить различные режимы работы и управления асинхронным двигателем.

**Библиографический список**

1. **Акуленко, Л. Д.** Управление колебаниями / Б.Н. Соколов, Л.Д. Акуленко, Ф.Л. Черноусько. М.: Наука, 1980.
2. **Андреев, В.П.** Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. М. Л., Госэнергоиздат, 1963. — 749 с.
3. **Доманов, А.В.** Система регулирования в автоматизированных сталеплавильных печах / В.И. Доманов, А.В. Доманов, И.Ю. Муллин/ Пенза XII МНТК Информационно-вычислительные технологии и их приложения. - 2010.

**A.A. Kravchuk, S.V. Gavrilova**

**DEVELOPMENT OF A SOFT-START DEVICE FOR A HORIZONTAL  
DISPLACEMENT ELECTRIC DRIVE**

Ulyanovsk State Technical University, Russia

**Abstract:** The article discusses the scientific and technical solutions developed by the authors for the implementation of a smooth start of a horizontal displacement electric drive. The diagrams and mathematical description of the system under consideration are given.

**Key words:** electric drive, horizontal movement, lifting equipment.

**References**

- [1] L.D. Akulenko, B.N. Sokolov, F.L. Chernousko “Upravleniye kolebaniyami” [Control of oscillations], Moscow, Nauka 1980(in Russian)
- [2] V.P. Andreev Yu. A. “Osnovy elektroprivoda” [Sabinin Fundamentals of electric drive], Gosenergoizdat, 1963. — 749 p.
- [3] A.V. Domanov, V.I. Domanov, Yu. Mullin “Sistema regulirovaniya v avtomatizirovannykh staleplavil'nykh pechakh” [Control system in automated steelmaking furnaces], Penza XII MNTC Information and Computing technologies and their applications. - 2010.

Ал.А. Кралин, Е.В. Крюков, Ан.А. Кралин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ В SIMULINK

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье описан алгоритм создания модели катушки с ферромагнитным сердечником в пакете *Simulink*. Модель составляется по нелинейным дифференциальным уравнениям, описывающим электромагнитные процессы в дросселе. Модель собрана из блоков основной библиотеки *Simulink*.

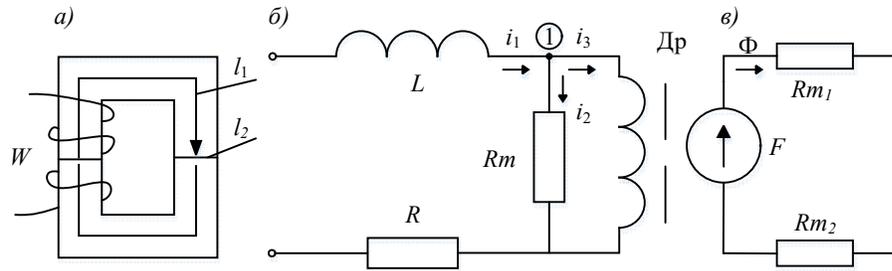
**Ключевые слова:** катушка с ферромагнитным сердечником, дроссель, моделирование, *Simulink*.

Обширный перечень математических моделей наиболее часто встречающихся элементов электрических цепей содержится в разделе «*Power System Blockset*» пакета *MATLAB*. Однако многообразие и специфические особенности практических задач ставят перед исследователями необходимость разработки новых блоков для построения структурной модели сложной электрической цепи. Приложение *SIMULINK*, интегрированное в систему компьютерной математики *MATLAB*, позволяет расширить набор элементов библиотеки блок-моделей [1-3].

Рассмотрим алгоритм создания одного из элементов электрической цепи новой математической модели. Допустим, что индуктивная катушка в устройстве со схемой по рис. 1 имеет ферромагнитный сердечник. В некоторых случаях существует необходимость учета нелинейных характеристик материала магнитопровода дросселя. Следовательно, модель дросселя в виде блока из линейных элементов «*Series RLC Branch*» должна быть заменена новой блок-моделью, приближающей адекватность отображения процессов в реальном устройстве и в пространстве математических объектов.

Пусть параметры дросселя с ферромагнитным сердечником следующие: число витков обмотки  $W=100$ , поперечное сечение магнитопровода  $Q_c = 4 \text{ см}^2$ , средняя длина магнитной силовой линии  $l_1=0,3 \text{ м}$ , суммарный воздушный зазор в магнитопроводе  $l_2=0,1 \text{ мм}$ , индуктивность рассеяния  $L_1=0,005 \text{ Гн}$ , сопротивление провода обмотки  $R_1=0,1 \text{ Ом}$ , сопротивление потерь в сердечнике  $R_m=1000 \text{ Ом}$ . Параметры материала сердечника дросселя заданы в табл. 1. В ней приведены координаты  $H$  и  $B$  точек, принадлежащих основной кривой намагничивания  $b(h)$ .

Конструкция дросселя, электрическая и магнитная схемы замещения изображены на рис. 1.



**Рис. 1. Индуктивная катушка с ферромагнитным сердечником:**  
 а – элементы конструкции; б, в – схемы замещения электрической и магнитной цепей

Таблица 1

Кривая намагничивания сердечника дросселя

$H_c, \text{А/м}$	-500	-200	-80	-10	0	10	80	200	500
$B, \text{Тл}$	-0,3	-0,25	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,25	0,3

Опишем один из алгоритмов создания новой  $S$ - модели на примере разработки математической модели нелинейного дросселя.

1. Запишем уравнения для мгновенных значений токов, напряжений и магнитной индукции по схеме замещения электрической цепи (рис. 1, б): первое – для узла 1 по первому закону Кирхгофа, второе и третье – для контуров  $u - R_1 - L - L_m$  и  $R_m - L_m$  соответственно:

$$\left. \begin{aligned} i_1 - i_2 - i_3 &= 0, \\ u &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + WQ \frac{db}{dt}, \\ R_m i_2 &= WQ \frac{db}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $b$  – магнитная индукция,  $WQ \frac{db}{dt}$  – напряжение на  $L_m$ , обусловленное основным потоком нелинейной индуктивной катушки.

2. Составим уравнения в соответствии со схемой замещения магнитной цепи (рис. 1, в):

- магнитодвижущая сила обмотки  $W$  с током  $i_3$ :

$$F = Wi_3,$$

- магнитное напряжение на «стальном» участке магнитопровода (на  $R_{m1}$ )

$$u_{m1} = R_{m1} \cdot \Phi = h_1 l_1,$$

- магнитное напряжение на магнитном сопротивлении  $R_{m2}$  (на воздушном зазоре)

$$u_{m2} = R_{m2} \cdot \Phi = h_2 l_2,$$

- уравнение по второму закону Кирхгофа для магнитного контура

$$F = h_1 l_1 + h_2 l_2,$$

- соотношение между магнитной индукцией  $b$  и напряженностью магнитного поля  $h_2$  в воздушном зазоре

$$h_2 = \frac{b}{\mu_0},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость материала воздушного зазора.

Соотношение между магнитной индукцией  $b$  и напряженностью магнитного поля  $h_1$  в сердечнике дросселя – функция, составленная по данным табл. 1:

$$h_1 = f(b).$$

Уравнения для магнитной цепи оформим в виде системы:

$$\left. \begin{aligned} F &= W i_3, \\ F &= h_1 l_1, \\ h_2 &= \frac{b}{\mu_0}, \\ h_1 &= f(b). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3. Выполним формальные математические преобразования. В формулах (1) и (2) введем оператор  $s$ , который будет формально подменять обозначение операции дифференцирования  $\frac{d}{dt}$ . С учетом этого математическая опера-

ция интегрирования в дальнейшем записывается как  $\frac{1}{s}$ . Заменяем в уравнениях прописные буквы – символы переменных – как строчные и объединим полученные уравнения в систему (3).

$$\left. \begin{aligned} I_1 - I_2 - I_3 &= 0, \\ U &= R_1 I_1 + L_1 \cdot s \cdot I_1 + W Q \cdot s \cdot B, \\ R_m I_2 &= W Q \cdot s \cdot B, \\ F &= W I_3, \\ F &= H_1 I_1 + H_2 I_2, \\ H_2 &= \frac{B}{\mu_0} \\ H_1 &= f(B). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из первого уравнения системы (3) выразим  $I_1$ :

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (4)$$

Второе уравнение (3) преобразуем к виду

$$WQsB = U - R_1I_1 - L_1sI_1. \quad (5)$$

Третье тождество (3) позволяет выразить ток  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{1}{R_m}WQsB. \quad (6)$$

Из (5) получим:

$$B = \frac{1}{WQ} \frac{1}{s} (WQsB). \quad (7)$$

Ток  $I_3$  определяется из четвертого уравнения (3)

$$I_3 = \frac{1}{W}F. \quad (8)$$

Сформируем из записанных ранее уравнений систему с оператором дифференцирования  $s$ :

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_2 + I_3, \\ WQ \cdot s \cdot B &= U - R_1I_1 - L_1 \cdot s \cdot I_1, \\ I_2 &= \frac{1}{R_m}(WQ \cdot s \cdot B), \\ B &= \frac{1}{WQ} \cdot \frac{1}{s}(WQ \cdot s \cdot B), \\ H_1 &= f(B), \\ H_2 &= \frac{B}{\mu_0}, \\ F &= H_1I_1 + H_2I_2, \\ I_3 &= \frac{1}{W}I_3. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Система уравнений (9) является математической моделью дросселя, имеющего нелинейную характеристику.

4. Составим имитационную *Simulink*-модель дросселя (рис.2). Она представляет собой графическое изображение системы уравнений (9). Наборы используемых блоков находятся в корневой библиотеке *Simulink*.

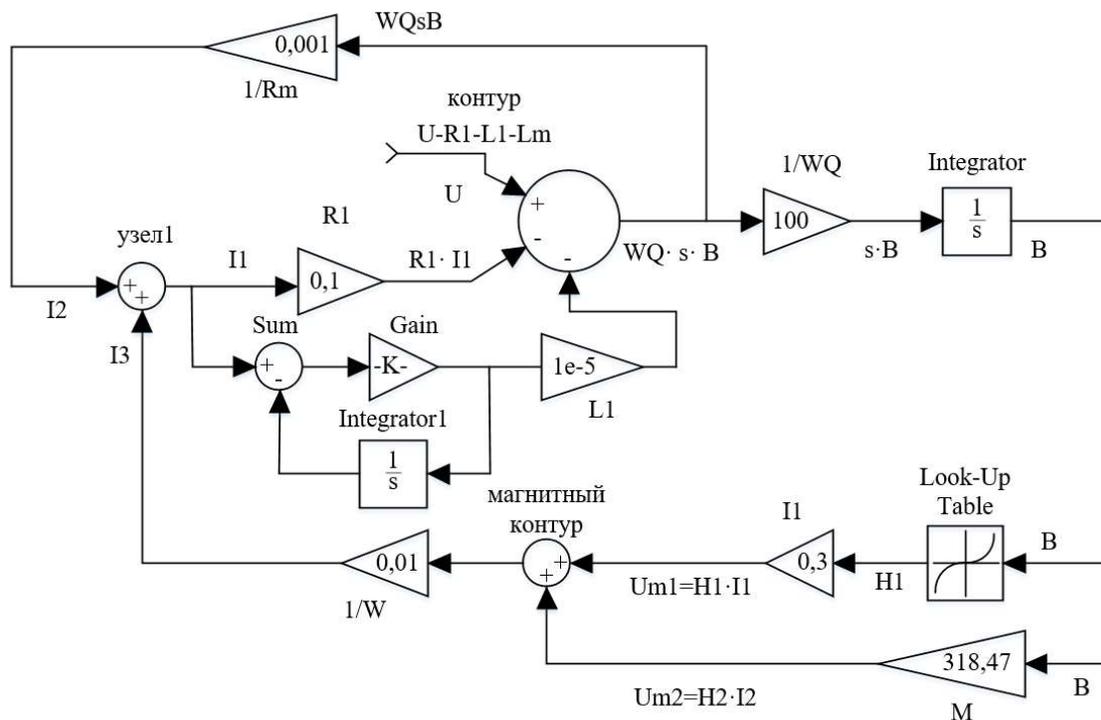


Рис. 2. Структурная модель нелинейного дросселя

Разработанная модель может быть адаптирована к пространству «*Power System Blockset*» с помощью управляемых источников и измерителей тока или напряжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых – кандидатов наук МК-270.2022.4 (соглашение № 075-15-2022-734 от 12 мая 2022 г.).

#### Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 656 с.
2. **Иванушкин, Ф.Н.** Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов: Монография / Ф.Н. Иванушкин, В.А. Сарапулов, П. Шимчак. – Щецин: ЩТУ, 2000. – 310 с.
3. **Кралин, А.А.** Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink/ А.А. Кралин, Б.Ю. Алтунин, В.В. Гуляев // Вестник волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 32 Нижний Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО "ВГАВТ", 2012.

**A.A. Kralin, E.V. Kryukov, A.A.Kralin**

## **SIMULATION OF A FERROMAGNETIC CORE COIL IN SIMULINK**

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

**Abstract:** The article describes an algorithm for creating a model of a coil with a ferromagnetic core in the Simulink package. The model is compiled using nonlinear differential equations describing electromagnetic processes in the throttle. The model is assembled from blocks of the main Simulink library.

**Key words:** ferromagnetic core coil, choke, simulation, Simulink.

### **References**

- [1] A.V. Ivanov-Smolensky “Elektricheskiye mashiny” [Electric machines]. In 2 vols. Volume 1: Textbook for universities. – 2nd ed., reprint. and add. – M.: Publishing House of MPEI, 2004. – 656 p.
- [2] F.N. Ivanushkin, “Strukturnoye modelirovaniye elektromekhanicheskikh sistem i ikh elementov: Monografiya” [Structural modeling of electromechanical systems and their elements: Monograph] / F.N. Ivanushkin, V.A. Sarapulov, P. Shimchak. – Shchetsin: SHCHTU, 2000. – 310 p.
- [3] A.A. Kralin, B.Yu. Altunin, V.V. Gulyaev “Issledovaniye rezhimov raboty nelineynogo trekhfaznogo transformatora v pakete Simulink” [Investigation of the operating modes of a nonlinear three-phase transformer in the Simulink package]. Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. Issue 3.2 Nizhny Novgorod: Publishing house of FBOU VPO "VGAVT", 2012.

А.Ю. Смирнов<sup>1,2</sup>, Е.Н. Александрова<sup>1</sup>, Д.А. Кудряшов<sup>1,2</sup>

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
АО «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова»<sup>2</sup>

**Аннотация:** описывается магнитоэлектрический генератор для регулирования скорости перемещение регулирующего органа (РО) ядерного реактора в режиме обесточивания. Использование рассмотренного электромеханического преобразователя является целесообразным в электроприводе управления и защиты РО ядерных реакторов для более строгого поддержания заданной скорости опускания РО при условии возбуждения подмагничивающей обмотки от автономного источника.

**Ключевые слова:** электропривод, синхронный машина, регулирующий орган, магнитоэлектрический генератор, обмотка

Одним из важных звеньев электротехнического комплекса механизмов вертикального перемещения регулирующих органов ядерных реакторов (ЯР) является устройство контроля движения (УКД), контролирующее скорость опускания РО при обесточивании шагового двигателя (ШД).

Необходимость такого устройства обусловлена неравномерностью изменения реактивности при перемещении РО вглубь ядерного реактора. С самого начала падения полностью выведенного из активной зоны РО его эффективность изменяется незначительно. Следовательно, на начальном участке опускания РО в режиме аварийной защиты ему должно быть сообщено максимальное ускорение.

По мере погружения в активную зону эффективность РО возрастает, и его дальнейший разгон целесообразно ограничить, вплоть до перехода к равномерному движению в конце хода. Таким образом, ускорение, а значит и закон изменения электромагнитного момента, развиваемого устройством контроля скорости опускания РО, должны соответствовать зависимости эффективности регулирующего стержня от глубины погружения в активную зону.

Наиболее перспективные существующие разработки основаны на применении в приводе РО ЯР электромеханического преобразователя, представляющего собой двухмашинную сборку из индукторного двигателя и магнитоэлектрического генератора, которые установлены в одном корпусе и соединены общим валом.

В режиме обесточивания обмотки якоря индукторного двигателя на установившейся частоте вращения происходит возникновение резонанса в контуре, образованном обмотками якоря генератора и подключенными конденсаторами.

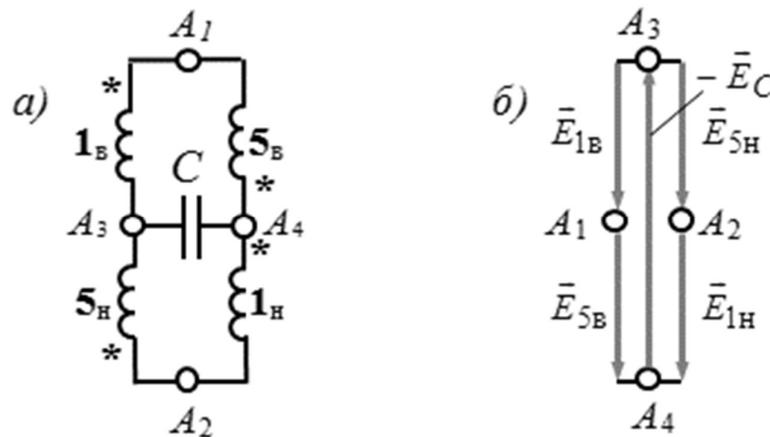
Тормозной электромагнитный момент от взаимодействия поля постоянных магнитов с обмоткой якоря магнитоэлектрического генератора уравнивает момент от веса регулирующего органа, приложенный через барабан и редуктор к валу электромеханического преобразователя. В результате разгон РО прекращается, и он опускается равномерно, без чрезмерных ударных нагрузок в конце хода.

Экспериментально установлено, что для достижения устройством заданной установившейся скорости равномерного опускания необходимо, чтобы частота ЭДС, наводимой в фазах обмотки дополнительного магнитопровода синхронной машины, была меньше величины, определяемой соотношением [1]:

$$n_{уст} < \frac{30}{\pi \cdot p \cdot \sqrt{L \cdot C}}, \quad (1)$$

где  $p$  - число пар полюсов обмотки дополнительного магнитопровода,  $L$  и  $C$  - индуктивность одной фазы обмотки и емкость подключенных к ее зажимам конденсаторов.

Регулировка требуемого диапазона скоростей происходит расчетным выбором емкостного сопротивления. Отмечено, что для увеличения надежности работы привода РО, целесообразно использовать многофазную подразделенную обмотку статора электромеханического преобразователя. Все катушки данной обмотки подразделены на две одинаковые секции с одинаковым количеством витков.



**Рис. 1. ЭДС вращения в тормозном режиме работы электромеханического преобразователя с подразделённой обмоткой:**

а) подключение конденсаторов; б) векторная диаграмма

Нагрузочные конденсаторы при этом подключаются к одной группе фазных зажимов, а напряжение питания к другой, эквипотенциальной по отношению к точкам подключения конденсаторов (рис. 1).

Поэтому выход из строя конденсаторов, вплоть до их обрыва или короткого замыкания, не может привести к потере управляемости двигателя и механизма в целом [2].

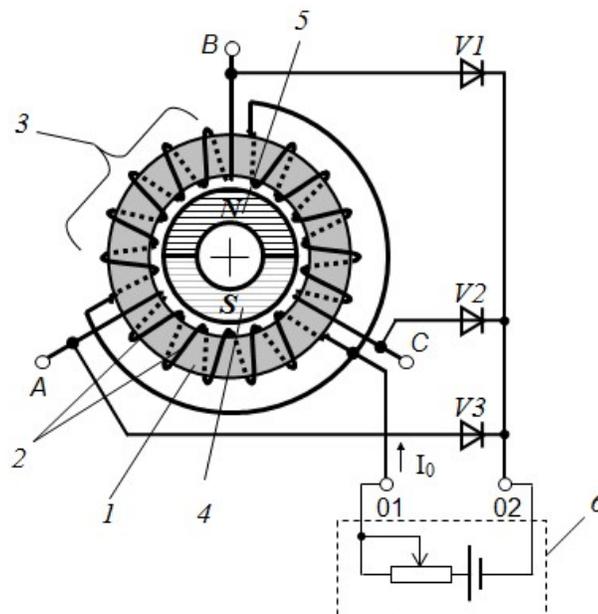
Для воздействия на скорость опускания РО при работе ЯР в режиме аварийной защиты (АЗ) был рассмотрен вопрос использования бесконтактной синхронной машины, поток возбуждения которой, созданный постоянными магнитами, регулируется путём подмагничивания магнитопровода с обмоткой якоря от автономного источника [3].

Путём изменения тока обмотки подмагничивания в этой машине можно изменять ЭДС и ток обмотки якоря, а значит, и электромагнитный момент, воздействуя тем самым на скорость опускания РО.

Предлагаемая конструкция генератора исключает применение отдельной обмотки подмагничивания и позволяет снизить расход обмоточной меди. Данный режим достигается за счет соединения катушек обмотки якоря в катушечные группы из  $2q$  рядом расположенных катушек, где  $q$  – число катушек на полюс и фазу, включенные в фазах согласно, собранные в звезду с выведенной нулевой точкой, к которой подключены начала катушечных групп. К фазным зажимам подключены аноды диодов, по одному в каждой фазе, катоды которых замкнуты на дополнительную нулевую точку, снабжённую зажимом.

При таком соединении катушек поток подмагничивания, созданный постоянным током, протекающим через основную и дополнительную (образованную диодами) нулевые точки обмотки якоря, не ответвляется в зазор, а замыкается внутри магнитопровода статора.

Устройство содержит кольцевой магнитопровод статора  $I$  (рис. 2). Магнитопровод статора может быть гладким или зубчатым. На магнитопровод намотаны катушки  $2$ , одна сторона которых пропущена через отверстие магнитопровода  $I$ , а противоположная размещается на его наружной цилиндрической поверхности.



**Рис. 2.** Генератор с обмоткой якоря, совмещенной с обмоткой подмагничивания (двухполюсный вариант с гладким статором)

Катушки объединены в катушечные группы 3 по  $2q$  рядом расположенных катушек, где  $q$  – число катушек на полюс и фазу, таким образом, что они занимают фазную зону  $\frac{360}{mp}$  градусов, что в представленном на рис. 2 варианте

трёхфазной двухполюсной машины составляет 120 градусов. Катушки одной катушечной группы на рис. 2 выделены штриховкой. Внутри кольцевого магнитопрода статора 1 установлен ротор с постоянными магнитами, образующими полюс 4 «южной»  $S$  и полюс 5 «северной»  $N$  полярности.

Синхронная машина работает следующим образом. При вращении ротора полем его магнитов в фазах обмотки якоря наводится переменная ЭДС. При подключении нагрузки через зажимы фаз  $A, B, C$  (на рисунках не показана) ей будет передаваться электрическая мощность, пропорциональная напряжению на этих зажимах и потребляемому току.

Величину напряжения можно регулировать (стабилизировать) путём подмагничивания кольцеобразного магнитопровода статора. Для этого нулевая точка звезды обмотки якоря 01 и дополнительная нулевая точка 02, образованная катодами диодов, подключаются к регулируемому источнику постоянного напряжения  $b$  (рис. 2), а именно к его положительной и отрицательной клеммам, «+» и «-», соответственно. Это напряжение вызывает ток  $I_0$ , равномерно распределяющийся по всем фазам обмотки якоря. Он создаёт магнитный поток, который замыкается внутри кольцеобразного магнитопровода 2 статора и подмагничивает его, т.е. увеличивает магнитное сопротивление. Вследствие возрастания магнитного сопротивления кольцеобразного магнитопровода статора величина ЭДС, наводимой постоянными магнитами 4 и 5 ротора при его вращении уменьшается, в соответствии с чем уменьшается и мощность, отдаваемая синхронной машиной нагрузке. Максимальная мощность будет генерироваться при нулевом токе подмагничивания, т.е. при отключенном источнике постоянного напряжения  $b$ .

Диоды  $V1-V3$  блокируют замыкание тока через источник постоянного напряжения, обусловленного переменным напряжением на зажимах фаз  $A, B, C$ .

Следуя положениям классической электромеханики, диаметр и длину окружности якоря машины можно связать с её энергетическими или силовыми характеристиками через машинную постоянную, из которых чаще других используется постоянная Арнольда [4]

$$C_A = \frac{D^3 \lambda}{0,1047M} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{\sigma 0} B_{\delta m} A}. \quad (2)$$

Она позволяет установить зависимость между удельным по отношению к расчётному моменту, объёмом ротора или расточки статора машины и принятыми электромагнитными нагрузками: амплитудой индукции в зазоре  $B_\delta$ , и линейной токовой нагрузки  $A$ . Первая характеризует магнитный поток, создаваемой обмоткой возбуждения (индуктором) в зазоре в номинальном режиме. Вторая есть удельная на единицу длины окружности зазора МДС обмотки якоря.

Здесь  $M$  – расчётный электромагнитный момент машины,  $D$  – диаметр окружности якоря со стороны рабочего зазора,  $\lambda$  – отношение активной длины (длины рабочего зазора в аксиальном направлении) к диаметру окружности якоря,  $m$  – число фаз,  $k_B$  – коэффициент формы индукции в зазоре,  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент, в кольцевой обмотке равен коэффициенту распределения и мало отличается от единицы при числе катушек в катушечных группах большим трёх;  $\alpha_\delta$  – длина полюсной дуги по отношению к полюсному делению.

В кольцевой обмотке линейная нагрузка в два раза меньше, чем в барабанной обмотке, и составляет

$$A = \frac{m w_\phi I}{\pi D}, \quad (3)$$

где  $w_\phi$  – число витков фазы обмотки. Оптимальные пределы выбора линейной нагрузки в машинах с различной интенсивностью охлаждения составляют от 20000 до 45000 А/м, при естественном охлаждении. При этом приходится иметь в виду, что в силу размещения половины катушечных сторон на нерабочей стороне магнитопровода статора могут иметь место определённые технологические сложности при укладке катушек в машинах с большими значениями  $\lambda$ .

При создании поля возбуждения посредством высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе сплавов неодима или самария, в машине с радиально намагниченными магнитами и гладким статором будет создана индукция в зазоре  $B_\delta$  порядка 0,35 - 0,45 Тл. Выбор более высоких значений в двухполюсной конструкции с радиально намагниченными магнитами ограничен насыщением участков ярма ротора.

### Выводы

По сравнению с ближайшим аналогом в предлагаемой электрической машине не требуется наматывать дополнительную обмотку – обмотку подмагничивания. Её функции выполняет обмотка якоря, за счёт чего достигаются экономия обмоточной меди и упрощение технологии изготовления.

Применение рассмотренного магнитоэлектрического генератора позволяет обеспечить активное воздействие на скорость опускания РО для точной её настройки.

### Библиографический список

- [1] Патент №2693935 на изобретение РФ. МПК H02K 29/00, G21C 7/00. Электромеханический преобразователь для вертикального перемещения регулирующего органа / А.Ю. Смирнов, В.В. Веллер, А.В. Кифоренко, Д.А. Кудряшов.
- [2] **Смирнов, А.Ю.** Подразделенные обмотки и их применение в электрических машинах переменного тока // *Электричество*. – 1995. - №7. – с.24-28.
- [3] **Смирнов, А.Ю.** Опыт проектирования магнитоэлектрических машин с кольцевой обмоткой якоря – *Электротехника*, 2021, №12, с.13-19.
- [4] **Смирнов, А.Ю.** Проектирование индукторных двигателей с самовозбуждением для частотного привода /А.Ю.Смирнов, Т.Н. Уснунц-Кригер // *Электричество*, 2012, №5, с. 50-56.

A.YU. Smirnov<sup>1,2</sup>, Ye.N. Aleksandrova<sup>1</sup>, D.A. Kudryashov<sup>1,2</sup>

## MAGNETOELECTRIC GENERATOR FOR CONTROLLING THE SPEED OF MOVEMENT OF THE CONTROL BODY OF A NUCLEAR REACTOR

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseeva<sup>1</sup>  
JSC "Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering them n. a. I.I. Afrikantov"<sup>2</sup>

**Abstract:** a magnetoelectric generator for regulating the speed of movement of the control rod of a nuclear reactor in the deenergization mode is described. The use of the considered electromechanical converter is advisable in the electric drive for controlling and protecting the control rods of nuclear reactors, for more accurate maintenance of a given lowering speed, provided that the magnetizing winding is excited from an autonomous source.

**Key words:** electric drive, synchronous machine, control rod, magnetoelectric generator, winding

### References

- [1] Patent No. 2693935 for the invention of the Russian Federation. IPC H02K 29/00, G21C 7/00. Electromechanical converter for vertical movement of the regulating body / A.Yu. Smirnov, V.V. Weller, A.V. Kiforenko, D.A. Kudryashov. (in Russian)
- [2] A.Yu. Smirnov "Podrazdelennyye obmotki i ikh primeneniye v elektricheskikh mashinakh pe-remennogo toka" [Subdivided windings and their application in AC electrical machines] "Elektrichestvo" [Electricity], 1995, no.7, pp. 24-28. (in Russian)
- [3] A.Yu. Smirnov "Opyt proyektirovaniya magnitoelektricheskikh mashin s kol'tsevoy obmotkoy yakorya" [Experience in designing magnetoelectric machines with an annular armature winding] "Elektrichestvo" [Electricity], 2021, no.12, pp.13-19. (in Russian)
- [4] A.Yu. Smirnov, T.N. Usnunts-Krieger "Proyektirovaniye induktornykh dvigateley s samovozbuzhdeniyem dlya chastotnogo privoda" [Design of inductor motors with self-excitation for a frequency drive] "Elektrichestvo" [Electricity], no. 5, pp. 50-56(in Russian)

Н.Е. Ступин, В.В. Ваняев

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ»

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье рассмотрен вариант реализации лабораторного стенда, предназначенного для изучения возможности реализации и режимов работы однофазного активного выпрямителя с произвольным фазовым сдвигом его входного тока относительно питающего сетевого напряжения. Описан принцип работы устройства с двумя активными выпрямителями, а также приведены результаты его моделирования.

**Ключевые слова:** преобразовательная техника, активный выпрямитель, фазовый угол, *MATLAB Simulink*.

В настоящее время большое значение уделяется вопросам повышения качества электроэнергии и энергосбережения [1, 2]. Это связано с широким распространением полупроводниковой преобразовательной техники, совершенствованием компонентной базы силовой электроники, которое делает возможным рост мощностей единичных преобразователей и увеличивает нелинейные нагрузки в электросетях. Для повышения электромагнитной совместимости (ЭМС) преобразователей с сетью возможно применение как различных пассивных, так и активных устройств коррекции коэффициента мощности (ККМ), а также активных выпрямителей (АВ). Наилучшей ЭМС обладают ККМ и АВ, потребляющие из питающей сети ток практически синусоидальной формы с заданным фазовым сдвигом относительно сетевого напряжения [3]. Кроме того, применение АВ в преобразователях для частотно-регулируемых электроприводов позволяет возвращать в сеть энергию маховых масс электроприводов при торможении и увеличивать КПД всей системы [4].

В соответствии с этим актуальна задача изучения магистрантами направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» принципа действия таких устройств как в виртуальной среде на имитационных моделях, например в пакете *MATLAB Simulink* [5], так на реальных физических моделях, выполненных на современной элементной базе.

Функциональная схема стенда представлена на рис. 1. Устройство состоит из двух АВ напряжения (АВН), выполненных на транзисторах  $VT1 \dots VT8$ . Один из АВН (в данном случае АВН1) является ведущим, а другой (АВН2) – ведомым.

АВН1 через входной дроссель  $L1$ , а АВН2 через входной дроссель  $L2$  и разделительный трансформатор  $TV$  с коэффициентом трансформации равным единице подключены к сети переменного напряжения. АВН1 и АВН2 имеют общие шины звена постоянного тока с присоединенным к ним конденсатором

фильтра  $C$ . В силовых цепях АВН имеются также датчики тока ДТ1, ДТ2 и напряжения ДН1, ДН2, сигналы с которых поступают в систему управления.

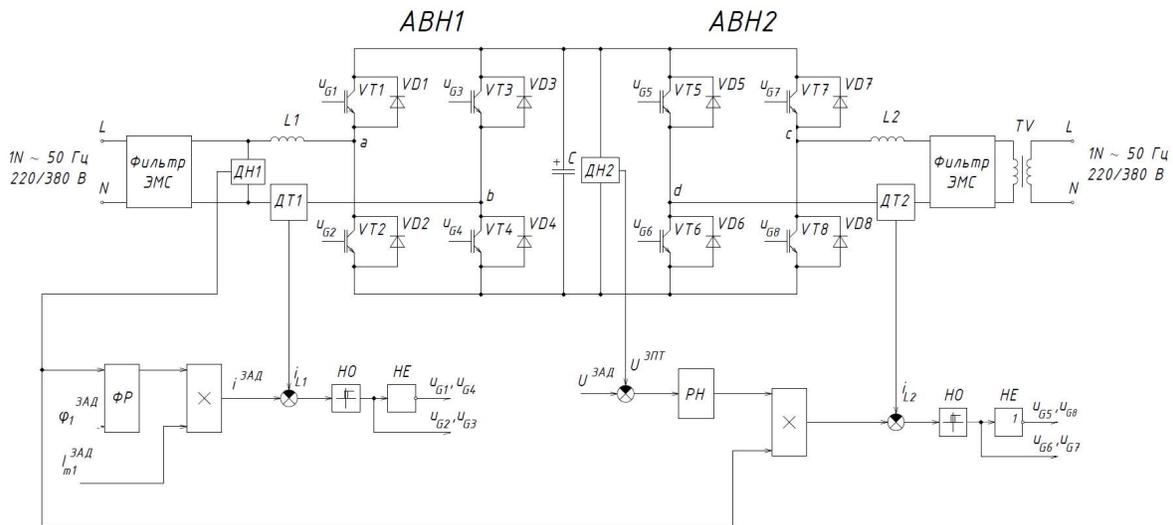


Рис. 1. Функциональная схема стенда

Система управления двумя АВН в представленном виде реализует подачу импульсов на затворы транзисторов и содержит фазовый регулятор (ФР) для синтеза кривой тока задания, блоки перемножения сигналов, сумматоры, ПИ-регулятор напряжения (РН), нуль-органы (НО), блоки инверсии (ИВ).

Система управления АВН1 формирует сигнал задания на его входной ток требуемой амплитуды  $I_{m1}$  и с требуемым фазовым сдвигом  $\varphi_1$  относительно сетевого напряжения, при этом система управления АВН2 формирует задание на его входной ток с амплитудой  $I_{m2}$  в соответствии с заданным значением напряжения в звене постоянного тока.

Если заданное значение фазового угла  $\varphi_1$  лежит в пределах  $-\pi/2 \leq \varphi_1 \leq \pi/2$ , то АВН1 работает в режиме передачи энергии из питающей сети в звено постоянного тока (выпрямительный режим АВН1). При этом напряжение конденсатора  $C$  стремится возрасти, что вызывает переход АВН2 в режим зависимого инвертора и возврат энергии, передаваемой АВН1, в питающую сеть. При значениях фазового угла  $\varphi_1$  вне указанных пределов АВН1 работает в инверторном режиме, а АВН2 – в выпрямительном режиме, и направление потока энергии в устройстве меняется на противоположное.

Изучение особенностей работы стенда и проверка работоспособности системы с двумя взаимодействующими АВН выполнены на базе разработанной имитационной модели устройства в программной среде *MATLAB Simulink*.

Схема набора модели дана на рис. 2. Моделирование выполнено при условиях: индуктивность дросселей  $L1 = L2 = 5$  мГн; емкость конденсатора  $C$  в звене постоянного тока (ЗПТ)  $C = 400$  мкФ; амплитудное значение потребляемого тока

– 2 А; размах пульсаций токов дросселей  $\Delta I = 0,1$  А; напряжение в звене постоянного тока – 350 В.

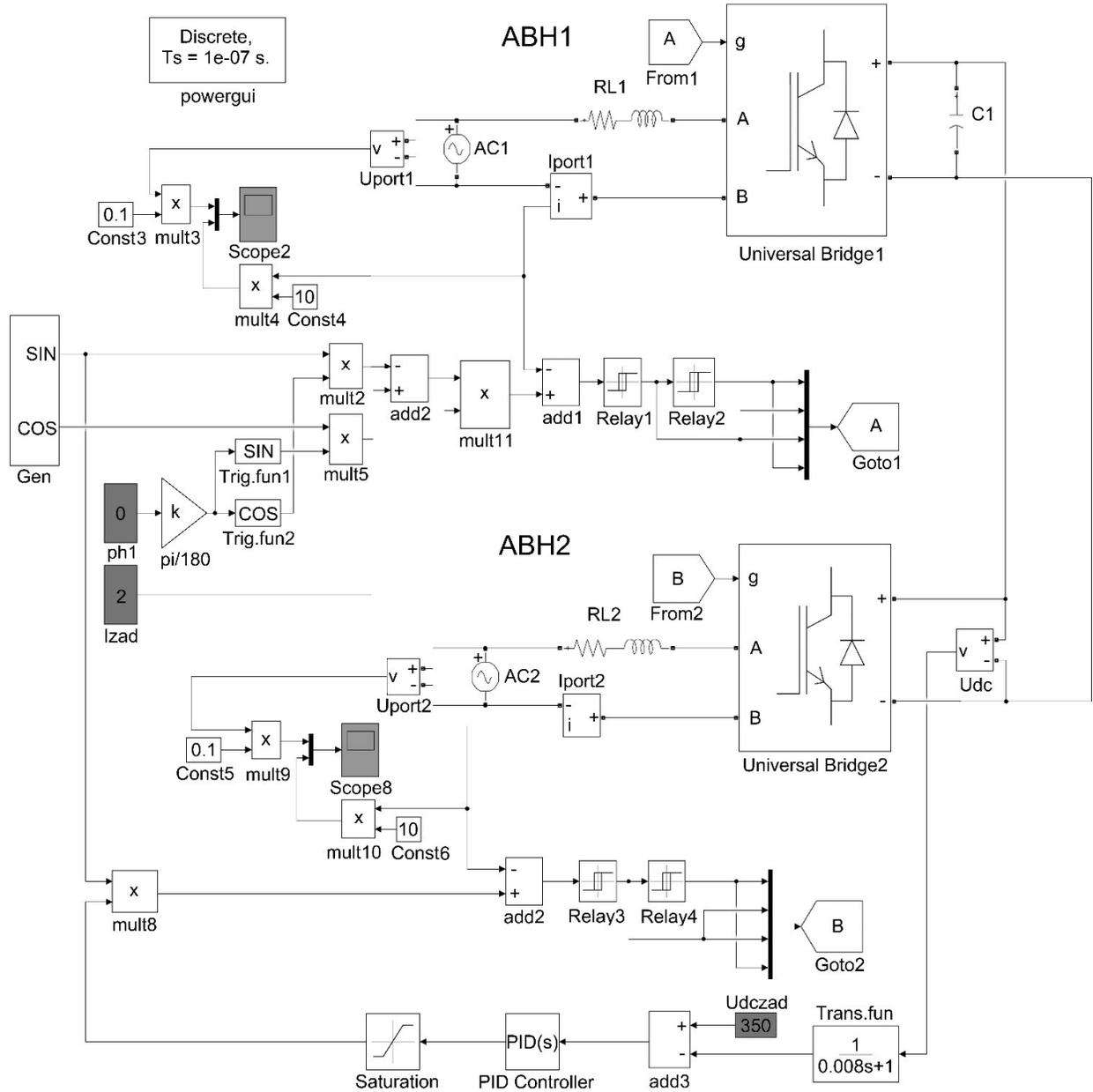
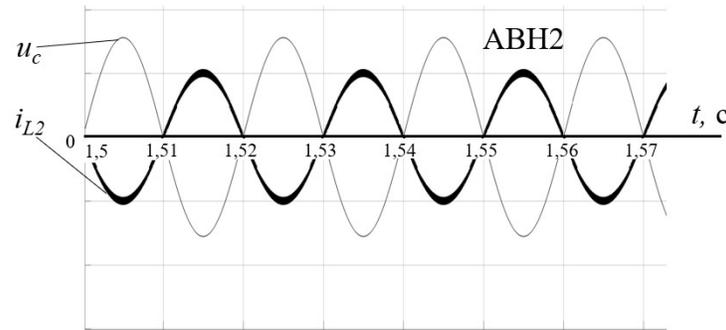
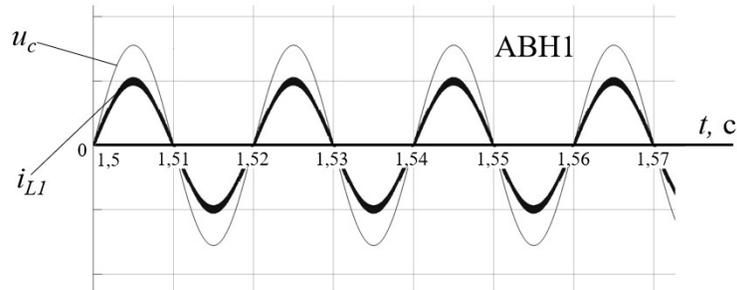


Рис. 2. Схема набора модели стенда

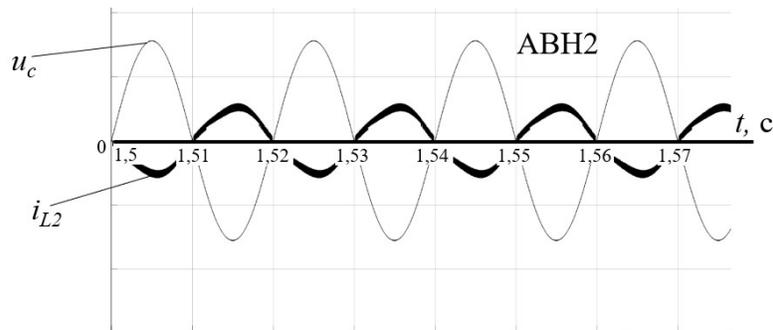
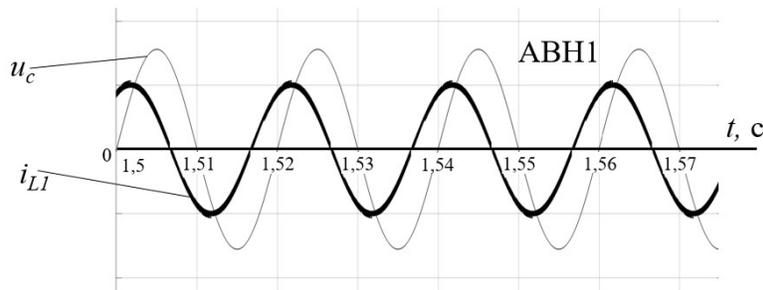
Система управления АВН1 имеет обратную связь по току дросселя  $L1$ , а АВН2 имеет внешний контур напряжения ЗПТ и внутренний контур тока дросселя  $L2$ . Система управления обеспечивает асинхронный способ переключения транзисторных ключей каждого АВН [6].

На рис. 3 представлены полученные на модели диаграммы напряжения сети и входных токов ведущего и ведомого АВН при различных значениях

фазового сдвига  $\varphi_1$  (масштабы: по напряжению  $m_u = 200\text{В}/\text{дел.}$ , по току  $m_i = 2\text{А}/\text{дел.}$ ).

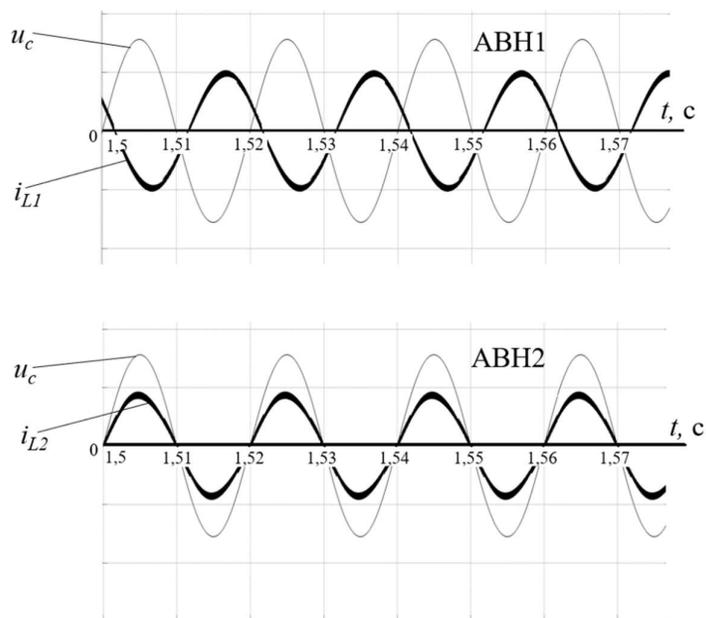


а)  $\varphi_1 = 0$



б)  $\varphi_1 = -\pi/3$

Рис.3. Диаграммы работы стенда при различных значениях фазового сдвига  $\varphi_1$  (начало)



в)  $\varphi_1 = -5\pi/6$

**Рис.3. Диаграммы работы стенда при различных значениях фазового сдвига  $\varphi_1$  (окончание)**

Приведенные диаграммы подтверждают работоспособность предложенной структуры лабораторного стенда и возможность изучения на нем любых возможных режимов работы однофазного АВН. Предложенная структура с успехом может быть использована и при разработке лабораторного оборудования для изучения трехфазных АВН.

Данная работа выполнена при поддержке АНО «Нижегородский НОЦ» и ОАО «РЖД» в рамках договора от 04.05.2022 г. № 33/22/2572.

#### 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.: Стандартиформ, 2014 – 16 с.
2. ГОСТ Р 51317.3.2-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – Введ. 24.12.1999. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000 – 19 с.
3. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
4. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
5. Программное обеспечение *Matlab R2016b* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/products/get-matlab.html> (дата обращения: 06.06.2022).
6. Герман-Галкин, С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде *Matlab-Simulink*: Учебник / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 448 с. ил.

N.E. Stupin, V.V. Vanyaev

## LABORATORY STAND «ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER»

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

**Abstract:** The article considers a variant of the implementation of a laboratory stand designed to study the possibility of implementing and operating modes of a single-phase active rectifier with an arbitrary phase shift of its input current relative to the mains supply voltage. The principle of operation of the device with two active rectifiers is described, as well as the results of its simulation.

**Key words:** converter technology, active rectifier, phase angle, MATLAB Simulink.

### References

- [1] Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Introduced July 1, 2014. Moscow: "Standartinform" GOST 32144-2013., pp. 16, 2014 (in Russian).
- [2] Compatibility of technical means is electromagnetic. Emission of harmonic components of the current by technical means with a current consumption of not more than 16 A (in one phase). Norms and test methods. Introduced Dec. 24, 1999. Moscow: ИПК "Izdatelstvo standartov" GOST R 51317.3.2-99., pp. 19, 2000 (in Russian).
- [3] V.I. Meleshin, "Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor converter technics]". Moscow: Tekhnosfera, pp. 632, 2005 (in Russian).
- [4] M.V. Gel'man, "Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoye posobiye [Converter technics: textbook]". Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, pp. 425, 2009 (in Russian).
- [5] Software "Matlab R2016b" [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/products/get-matlab.html> (Accessed: Jun. 6, 2022).
- [6] S.G. German-Galkin, "Virtual'nyye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v srede Matlab-Simulink: Uchebnik [Virtual laboratories of semiconductor systems in the Matlab-Simulink environment: Textbook]". Saint Petersburg: Publishing house "Lan", pp. 448, 2013 (in Russian).

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

## **ТРЕХФАЗНЫЙ БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫЙ НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ**

Волжский государственный университет водного транспорта

*Аннотация:* рассмотрены структура и принцип работы трехфазного бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты. Предложенный преобразователь обеспечивает адаптацию к вариации параметров напряжения источника электроэнергии для питания трехфазных потребителей электрической энергии. Разработана имитационная модель и показаны диаграммы трехфазного напряжения на выходе преобразователя.

*Ключевые слова:* непосредственный преобразователь частоты, судовая электроэнергетическая система, моделирование.

### **Структура и принцип работы трехфазного бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты**

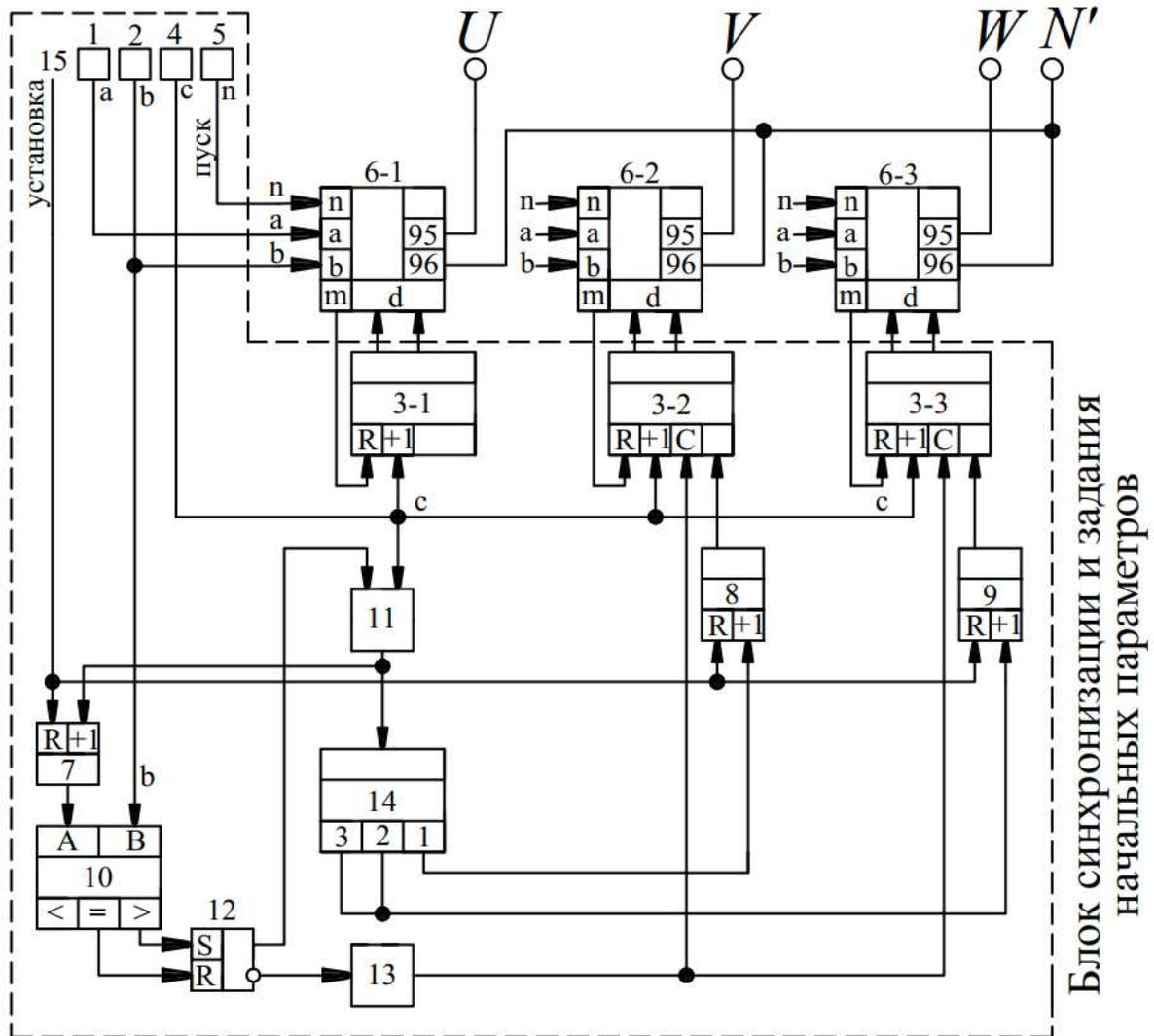
В настоящее время полупроводниковые преобразователи (ПП) электрической энергии нашли широкое применение в судовых системах электроснабжения, в частности в судовых электростанциях с вентильными дизель-генераторными агрегатами и в электроприводе судовых механизмов [1]. Основной особенностью работы ПП в системах с ограниченной мощностью электроустановки является взаимное влияние преобразователей, потребителей и судовой сети [2]. В зависимости от режимов эксплуатации судна происходит изменение параметров и формы напряжения в судовой сети, что в свою очередь приводит к отклонению выходных координат ПП и к снижению эффективности его работы [3].

Одним из технических вариантов обеспечения стабильных выходных координат преобразователя при изменении параметров сети является разработка адаптивных систем управления преобразователем с использованием эталонных сигналов. Одним из вариантов систем данного типа является бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты (БНПЧ), обеспечивающий подключение выходных зажимов к наиболее подходящему напряжению питающей сети вне зависимости от вариации ее параметров (амплитуды, частоты и формы кривой напряжения) [4, 5]. Недостатком является область применения, ограниченная питанием лишь однофазных потребителей.

Для питания трехфазных потребителей электрической энергии предлагается трехфазный БНПЧ (рис. 1), который состоит из трех однофазных БНПЧ, имеющих одинаковую структуру [6]. Однофазный БНПЧ состоит из блока входных датчиков, системы управления и силового блока [4].

Выходное напряжение БНПЧ формируется из трехфазной системы напряжения с выведенной нулевой точкой, что позволяет создать систему двенадцати напряжений, имеющих фазовый сдвиг  $30^\circ$ , без использования

согласующих трансформаторов. Введение второго и третьего однофазного БНПЧ обеспечивают формирование трехфазной системы напряжений на выходе преобразователя. Блок синхронизации обеспечивает формирование сигналов начальных фаз выходных напряжений.



**Рис. 1. Структурная схема трехфазного БНПЧ:**

1 – регистр амплитуды напряжения; 2 – регистр частоты; 3, 7...9 – суммирующие счетчики; 4 – генератор стабильных импульсов; 5 – шина «пуск»; 6 – однофазный БНПЧ; 10 – числовой компаратор; 11 – логический элемент «И»; 12 – RS-триггер; 13 – формирователь коротких импульсов; 14 – распределитель импульсов; 15 – шина «установка»

Трехфазная система напряжений, формируемая тремя однофазными БНПЧ, обеспечивается следующим образом (рис. 2). Нулевой код с выхода счетчика 7 поступает на второй вход компаратора 10, на первый вход которого подан код полупериода  $T_B/2$ , соответствующий заданной частоте, с выхода задающего регистра 2. Из каждых трех импульсов, поступающих на вход распределителя 14,

один (с первого выхода) поступает на счетный вход счетчика 9, а два (со второго и третьего выхода) – на счетный вход счетчика 8.

В момент времени, когда на выходе счетчика 7 код станет равным коду полупериоду  $T_B/2$ , соответствующему заданной частоте, появляется сигнал на выходе РАВНО компаратора 10, которым триггер 12 переводится в нулевое состояние. На его прямом выходе сигнал исчезает, предотвращая прохождение импульсов на входы счетчиков 7, 8 и 9, а на инверсном выходе появляется сигнал. К этому моменту на выходе счетчика 9 сформирован код, соответствующий шестой части периода  $t_1 = T_B/6$ , а на выходе счетчика 8 – третьей части  $t_2 = T_B/3$ , которые поступают на входы исходного числа счетчиков 3 соответственно второго и третьего ОБНПЧ. Сигнал с инверсного выхода триггера 12 поступает на вход формирователя 13, и сигналом с его выхода коды  $t_1$  и  $t_2$  записываются в счетчики 3-2 и 3-3 соответственно, задавая начальные фазы формируемых напряжений.

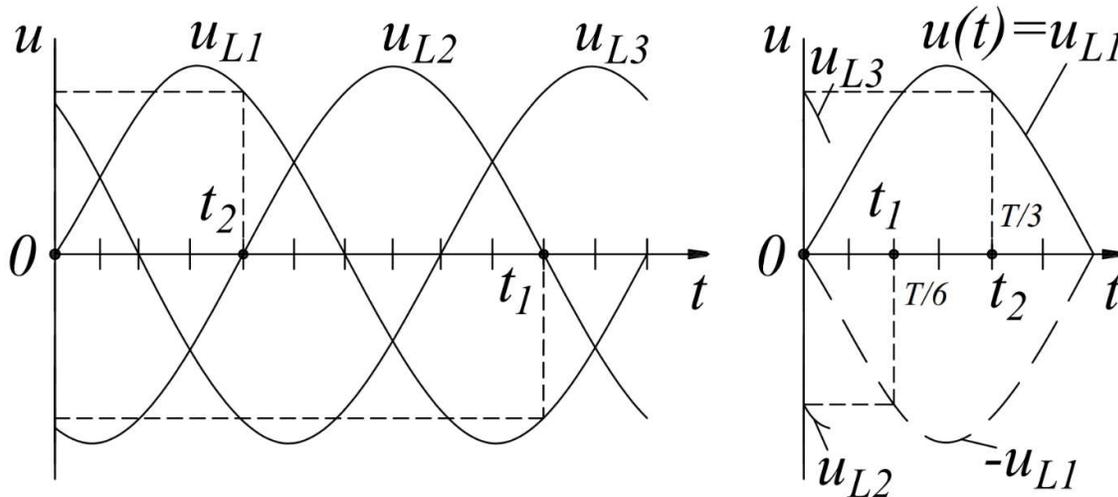


Рис. 2. Волновые диаграммы выходного напряжения

Подаче сигнала на шину ПУСК 5 устанавливает коммутаторы БНПЧ в единичное состояние [6]. При этом первый и третий однофазные БНПЧ настраиваются на формирование положительной полуволны выходного напряжения. Это задает выходному напряжению  $u_A$  первого однофазного БНПЧ нулевую начальную фазу, а начальную фазу выходного напряжения  $u_C$  третьего однофазного БНПЧ соответствующую времени  $t_2 = T_B/3$  ( $120^\circ$ ) записанному в счетчик 3-3. В результате обеспечивается необходимый фазовый сдвиг  $120^\circ$  между  $u_A$  и  $u_C$  в сторону опережения. Коммутатор второго БНПЧ обеспечивает формирование отрицательной полуволны выходного напряжения  $u_C$  (превентивный сдвиг на  $180^\circ$ ). Одновременно задается начальная фаза, соответствующая времени  $t_1 = T_B/6$  ( $60^\circ$ ), записанному в счетчик 3-2.

В результате обеспечивается необходимый фазовый сдвиг на  $180^\circ + 60^\circ = 240^\circ$  в сторону опережения между  $u_A$  и  $u_B$ . Кривые выходных напряжений  $u_A$ ,  $u_B$  и  $u_C$  имеют между собой фазовый сдвиг  $120^\circ$ .

### Имитационная модель и результаты моделирования трехфазного бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты

Исследование и анализ выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  трехфазного БНПЧ осуществлялся на основе модели [5] и структурной схемы, которая изображена на рис. 2. Данная модель состоит из источника трехфазного напряжения Three-Phase Voltage Source1, измерителя трехфазного напряжения Three-Phase V-I Measurement, измерителей напряжения V1-V3, трехфазной нагрузки Three-Phase Load и трехфазного БНПЧ. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

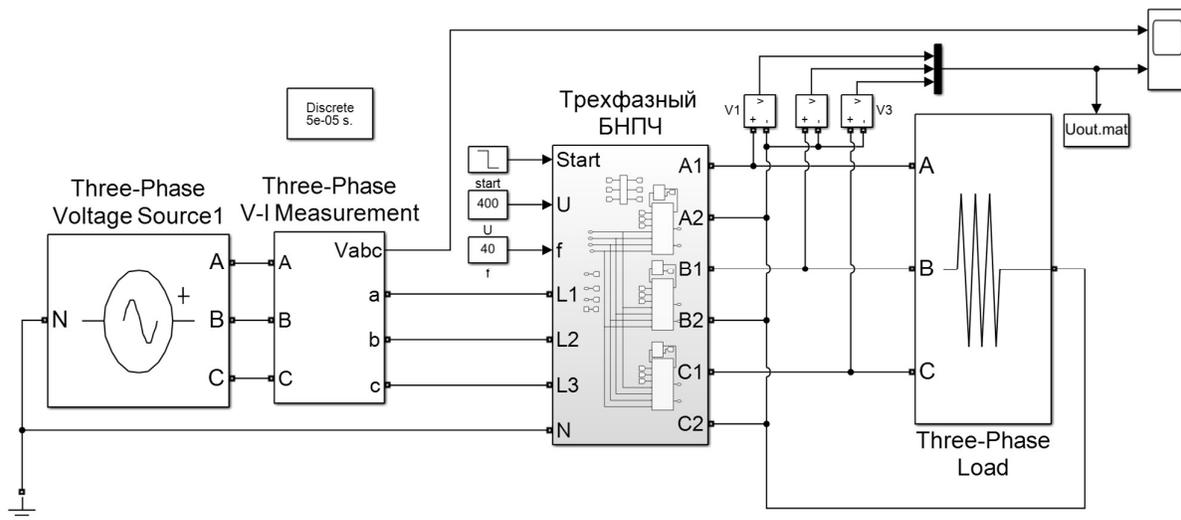


Рис.3. Имитационная модель трехфазного БНПЧ

Исследование проводилось при следующих неизменных параметрах модели, приведенных в табл. 1

Таблица 1

Параметры Модели

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметра	Единица измерения
Частота напряжения источника электроэнергии	$f_l$	50	Гц
Амплитуда линейного напряжения источника электроэнергии	$U_{1Л}$	565,7	В
Амплитуда фазного напряжения источника электроэнергии	$U_{1Ф}$	327	В
Мощность нагрузки на выходе БНПЧ (при $\cos\varphi = 1$ )	$P_n$	4	кВт

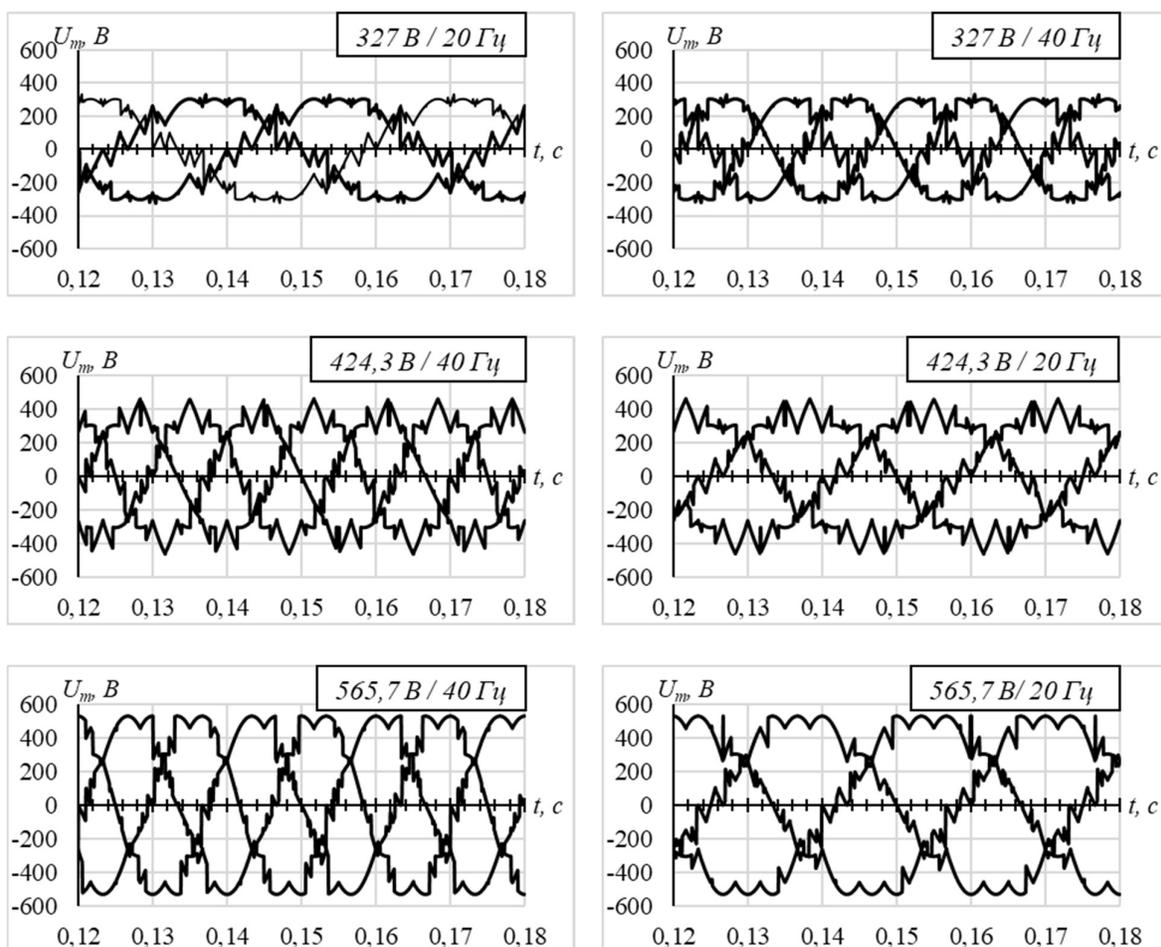


Рис.4. Диаграмма выходного напряжения трехфазного БППЧ

Из полученных результатов видно, что на выходе трехфазного БППЧ формируется трехфазное напряжение с заданными параметрами. При этом форма выходного напряжения соответствует имитационным моделям на основе однофазного БППЧ. Формирование заданного выходного напряжения обеспечивается в диапазоне от 11% до 100% амплитуды линейного напряжения источника, при этом коэффициент нелинейных искажений не превышает 25% [5]. Также обеспечивается необходимый фазовый сдвиг  $120^\circ$  между выходными напряжениями блоков однофазных БППЧ.

Таким образом, представленный трехфазный БППЧ имеет расширенные функциональные возможности, обеспечивая питание потребителей однофазным и трехфазным напряжением с заданной частотой и амплитудой. Выходные зажимы представленного трехфазного БППЧ (95 и 96, рис. 1) могут соединяться по схеме треугольник или звезда.

### Выводы

Результаты моделирования показали возможность применения трехфазного бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты с

адаптацией к вариации параметров напряжения источника электроэнергии для питания частотно-управляемых электроприводов переменного тока в автономных электроустановках с переменной частотой вращения привода генератора с целью получения стабильной частоты выходного напряжения.

Представленный технический вариант реализации трехфазного БНПЧ позволяет формировать выходное напряжение независимо каждым силовым блоком (однофазным БНПЧ), повышая надежность системы. Однако такой вариант приводит к увеличению массогабаритных показателей и соответственно цены преобразователя. В настоящее время авторами работы ведется разработка трехфазного БНПЧ с уменьшенным количеством силовых ключей преобразователя, что позволит устранить данный недостаток представленного преобразователя.

### Библиографический список

1. **Анисимов, Я.Ф.** Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках / Я.Ф. Анисимов. – Ленинград: Судостроение, 1973. – 227 с.
2. **Gnaciński P.** et al. Power Quality and Energy-Efficient Operation of Marine Induction Motors. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 152193-152203, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017133.
3. **Анисимов Я.Ф.** Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок / Я.Ф. Анисимов, Е.П. Васильев. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
4. Пат. 2691968, Рос. Федерация, МПК H02M 5/27. Бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2018123270; Заявл. 26.06.2018; Оpubл. 19.06.2019.
5. **Сугаков В.Г.** Влияние изменения параметров источника электроэнергии на выходное напряжение бестрансформаторного непосредственного преобразователя частоты / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления». — 2021. — №37. С. 48 – 68. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.03
6. Пат. 2758443, Рос. Федерация, МПК H02M 5/27. Трехфазный бестрансформаторный непосредственный преобразователь частоты / В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжск. гос. ун-т водного транспорта», № 2020138088; Заявл. 19.11.2020; Оpubл. 28.10.2021.

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

### THREE-PHASE WITHOUT TRANSFORMER DIRECT FREQUENCY CONVERTER

Volga State University of Water Transport

**Abstract:** The structure and principle of operation of a three-phase transformerless direct frequency converter are considered. The proposed converter provides adaptation to variations in the voltage parameters of the power source for powering three-phase consumers of electrical energy. A simulation model has been developed. Three-phase voltage diagrams at the output of the converter are shown.

**Keywords:** cycloconverters, ship electric power system, modeling.

#### References

- [1] Ya.F. Anisimov “Osobennosti primeneniya poluprovodnikovyykh preobrazovateley v sudovykh elektroustanovka” [Features of the use of semiconductor converters in ship electrical installations], *Sudostroyeniye [Shipbuilding]*, Leningrad, 1973, p. 227.
- [2] P. Gnaciński et al. Power Quality and Energy-Efficient Operation of Marine Induction Motors. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 152193-152203, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017133.
- [3] Ya.F. Anisimov “Elektromagnitnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovateley i sudovykh elektroustanovok” [Electromagnetic compatibility of semiconductor converters and ship electrical installations], *Sudostroyeniye [Shipbuilding]*, Leningrad, 1990, p.264
- [4] Pat. 2691968, Ros. Federation, IPC H02M 5/27. Transformerless direct frequency converter / V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, N.S. Varlamov; dec. and patent region. FGBOU VO "Volzhsk. state University of Water Transport, No. 2018123270; Appl. 06/26/2018; Published 06/19/2019.
- [5] V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Yu.S. Malyshev “Vliyaniye izmeneniya parametrov istochnika elektroenergii na vykhodnoye napryazheniye bestransformatornogo neposredstvennogo preobrazovatelya chastoty” [Influence of changing the parameters of the power source on the output voltage of a transformerless direct frequency converter], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledova-tel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems]*, 2021, no. 37, pp. 48–68, DOI: 10.15593/2224-9397/2021.1.03
- [6] Pat. 2758443, Ros. Federation, IPC H02M 5/27. Three-phase transformerless direct frequency converter / V.G. Sugakov, N.S. Varlamov; dec. and patent-tool. FGBOU VO "Volzhsk. state University of Water Transport, No. 2020138088; Appl. 11/19/2020; Published 28.10.2021.

УДК 681.515.4+621.311.6

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_44

**И.И. Таболин, Р.Ю. Кузьменко, А.Д. Данилов****ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ АППАРАТУРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ СЕТИ КОМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Воронежский государственный технический университет

**Аннотация.** В статье в качестве типа регулятора мощности солнечной батареи для аппаратуры регулирования и контроля бортовой сети космического аппарата приводится регулятор параллельного типа. Приведён способ наращивания мощности регулятора в виде параллельного соединения силовых электронных модулей. Описаны условия устойчивости регулятора мощности солнечной батареи к отказам. Приведена схема резервирования регулятора мощности солнечной батареи.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, аппаратура регулирования и контроля, регулятор мощности, регулятор параллельного типа, техническое решение.

**Введение**

Аппаратура регулирования и контроля (АРК) – разрабатываемая в данный момент система энергоснабжения (СЭС) космического аппарата (КА). Данная СЭС совместно с первичными источниками энергии – солнечными батареями (СБ), и вторичными источниками энергии – аккумуляторными батареями (АБ), обеспечивает потребителей бортовой сети электрической энергией на этапах наземных испытаний и предстартовой подготовки, а также во всех режимах полёта [1-3].

Основное назначение АРК – формирование и стабилизация на выходных шинах напряжения постоянного тока 28,5 В [4]. Модуль регулятора тока СБ (РТ) обеспечивает непрерывное регулирование тока генератора СБ и автоматически включается в работу при подключении их ко входу СБ или наземного источника питания – имитатора СБ [4-7].

Для надёжной работы АРК требуется наличие качественного регулятора мощности СБ. Целью данной работы является выбор технического решения регулятора мощности СБ АРК. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- провести выбор типа регулятора мощности СБ;
- привести способ наращивания мощности регулятора;
- описать условия устойчивости регулятора мощности СБ к отказам;
- привести схему резервирования регулятора мощности СБ.

**Тип регулятора мощности СБ**

Поскольку СБ является источником тока в СЭС КА в качестве регуляторов мощности наибольшее применение получили регуляторы с ШИМ-

регулирующим с параллельным включением регулирующего элемента и развязывающим диодом. Схема регулятора СБ параллельного типа приведена на рис. 1.

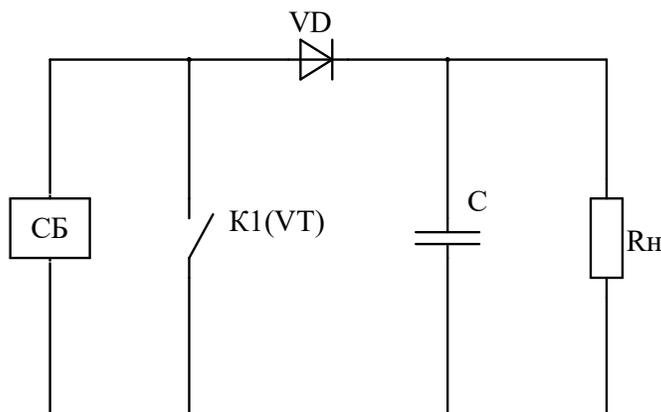


Рис. 1. Регулятор СБ параллельного типа

Схема обладает самовосстанавливаемостью в случае нештатного нарушения ориентации КА, так как всегда имеется цепь прямого протекания тока СБ в нагрузку через развязывающий диод. Кроме того, в этой схеме отсутствует режим холостого хода для СБ, характерный для регуляторов с последовательным регулирующим элементом, что значительно сказывается на надёжности её работы: напряжение СБ в случае работы на холостом ходу сразу после выхода её из тени в начале эксплуатации может превышать рабочее напряжение в 2-3 раза. Наличие таких напряжений приведёт к необходимости увеличения номинального напряжения элементов входных цепей СЭС, увеличению их габаритов и массы, и снижению надёжности.

В современных регуляторах мощности СБ в качестве параллельного регулирующего элемента и развязывающего диода целесообразно использовать современные MOSFET-транзисторы с изолированным управляющим затвором и диоды Шоттки, а в качестве ёмкости фильтра-танталовые объёмно-пористые герметичные электрические конденсаторы Ultra-LOWESR технологии.

### Повышение мощности регулятора

Основным способом наращивания мощности регуляторов является параллельное соединение силовых электронных модулей, выполненных на отечественных или импортных элементах. Основной трудностью параллельного соединения силовых модулей является невозможность выполнения их с полностью идентичными характеристиками. Источником проблем в статических режимах работы модулей является напряжение насыщения диодов и транзисторов, а в динамических режимах – время переключения транзисторов и обратного восстановления диодов.

Проблема выравнивания статических характеристик для MOSFET-транзисторов с изолированным управляющим затвором решается автоматически за счёт особенности технологии. Имеющийся положительный температурный

коэффициент напряжения насыщения обеспечивает автоматическое выравнивание статических токов параллельных транзисторов. В этом случае параллельное соединение силовых модулей в регуляторах мощности в части симметрирования статических характеристик реализуется достаточно просто, поскольку вероятность появления в реальном параллельном соединении комбинации диодов или транзисторов с предельными характеристиками крайне мала.

В реальных применениях динамические потери, возникающие при переключении транзисторов и диодов, имеют не меньшее значение, чем статическое. Проблемы, возникающие при переключении параллельно соединённых транзисторов, усложняются наличием переходных процессов и перенапряжений, имеющих место из-за наличия паразитных индуктивностей в коммутируемых цепях.

При параллельном включении топология силовых шин внутри и вне силового модуля должна обеспечивать не только минимальное значение индуктивности рассеяния ( $L_S$ ), но и одинаковое их значение во всех параллельных цепях. Уровень перенапряжения, воздействующего при этом на транзистор и определяемого как (1), может превысить допустимое напряжение:

$$dU = L_S \cdot \frac{dI_{SC}}{dt}, \quad (1)$$

где  $L_S$  – индуктивность шины;  $\frac{dI_{SC}}{dt}$  – скорость изменения тока.

Требование симметрии подключения транзисторов касается и цепей управления затворами, где разность в значении индуктивности цепей приводит к различным задержкам включения – выключения транзистора.

Как показывает практика, именно динамические режимы ограничивают возможности использования параллельного соединения силовых электронных модулей. По этой причине требуемую мощность модуля целесообразно получать за счёт использования единичного мощного транзистора и единичного диода, допускающих требуемые коммутируемые токи в динамических режимах.

### **Условия устойчивости регулятора мощности СБ к отказам**

Для построения регулятора с высокой надёжностью необходимо выполнить следующие условия устойчивости к отказам:

- в регуляторе должен быть по крайней мере один модуль, способный работать вместо вышедшего из строя;
- вышедший из строя модуль должен изолировать себя так, чтобы это не создавало помех для других модулей и системы в целом, и не должен расходовать энергию источника;
- после возникновения неисправности регулятор сохраняет работоспособность, но его надёжность снижается из-за меньшего числа функционирующих модулей (система должна определить возникновение неисправности и выдать информацию в телеметрическую систему).

### Схема резервирования регулятора мощности СБ

На рис. 2 приведена схема резервированного регулятора мощности СБ, состоящего из двух однотипных модулей РТ.

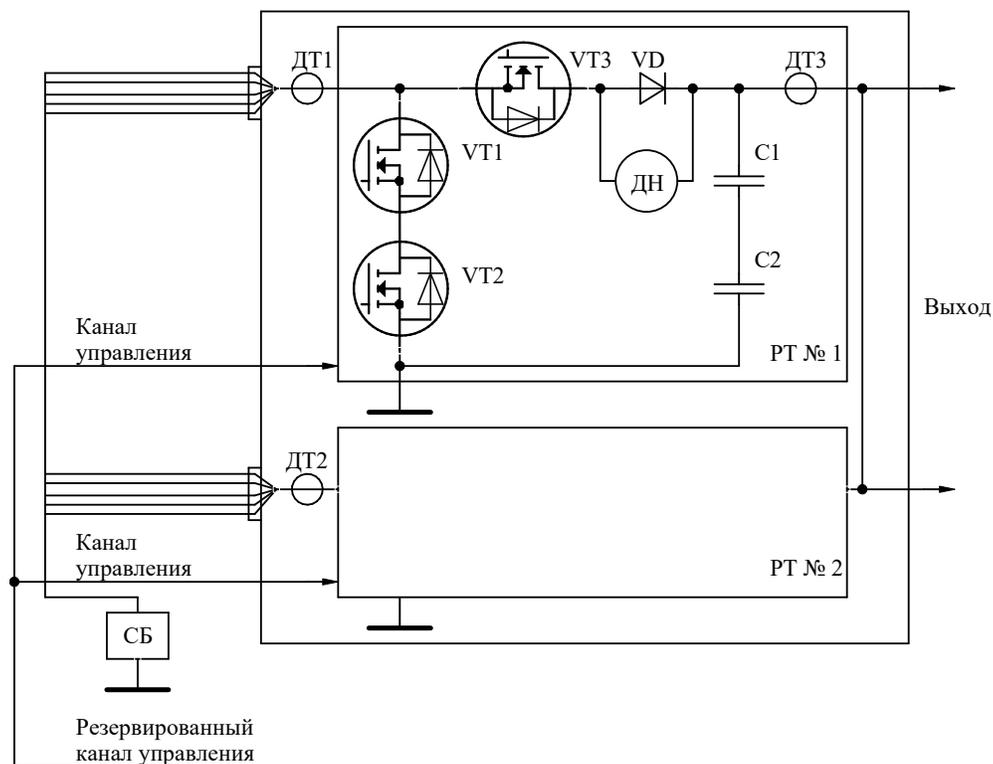


Рис. 2. Резервированный регулятор мощности СБ

Резервирование от короткого замыкания в транзисторах и конденсаторах осуществляется их последовательным включением (VT1 с VT2 и C1 с C2). Развязывающий диод VD резервируется последовательным включением транзистора VT3, внутренний диод которого включается согласно с диодом VD. При исправной работе регулятора транзистор VT3 находится в открытом состоянии, обеспечивая минимальные статические потери, не превышающие 4 Вт при токе СБ до 30 А.

При коротком замыкании диода VD реверсивный датчик тока ДТ3 или датчик напряжения ДН фиксируют эту неисправность диода и снимают управление с транзистора VT3, вследствие чего внутренний диод транзистора VT3 начинает выполнять функцию развязывающего диода.

Управление основным и резервным РТ осуществляется отдельными каналами, формируемыми от общей системы управления СЭС, при этом имеется возможность иметь холодный или горячий резерв.

### Заключение

В данной работе был произведён выбор технического решения регулятора мощности СБ для РТ АРК бортовой сети КА. Надёжность работы регулятора в значительной мере зависит от принятых конструктивных решений, в частности, грамотная разводка силовых шин и эффективный отвод тепла от силовых элементов являются обязательными условиями безотказной работы регулятора.

Рекомендации к конструированию регуляторов:

- разводка силовых цепей шинами с минимальными размерами между цепями сток транзистора – анод диода; исток транзистора – "минус"-вывод конденсатора; катод диода – "плюс"-вывод конденсатора (минимальное значение индуктивности);
- раздельная разводка по отношению к силовым шинам цепей управления (непосредственно к выводам транзистора);
- предотвращение теплового перегрева силовых диодов и транзисторов выше (20-30) °С;
- обеспечение разводки входных и выходных цепей должна быть с плотностью тока в шинах не более 5 А/мм<sup>2</sup>.

### Библиографический список

1. **Варенбуд Л.Р.** Инновационные решения при разработке аппаратуры регулирования и контроля систем энергоснабжения космических аппаратов / Л.Р. Варенбуд, В.Н. Волокитин // Энергия - XXI век. – Воронеж, 2013 – №1 (84) – С. 16-27.
2. **Савенков В.В.** Принципы построения аппаратуры регулирования и контроля современных систем электроснабжения малоразмерных космических аппаратов / В.В. Савенков, А.К. Тищенко, В.Н. Волокитин // Решетневские чтения. – Красноярск, 2017 – Т. 1 – С. 325-326.
3. **Савенков В.В.** Аппаратура регулирования и контроля системы электропитания перспективного пилотируемого транспортного корабля / В.В. Савенков, А.К. Тищенко, В.Н. Волокитин // Решетневские чтения. – Красноярск, 2018 – Т. 1 – С. 303-304.
4. **Таболин И.И.** Разработка структуры аппаратуры регулирования и контроля системы энергоснабжения космического аппарата / И.И. Таболин, А.Д. Данилов // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. – Воронеж, ВГТУ – 2020.
5. **Таболин И.И.** Реализация зонного принципа работы аппаратуры регулирования и контроля бортовой энергосистемы космического аппарата / И.И. Таболин, А.Д. Данилов // Актуальные проблемы электроэнергетики – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2020. – С. 132-135.
6. **Таболин И.И.** Реализация зонного принципа в системе управления аппаратурой регулирования и контроля бортовой сети космического аппарата / И.И. Таболин, Р.Ю. Кузьменко, А.Д. Данилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 5. – С. 41-46.
7. **Таболин И.И.** Разработка математической модели модуля регулятора тока в системе управления аппаратуры регулирования и контроля бортовой сети космического аппарата / И.И. Таболин, Р.Ю. Кузьменко, А.Д. Данилов // Завалишинские чтения'22 – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 97-102.

I.I. Tabolin, R.Y. Kuzmenko, A.D. Danilov

## SELECTION OF A TECHNICAL SOLUTION FOR A SOLAR BATTERY POWER REGULATOR IN REGULATION AND MONITORING EQUIPMENT OF SPACECRAFT ONBOARD NETWORK

Voronezh State Technical University  
Voronezh, Russia

**Abstract.** In the article, as a type of a solar battery power regulator in the regulation and monitoring equipment of spacecraft onboard network, a parallel-type regulator is given. A method for increasing a power of the regulator in the form of a parallel connection of power electronic modules is given. The conditions for the stability of the solar battery power regulator to failures are described. The redundancy scheme of the solar battery power regulator is given.

**Key words:** power supply system, regulation and monitoring equipment, power regulator parallel type regulator, technical solution.

### References

- [1] L.R. Varenbud, V.N. Volokitin “Innovatsionnyye resheniya pri razrabotke apparatury regulirovaniya i kontrolya sistem energosnabzheniya kosmicheskikh apparatov” [Innovative solutions in the development of regulation and monitoring equipment of spacecraft power supply systems], Energy - XXI century. – Voronezh, 2013 – No. 1 (84) – pp. 16-27.
- [2] V.V. Savenkov, A.K. Tishchenko, V.N. Volokitin “Printsipy postroyeniya apparatury regulirovaniya i kontrolya sovremennykh sistem elek-trosnabzheniya malorazmernykh kosmicheskikh apparatov” [Principles of construction of regulation and monitoring equipment of modern power supply systems for small spacecraft], Reshetnev readings. – Krasnoyarsk, 2017 – vol. 1 – pp. 325-326.
- [3] V.V. Savenkov, A.K. Tishchenko, V.N. Volokitin “Apparatura regulirovaniya i kontrolya sistemy elektropitaniya perspektivnogo piloti-ruyemogo transportnogo korablya” [Regulation and monitoring equipment of the power supply system of a promising manned transport vehicle], Reshetnev readings. – Krasnoyarsk, 2018 – vol. 1 – pp. 303-304.
- [4] I.I. Tabolin, A.D. Danilov “Razrabotka struktury apparatury regulirovaniya i kontrolya sistemy energosnabzheniya kosmicheskogo apparata” [Development of the regulation and monitoring equipment structure of the spacecraft power supply system], Alternative and Intellectual Energy. – Voronezh, VSTU – 2020 – pp. 216-217.
- [5] I.I. Tabolin, A.D. Danilov Tabolin I.I. “Realizatsiya zonnogo printsipa raboty apparatury regulirovaniya i kontrolya bortovoy energosistemy kosmicheskogo apparata” [Implementation of the zone principle of operation of the equipment for regulation and control of the onboard power system of the spacecraft], Actual problems of the electric power industry. – Nizhny Novgorod. STU them. R.E. Alekseeva. – Nizhny Novgorod – 2020 – pp. 132-135.
- [6] I.I. Tabolin, R.Y. Kuzmenko, A.D. Danilov “Realizatsiya zonnogo printsipa v sisteme upravleniya apparatury regulirovaniya i kontrolya bortovoy seti kosmicheskogo apparata” [Implementation of zone principle in the control system of regulation and monitoring equipment of spacecraft onboard network], Bulletin of Voronezh State Technical University – 2021. – vol. 17. – No 5. – pp. 41-46.
- [7] I.I. Tabolin, R.Y. Kuzmenko, A.D. Danilov “Razrabotka matematicheskoy modeli modulya regulyatora toka v sisteme upravleniya apparatury regulirovaniya i kontrolya bortovoy seti kosmicheskogo apparata” [The development of a mathematical model of the current regulator module in regulation and monitoring equipment control system of spacecraft onboard network], Zavalishin Readings'22 – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2022. – pp. 97-102.

УДК 621.311.6

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_50

Д.А. Ульянов, Н.Н. Вихорев

## АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИБРИДНОМ ИСТОЧНИКЕ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** современные потребители электроэнергии требуют высококачественного и бесперебойного электропитания, что определяет выбор в пользу источников бесперебойного питания (ИБП) типа «on-line» по топологии двойного преобразования. Такое решение имеет относительно низкий коэффициент полезного действия (КПД) в режиме стабилизации, поэтому предложена схемотехника ИБП, позволяющая увеличить КПД, снизить металлоемкость и обеспечить высокие динамические свойства. В статье описан принцип стабилизации и алгоритмы переключения при переходе из режима работы от сети в автономный режим, а также обратный процесс. Приведены результаты моделирования работы устройства при различных типах нагрузки и определены параметры переходных процессов для каждого из них.

**Ключевые слова:** ответственный потребитель, дельта-преобразование, серийный и шунтовый трансформаторы, высокочастотный импульсный преобразователь, инвертор напряжения.

Такие потребители, как телекоммуникационное оборудование, стационарная и переносная медицинская техника, аварийное освещение, охранные аудиотелевизионные системы, насосные станции водоснабжения и отопления не терпят перерывов в электропитании, так как это сопровождается потерей данных, остановкой производственного процесса и нанесением вреда здоровью людей. Время ввода резервной линии или дизель-генератора может составлять от 40 секунд до нескольких минут. В этот промежуток времени напряжение на ответственном потребителе должен поддерживать ИБП.

Помимо полного отключения электропитания возможно также отклонение величины питающего напряжения, превышающее допустимые пределы для конкретной нагрузки. Согласно ГОСТ величина отклонений не должна превышать 10% от номинального напряжения. Разброс питающего напряжения отрицательно влияет на ресурс блоков питания, качество работы информационного оборудования и функционирование электродвигателей. Поэтому для защиты чувствительного оборудования помимо установки ИБП частым решением является дополнительная установка стабилизатора напряжения, что увеличивает как стоимость конструкции, так и массогабаритные показатели.

Приборы, которые при сбое электросети обеспечивают непрерывное питание потребителя и обладают режимом стабилизации, имеют название «on-line» и на данный момент выполняются по схеме двойного преобразования. Такое решение имеет недостаток: относительно невысокий КПД 90,8...93,5 %, что неприемлемо при высоких значениях мощности нагрузки.

Повышение КПД возможно за счет изменения схемотехники ИБП типа «on-line» на дельта-преобразование до 96,5%. Такие устройства выпускались фирмой APC на мощности до 40 кВт, но они не получили большого распространения ввиду главного недостатка: высокий КПД обеспечивается только при работе на полную мощность и активную нагрузку.

Для устранения вышеназванного недостатка предлагается гибридная схемотехника дельта-преобразования ИБП, представленная на рис. 1.

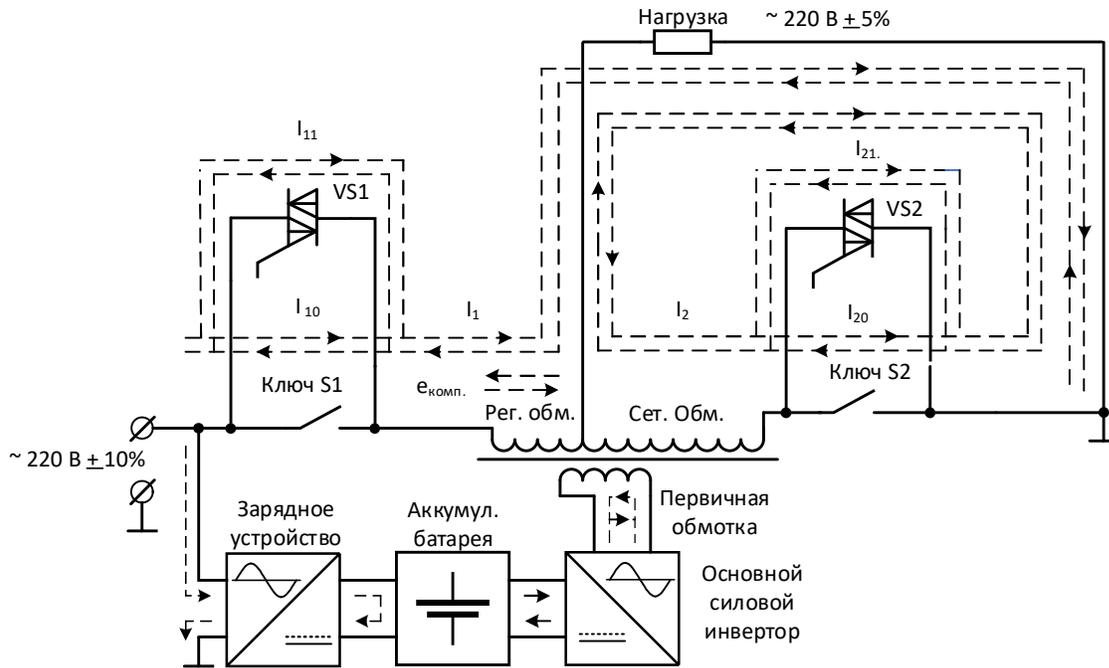


Рис. 1. Гибридная схемотехника дельта-преобразования ИБП

Зарядное устройство выполняется на 20% мощности нагрузки по схемотехнике типичного высокочастотного импульсного блока питания с корректором коэффициента мощности (ККМ). Это позволяет снизить металлоемкость за счет применения высокочастотного трансформатора меньших габаритов и снизить влияние работы устройства на качество потребляемой из сети электроэнергии. Номинальное напряжение аккумуляторной батареи (АКБ) выбирается согласно требуемому напряжению регулирования, с поправкой на энергетические потери в преобразователе. Для сети 0,4 кВ наиболее оптимальным является напряжение АКБ не менее 48 В. Основной силовой инвертор выполняется по классической мостовой схеме на полную мощность нагрузки. Дельта-трансформатор представляет собой сетевой трансформатор с одной первичной обмоткой и одной вторичной, разделенной на две секции.

Номинальный режим работы устройства заключается в формировании на нагрузке напряжения 220 В путем стабилизации сетевого напряжения в диапазоне  $\pm 10\%$ . Компенсация допустимых отклонений в сети происходит за счет создания на регулировочной обмотке электродвижущей силы (ЭДС), которая формируется либо синфазно с сетью, либо в противофазе. Дополнительная ЭДС

в контуре сеть – ключ S1 – регулировочная обмотка – нагрузка создается за счет протекания тока в первичной обмотке трансформатора от аккумуляторной батареи через основной силовой инвертор. Фаза (0 гр. или 180 гр.) дополнительной ЭДС зависит от направления тока в первичной обмотке.

Временные и векторные диаграммы, поясняющие принцип работы преобразователя в режиме стабилизации, приведены на рис. 2.

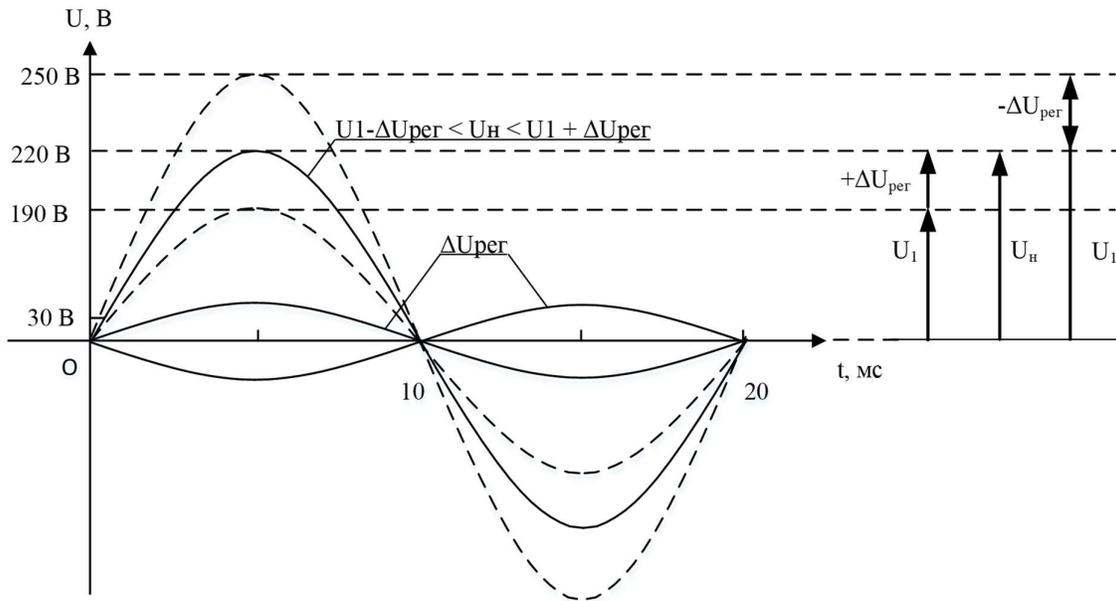


Рис. 2. Принципа работы преобразователя в режиме стабилизации

При выходе мгновенного значения питающего напряжения из зоны регулирования устройство переходит в режим работы от батареи и устанавливается триггер защиты. При этом ключ S1 размыкается и вступает в работу симистор VS2. Основной поток мощности продолжает протекать уже по контуру аккумуляторная батарея – основной силовой инвертор – первичная обмотка трансформатора – сетевая обмотка трансформатора – симистор VS2 - нагрузка. Как только ключ S1 разомкнется, ключ S2 шунтирует симистор VS2 и устройство входит в установившийся режим работы. Если напряжение сети не полностью исчезло, а просело по величине ниже допустимых отклонений, то зарядное устройство может продолжать питать аккумуляторную батарею от пониженного напряжения для увеличения автономного времени работы устройства.

Графическое пояснение алгоритма переключения приведено на блок схеме на рис. 3.

При достижении действующего значения сетевого напряжения за полупериод до зоны стабилизации триггер защиты сбрасывается, возвращая преобразователь в исходное состояние. Работа по действующей величине позволяет исключить многократные срабатывания при кратковременных бросках напряжения. Условие сброса триггера по минимальной величине напряжения позволяет

осуществить переключение контакторов в менее нагруженных условиях, исключив перенапряжения.

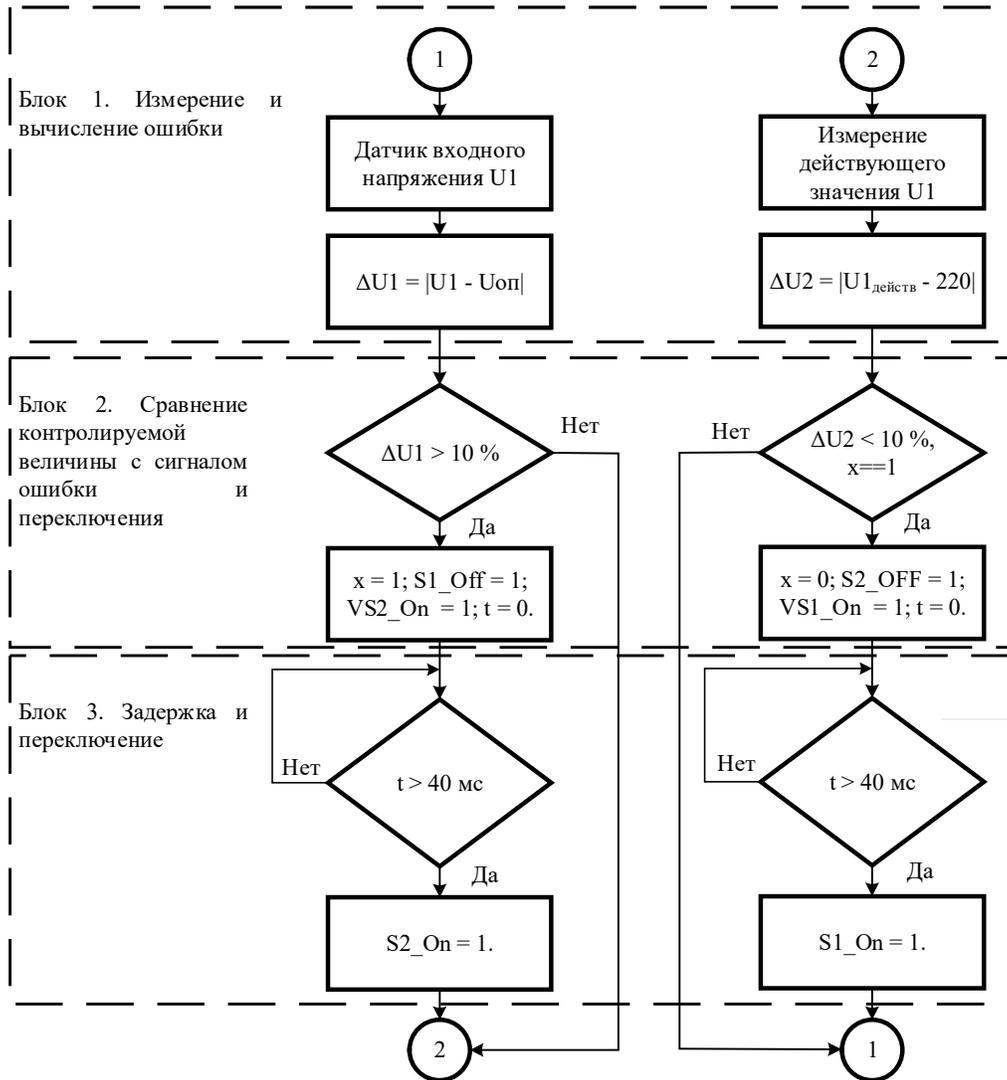


Рис. 3. Алгоритм переключений устройства при переходе в другой режим

На рис. 4 приведена имитационная модель устройства для исследования процессов переключения из режима работы от сети в автономный.

Схема устройства дополнена RC – цепями, шунтирующими сетевую и регулировочную обмотки. В момент переключения реактивная энергия поглощается конденсаторами, что приводит к снижению колебательного переходного процесса на нагрузке. Также их величина влияет на величину тока первичной обмотки трансформатора в режиме стабилизации: чем больше величина конденсатора, тем больше потребляемый трансформатором ток. Для исследуемого прибора определены оптимальные параметры RC – цепей: для регулировочной обмотки -  $R_{ш} = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $L_{ш} = 10 \text{ мкФ}$ , для сетевой обмотки -  $R_{ш} = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $L_{ш} = 50 \text{ мкФТ}$ . Также схема дополнена выходным высокочастотным фильтром для фильтрации высших гармонических составляющих.

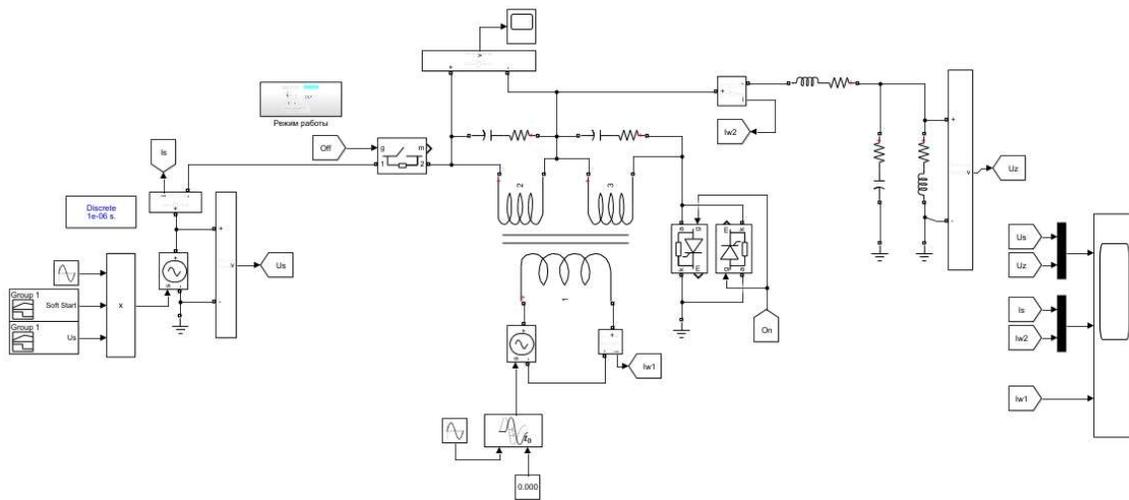


Рис. 4. Имитационная модель предлагаемого решения

На рис. 5 приведены семейство временных диаграмм перехода ИБП в автономный режим и обратный процесс при мощности нагрузки 5 кВА с параметрами трансформатора  $L_{рег} = L_{перв} = 61 \text{ мкГн}$  и  $L_{сет} = 3 \text{ мГн}$  на три параметра нагрузки:

- 1)  $R = 9,7 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,001 \text{ Гн}$ ,  $\varphi = 2 \text{ гр.}$ ;
- 2)  $R = 6,8 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,022 \text{ Гн}$ ,  $\varphi = 45 \text{ гр.}$ ;
- 3)  $R = 1 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,031 \text{ Гн}$ ,  $\varphi = 84 \text{ гр.}$

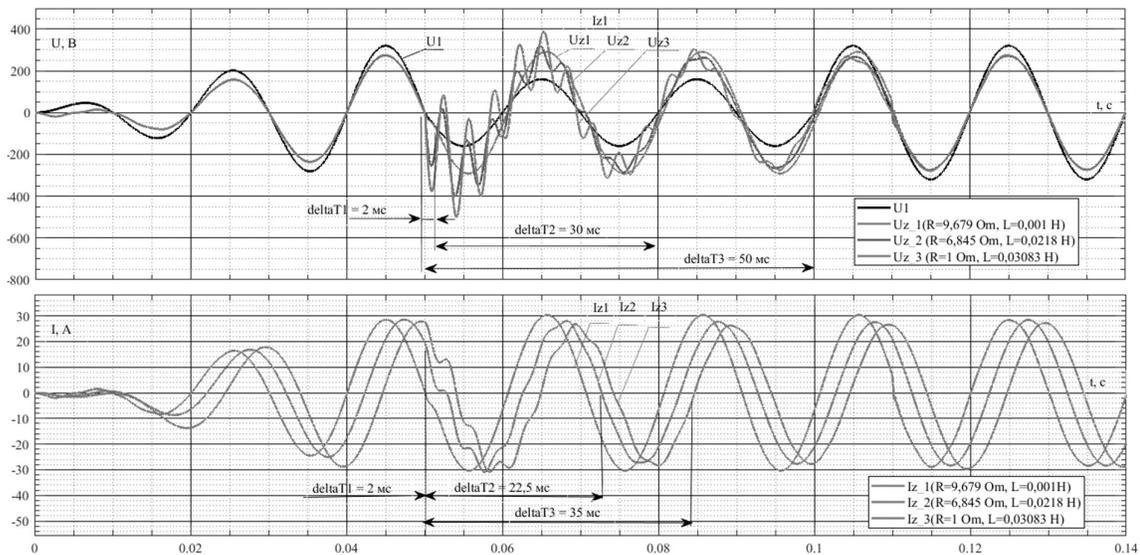


Рис.5. Временные диаграммы процесса перехода в режим автономного питания

В момент спада питающего напряжения в два раза напряжение на нагрузке не пропадает, но имеет гармонические искажения в течение переходного процесса. При активно-индуктивной нагрузке с преобладающей активной частью переходный процесс длится 2 мс и сопровождается отклонением напряжения от

номинального на 5%, что допустимо для питания чувствительной к искажениям нагрузки. При равных активных и индуктивных составляющих переходный процесс длится 30 мс и сопровождается отклонениями в 50 %. При преобладании индуктивной составляющей над активной переходный процесс длится 50 мс и сопровождается отклонениями в 100%. Следовательно, последние два режима подходят только для питания нагрузки общего назначения. Данный режим является наиболее тяжелым для большинства источников бесперебойного питания, однако, несмотря на это, предлагаемое решение обеспечивает процесс переключения.

Таким образом, предлагаемая схемотехника позволяет получить значительно более энергоэффективный динамичный источник бесперебойного питания, обеспечивающий как непрерывность электропитания, так и стабилизацию выходного напряжения в широком диапазоне нагрузки различного характера тока.

#### Список литературы

1. **Виленкин, А. Г.** Импульсные транзисторные стабилизаторы напряжения / А. Г. Виленкин. – Москва: «ЭНЕРГИЯ», 1970. – 67 с.
2. **Иванчук, Б. Н.** Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения / Б. Н. Иванчук. – Москва: «ЭНЕРГИЯ», 1968. – 115 с.
3. **Сажнев, А. М.** Источники бесперебойного электропитания переменного тока / А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2015. – 312 с.

D. A. Ulyanov, N.N. Vikhorev

**ANALYSIS OF SWITCHING PROCESSES IN A HYBRID  
UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY**

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

**Abstract:** modern electricity consumers require high-quality and uninterrupted power supply, which determines the choice in favor of uninterruptible power supplies (UPS) of the "on-line" type according to the double conversion topology. This solution has a relatively low coefficient of performance (CoP) in the stabilization mode, therefore, a UPS circuitry has been proposed that allows you to increase efficiency, reduce metal consumption and provide high dynamic properties. The article describes the principle of stabilization and switching algorithms during the transition from the network to offline mode, as well as the reverse process. The results of simulation of the operation of the device under various types of load are presented and the parameters of transient processes for each of them are determined.

**Key words:** responsible consumer, delta conversion, series (booster) and shunt (main) transformers, high-frequency pulse converter, voltage inverter.

**References**

- [1] A. G. Vilenkin "Impul'snyye tranzistornyye stabilizatory napryazheniya" [Switching transistor voltage stabilizers] "ENERGIYA" [ENERGY], Moscow, 1970, p. 67.(in Russian)
- [2] B. N. Ivanchuk "Tiristornyye i magnitnyye stabilizatory napryazheniya" [Thyristor and magnetic voltage stabilizers] "ENERGIYA" [ENERGY], Moscow, 1968, p. 115. (in Russian)
- [3] A. M. Sazhnev, L. G. Rogulina. "Istochniki bespereboynogo elektropitaniya peremennogo toka" [Uninterruptible AC power supply sources], Novosibirsk, 2015, p. 312(in Russian)

---

---

**Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

---

УДК 621.3.07

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_57

**Т.Х. Абузьяров****АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА  
ДВОЙНОЙ ИНВЕРТОРНОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ ШАГОВОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Шаговый электропривод широко применяется в системах позиционирования промышленных объектов, автономных объектов, робототехники ввиду своей низкой стоимости и простоты организации бездатчиковых следящих систем. Для биполярного управления фазным током шаговых электродвигателей, как правило, применяется классическая мостовая схема автономного инвертора напряжения. Использование широтно-импульсной модуляции для поддержания заданного значения фазного тока обуславливает значительные искажения и ярко выраженный высокочастотный спектр потребляемого преобразователем тока, что может быть неприемлемо по соображениям электромагнитной совместимости. Таким образом, актуален анализ гармонического состава потребляемого тока альтернативных преобразовательных систем с целью выявления схемных решений, обладающих сниженным уровнем искажений и низкочастотным спектром гармоник потребляемого тока. Применение двойной инверторной системы позволяет несколько сместить спектр гармоник потребляемого электроприводом тока в область низких частот на протяжении всего диапазона регулирования по скорости; при высоких скоростях вращения вала исследуемый преобразователь демонстрирует заметно меньший уровень искажений потребляемого тока.

**Ключевые слова:** многоуровневый преобразователь, двойная инверторная система, шаговый электродвигатель, моделирование электропривода

**Введение**

Шаговые электродвигатели (ШД) ввиду своей низкой стоимости широко применяются в системах позиционирования роботов, промышленных системах автоматизации, станках с числовым программным управлением, бытовой технике и т. д. [1-2].

Применение мостового инвертора напряжения является наиболее распространенным схемным решением силовой части преобразователя при организации биполярного управления током фаз ШД. Применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения преобразователя для поддержания заданной величины фазного тока вызывает высокочастотные прерывания потребляемого инвертором тока. Наличие ярко выраженного высокочастотного спектра, потребляемого преобразователем тока, может отрицательно влиять на работу чувствительного оборудования [3-5].

В связи с этим, поиск альтернативных схемных решений преобразовательной части шагового электропривода, позволяющей снизить амплитуду высокочастотных гармоник и/или сместить их спектр в сторону низких частот, является одной из актуальных задач этой области.

С другой стороны, одной из характерных особенностей ШД является значительный рост импеданса фазы при средних и высоких скоростях вращения вала. Это обусловлено высоким эквивалентным числом пар полюсов (обычно 50 и более). В связи с этим значительная (а иногда – бóльшая) часть энергии, генерируемая преобразователем, является реактивной и не участвует в образовании электромагнитного момента.

Работы [6, 7] указывают на эффективность применения для питания машин переменного тока двойных преобразовательных систем, использующих изолированный от источника питания дополнительный инвертор, работающий подобно последовательно включенному конденсатору регулируемой емкости, для компенсации реактивной энергии, потребляемой электрической машиной.

Данная работа является продолжением исследования [7] и посвящена анализу гармонического состава потребляемого тока двойной инверторной системой, предложенной в [7] для питания ШД.

### **Двойная инверторная система**

Силовая часть исследуемого преобразователя для питания двухфазного ШД приведена на рис. 1.

Схема содержит четыре мостовых инвертора ИН1–ИН4 – по два на каждую фазу электродвигателя. Звено постоянного тока основных инверторов ИН1 и ИН3 подключено к источнику питания, тогда как к звеньям постоянного тока дополнительных инверторов ИН2 и ИН4 подключены только конденсаторы С2 и С3 соответственно. В данной работе предполагается, что система управления обладает информацией о текущем положении ротора электродвигателя (например, от соответствующего датчика или наблюдателя состояния), а входное напряжение дополнительных инверторов поддерживается равным входному напряжению основных методами системы управления. Для управления данной инверторной системой предлагается использовать специальным образом адаптированное векторное управление электродвигателем.

Функциональная схема предложенной системы управления представлена на рис. 2.

Управление ШД осуществляется по принципу векторного управления, адаптированного для управления двойной инверторной системой с помощью таблицы поиска. Каждый из двойных инверторов фаз А и В способен генерировать пять уровней выходного напряжения (при равенстве входных напряжений основных и дополнительных инверторов). При генерации трех промежуточных уровней напряжения двойной инверторной системе доступно две или три альтернативных конфигурации включенных силовых элементов, отличающихся между собой способом подключения дополнительных инверторов в цепь статора. В зависимости от выбранной конфигурации и направления тока статора конденсаторы С2 и С3 могут заряжаться, разряжаться или быть отсеченными от статорной

цепи. Система управления, анализируя напряжение конденсаторов  $C2$  и  $C3$ , знаки токов фаз и выходной сигнал контура тока, каждый период несущей частоты с помощью таблицы поиска выбирает наиболее подходящую конфигурацию включенных силовых элементов преобразовательной системы, поддерживая таким образом входное напряжение дополнительных инверторов на заданном уровне.

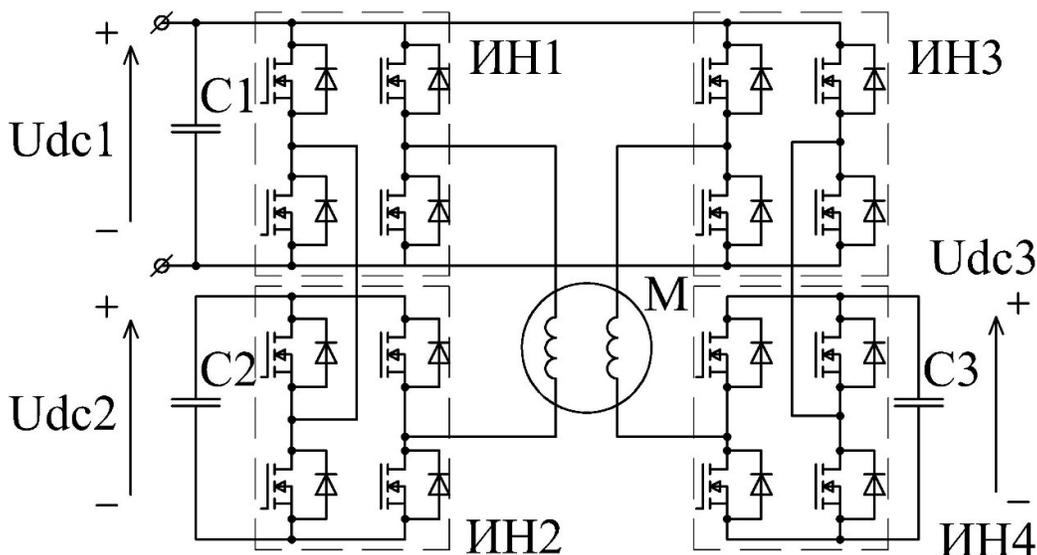


Рис. 1. Силовая часть исследуемой инверторной системы

Для выполнения целей исследования в программной среде Matlab / Simulink была построена модель, отражающая электромеханические процессы, происходящие в исследуемом электроприводе, а также работу алгоритмов системы управления.

Подсистема таблицы поиска представляет собой генератор ШИМ, преобразующий сигнал регулятора тока в требуемый уровень напряжения фазы, и трехмерную таблицу поиска, выходными данными которой является вектор, управляющий непосредственно силовыми транзисторами инверторов.

Требуемый уровень напряжения фазы изменяется в диапазоне  $\{-2, -1 \dots 2\}$  и образуется методом многоуровневой ШИМ, при которой модулирующий сигнал задания напряжения сравнивается с несколькими пилообразными несущими сигналами.

Как и в предыдущем исследовании [7], в рамках данной работы сравниваются две преобразовательные системы: классическая схема с напряжением звена постоянного тока 72 В и двойная инверторная система с напряжением звена постоянного тока основных инверторов и дополнительных инверторов 48 В.

Параметры исследуемого ШД, а также допущения, связанные с моделированием электрической машины представлены в [5]. Для проведения сравнительного анализа гармонического состава потребляемого тока указанных инверторных систем использовался встроенный инструмент *Powergui FFT Analysis tool*.

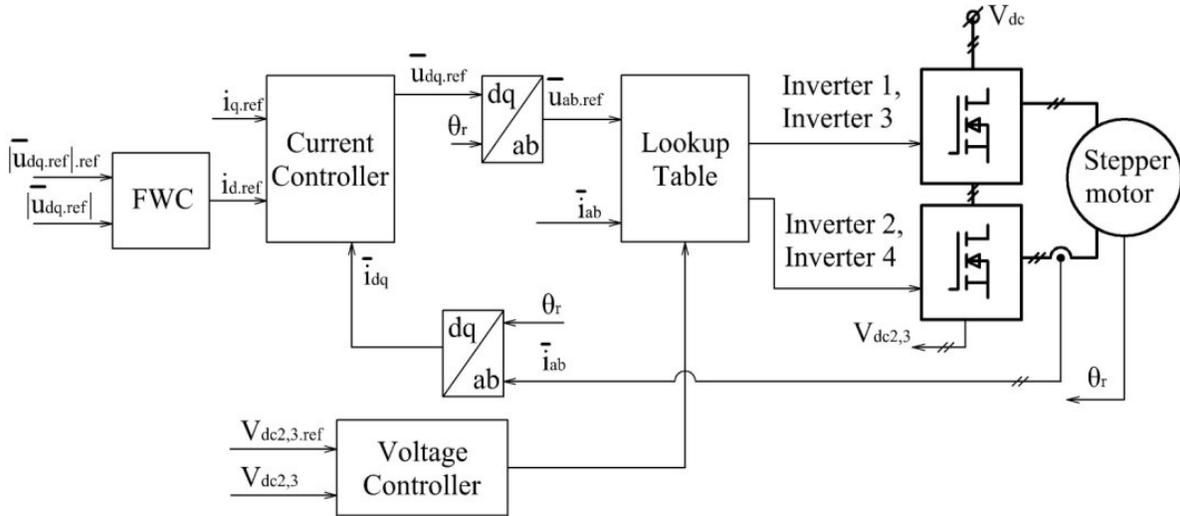


Рис. 2. Функциональная схема системы управления преобразователем.

### Результаты моделирования

На рис. 3 и рис. 4 представлены полученные в ходе моделирования осциллограммы потребляемого тока инвертора одной из двух фаз классического и исследуемого преобразователя соответственно при работе ШД со скоростью 1500 об/мин и максимально возможным моментом на валу.

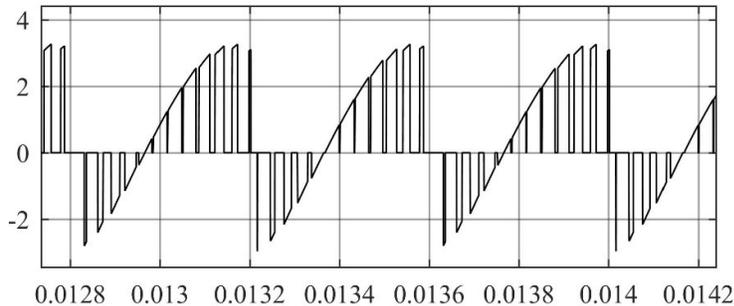


Рис. 3. График потребляемого тока (А) классического мостового преобразователя при скорости ШД 1500 об/мин

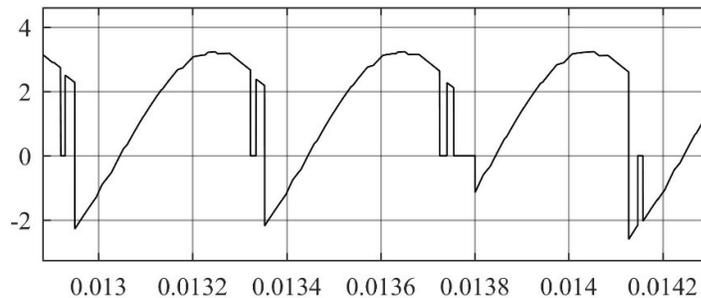


Рис. 4. График потребляемого тока (А) исследуемого преобразователя при скорости ШД 1500 об/мин.

Из осциллограмм видно, что потребляемый двойной инверторной системой ток прерывается значительно реже, что позволяет сделать вывод о меньшей амплитуде его высокочастотных составляющих. Это связано с тем, что при работе ШД на высоких скоростях вращения вала ШД система управления (таблица поиска) отдает предпочтение коммутациям дополнительных инверторов, тогда как частота коммутации основных инверторов при этом снижается. При более высоких скоростях вращения вала ШД выходное напряжение основных инверторов стремится по форме к знакопеременному меандру, частота коммутаций силовых элементов и, как следствие, частота резких изменений потребляемого тока стремятся к минимально возможной.

На рис. 5, 6 представлен гармонический состав потребляемого тока классического преобразователя (рис. 5) и исследуемого преобразователя (рис. 6) при различных скоростях работы ШД и максимально возможным моментом на валу (в пределах номинального момента).

При низких скоростях вращения вала ШД частота высших гармоник потребляемого тока снижена по сравнению с классическим инвертором. Это связано с тем, что исследуемый инвертор работает при пониженной частоте ШИМ (23 кГц против 30 кГц в классической схеме), что обусловлено равенством коэффициентов гармонических искажений генерируемого ШД электромагнитного момента сравниваемых преобразовательных систем.

При высоких скоростях вращения вала ШД наблюдается значительное сокращение амплитуды высокочастотного спектра, смещение гармонического состава потребляемого тока в область низких частот, а также снижение коэффициента гармонических искажений потребляемого тока: 152,84 % в случае исследуемой схемы против 217,7 % в случае классической схемы при скорости ШД 500 об/мин; 57,42 % в случае исследуемой схемы против 160 % в случае классической схемы при скорости ШД 1500 об/мин.

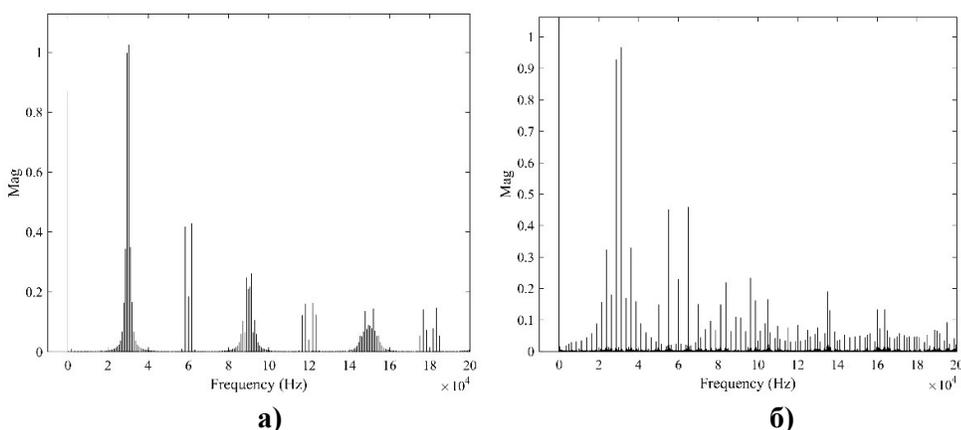


Рис. 5. Гармонический состав потребляемого тока (А) классического мостового преобразователя при скорости ШД: а – 500 об/мин; б – 1500 об/мин

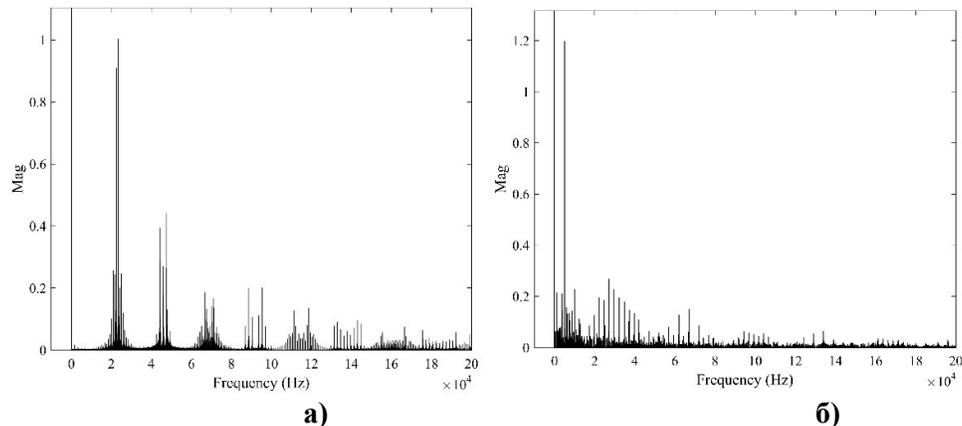


Рис. 6. Гармонический состав потребляемого тока (А) исследуемого преобразователя при скорости ШД: а – 500 об/мин; б – 1500 об/мин

### Заключение

В данной работе исследован гармонический состав двойной преобразовательной системы для шагового электропривода в сравнении с классической мостовой схемой.

Результаты моделирования указывают на значительное снижение амплитуды высокочастотного спектра гармоник потребляемого исследуемым преобразователем тока при высоких скоростях вращения вала ШД, и общее смещение спектра гармоник в область низких частот за счет снижения частоты ШИМ (при сохранении качества генерируемого электромагнитного момента электропривода), что способствует повышению электромагнитной совместимости электропривода

### Библиографический список

1. **Derammelaere S.** The Efficiency of Hybrid Stepping Motors / Derammelaere S. [et al.] // IEEE Industry Applications Magazine. – 2014. – С. 50–60. DOI: 10.1109/MIAS.2013.2288403
2. **Kien Minh Le.** An Advanced Closed-Loop Control to Improve the Performance of Hybrid Stepper Motor / Kien Minh Le [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. DOI 10.1109/TPEL.2016.2623341
3. **Lighting Q.** Electromagnetic Compatibility in Power Electronic Systems / Lighting Q. [et al.] // Journal of Electrical Engineering Technology. – 99 (14). – С. 77–82.
4. **Kwak S.** Design and rating comparisons of PWM voltage source rectifier and active power filters for AC drives with unity power factor / Kwak S. and Toliyat H. A. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – 20(5). – С. 1133–1142.
5. **Laboure E.** Accurate simulation of conducted interference in isolated DC-DC converters regarding to EMI standards / Laboure E. [et al.] // IEEE'1996. – 1996. – С. 1973–1978.
6. **Kim J.** Dual-Inverter Control Strategy for High-Speed Operation of EV Induction Motors / Kim J. [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – № 2(51).
7. **Абузьяров, Т. Х.** Двойная инверторная система для питания шагового электродвигателя с уменьшенным напряжением звена постоянного тока // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 1(50). – С. 27–34. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34.

**Т.Кх. Abuzyarov**

**Analysis of the harmonic composition of the consumed current of a double inverter system as part of a stepper drive**

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

**Abstract:** Stepper drive is widely used in positioning systems of industrial facilities, autonomous objects, robotics due to its low cost and sensorless tracking systems designing simplicity. A classic H-bridge circuit is commonly used for bipolar stepper motor phase current control. The use of pulse-width modulation in the current control algorithm causes significant distortion and a high-frequency spectrum of the inverter input current which may be unacceptable for electromagnetic compatibility reasons. Thus, in order to identify circuit solutions with a reduced input current distortion level the input current harmonic composition analysis of alternative inverter systems is relevant. The dual inverter system use slightly shifts the stepper drive input current harmonics spectrum to the low frequency region throughout the entire range of motor speed; at high speeds region the investigated inverter demonstrates a noticeably lower level of distortion of the consumed current.

**Key words:** multilevel inverter, dual inverter, stepper motor, electric drive model.

- [1] Derammelaere S. The Efficiency of Hybrid Stepping Motors, IEEE Industry Applications Magazine. – 2014. – С. 50–60. DOI: 10.1109/MIAS.2013.2288403
- [2] Kien Minh Le. An Advanced Closed-Loop Control to Improve the Performance of Hybrid Stepper Motor, IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. DOI 10.1109/TPEL.2016.2623341
- [3] Lighting Q. Electromagnetic Compatibility in Power Electronic Systems, Journal of Electrical Engineering Technology. – 99 (14). – С. 77-82.
- [4] Kwak S. Design and rating comparisons of PWM voltage source rectifier and active power filters for AC drives with unity power factor, IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – 20(5). – С. 1133–1142.
- [5] Laboure E. Accurate simulation of conducted interference in isolated DC-DC converters regarding to EMI standards, IEEE'1996. – 1996. – С. 1973–1978.
- [6] Kim J. Dual-Inverter Control Strategy for High-Speed Operation of EV Induction Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. – № 2(51).
- [7] T. Kh Abuzyarov “Dvoynaya invertornaya sistema dlya pitaniya shagovogo elektrodvigatelya s umen'shennym napryazheniyem zvena postoyannogo toka” [Dual inverter system for powering a stepper motor with reduced DC link voltage] *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2021 – no. 1(50). – pp. 27-34. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34.

УДК 621.337.41

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_64

М.В. Андрюхин<sup>1</sup>, А.В. Серов<sup>2</sup>, В.Г. Титов<sup>2</sup>

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТА *MATLAB SIMULINK*

АО «Федеральный научно-производственный центр  
«Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

**Аннотация:** В статье приведены особенности и преимущества автоматической настройки регуляторов тока и скорости в системе с подчиненным регулированием параметров с помощью использования инструмента *Response Optimization* в *Matlab Simulink*. Рассмотрено применение дифференцирующего фильтра второго порядка в цепи обратной связи по скорости, а также проведен сравнительный анализ по оценке устойчивости с помощью логарифмической амплитудно-частотной характеристики.

**Ключевые слова:** синтез регуляторов, дифференцирующий фильтр 2 порядка, логарифмическая амплитудно-частотная характеристика.

Современные системы управления электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами строятся на базе векторного управления, которое обеспечивает энергетическую эффективность электроприводов и повышенное быстродействие по сравнению со скалярным способом управления. В таких системах имеется возможность воздействовать на положение пространственного вектора тока статора, относительно связанного с ротором вектора потока ротора, что позволяет задавать и регулировать требуемые величины потока и момента машины.

Система управления строится по принципу замкнутой системы подчиненного регулирования координат, при этом внешним является контур скорости, а внутренними – контуры тока  $I_d$  и  $I_q$ . Для обеспечения корректной работы системы управления остается актуальной задача синтеза регуляторов скорости и тока.

В источниках [1, 2] рассмотрен ряд вопросов, связанных с построением систем управления электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). В источниках [3,4] затрагивается ряд вопросов, связанных с технической реализацией электропривода, настройкой регуляторов и математическим моделированием процессов в нем.

Вместе с тем к настоящему времени остаются недостаточно исследованными:

- автоматическая настройка регуляторов тока и скорости в системе с подчиненным регулированием параметров с помощью использования инструмента *Response Optimization* в *Matlab Simulink*;
- влияние дифференцирующего фильтра второго порядка на систему управления СДПМ и ее устойчивость.

Выполним синтез регуляторов с использованием программного продукта *Matlab Simulink* с автоматической настройкой пропорциональной и интегральной частей[5].

Имитационная модель в *Matlab* с внешним контуром скорости и внутренним контуром тока для неявнополюсного синхронного двигателя с постоянными магнитами, построенная по уравнениям из [1], изображена на рис. 1.

*Таблица 1*

**Технические характеристики электродвигателя СДПМ-206-90-380**

Наименование параметра	Величина
Число фаз	3
Тип соединения обмоток	звезда
Напряжение питания $U$ , В	380
Номинальный ток двигателя $I_n$	1.4
Номинальная частота вращения $\omega$ , об/мин (рад/с)	30 (3,14)
Номинальная мощность $P$ , Вт	630
Номинальный момент двигателя $M_n$ , Н·м	90
КПД, $\eta$	0.757
Масса $m$ , кг	30
Режим работы	S1
Класс изоляции	F
Число полюсов ( или пар полюсов) $p$	(8)
Сопротивление $R$ , Ом	13,5
Индуктивность $L_d$ , мГн	76
Индуктивность $L_q$ , мГн	76
ЭДС вращения $E$ , В	135
Коэффициент ЭДС, (В·с)/рад	42,857
Коэффициент момента, (Н·м)/А	64,286
Потокосцепление, создаваемое постоянным магнитом, В·с	5,357
Момент инерции вала $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,019
Датчик положения	ЛИР-ДА-158А.02Т-17-05-RS-3-2 14.215225 СКБ ИС Разрядность 17 бит
Частота питающего напряжения, Гц	4 (расч)

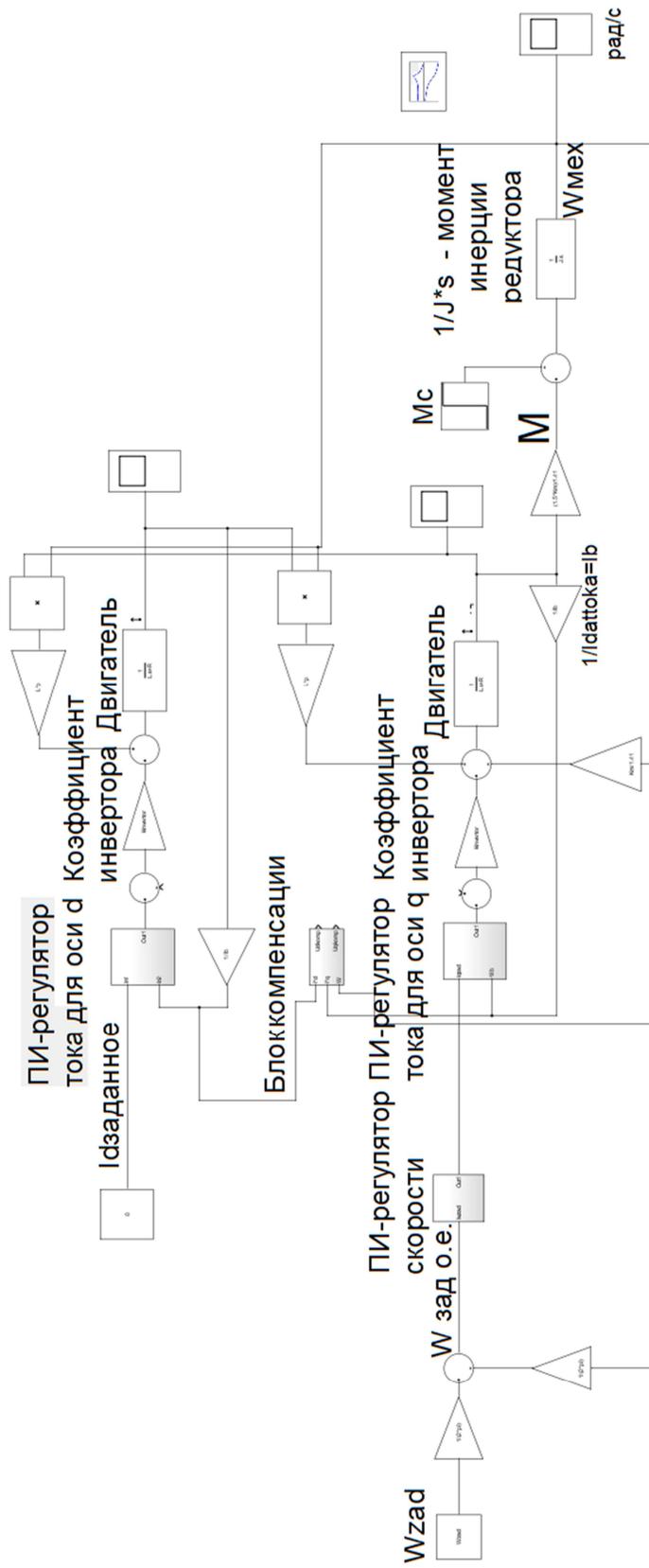


Рис. 1. Модель системы векторного управления с внешним контуром скорости и внутренним контуром тока во вращающихся системах координат  $d-q$ .

В качестве объекта управления выбран тихоходный высокомоментный электродвигатель СДПМ-206-90-380. Такие двигатели применяются для построения приводов вращения исполнительного механизма без применения механического редуктора. Основные технические характеристики электропривода приведены в таблице 1.

Настройка регуляторов тока и скорости на модульный оптимум [2] выполнена с помощью использования инструмента *Response Optimization* в *Matlab Simulink*. Была определена верхняя граница с перерегулированием 4.3%, и далее коридор с допуском  $\pm 1\%$  от заданного значения. Заданные границы показаны на рисунке 2.

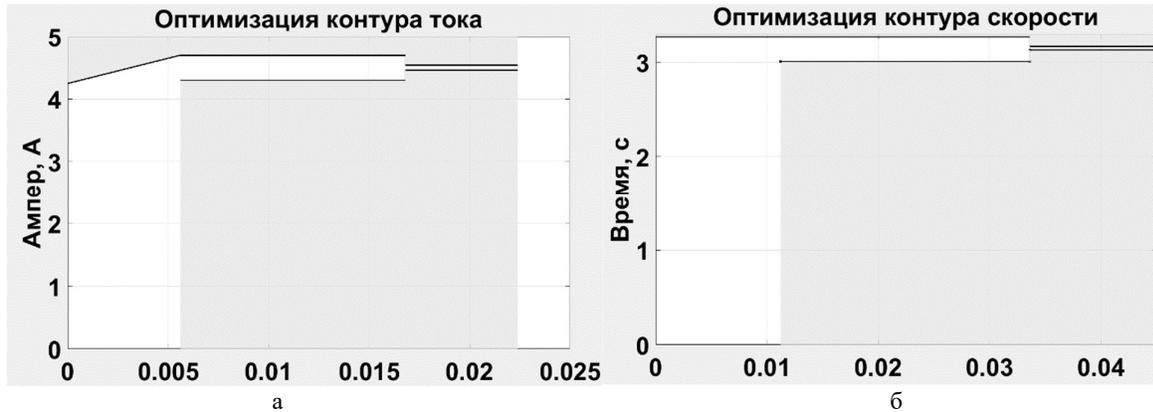


Рис. 2. Заданные границы для настройки регуляторов тока и скорости в инструменте *Response Optimization*: а – для контура тока; б – для контура скорости

Введем обозначение:

$$T_{кт} = L_d / R = 0,076 / 13,5 = 0,0056 \text{ с}, \tag{1}$$

где  $T_{кт}$  – постоянная времени контура тока.

Постоянную времени контура скорости принимаем:

$$T_c = 2T_{кт} = 2 \cdot 0,0056 = 0,0112 \text{ с}, \tag{2}$$

где  $t_{п} = 3T_c = 3 \cdot 0,0056 = 0,0168 \text{ с}$  – время переходного процесса.

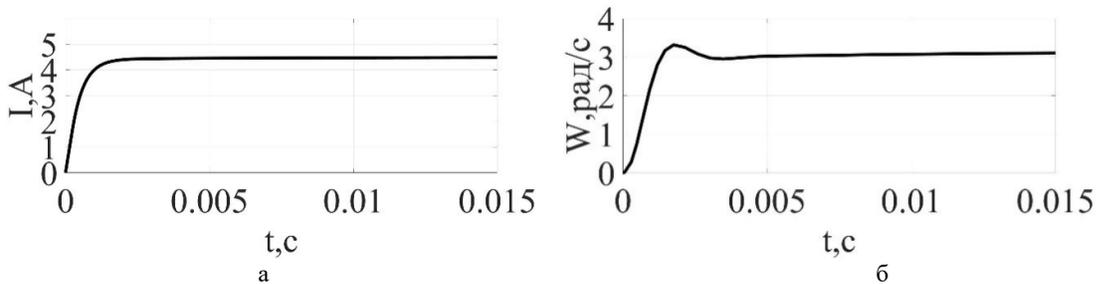


Рис.3. Сигнал тока и скорости, оптимизированный инструментом *Response Optimization*: а – ток; б – скорость

Регулятор настроим по оси  $q$ , а по оси  $d$  продублируем полученные значения, поскольку в экономичном режиме составляющая тока по оси  $d$  должна равняться нулю. Оптимизация контура скорости проводится без учета блока компенсации, а также при моменте нагрузки, равным нулю. Настроенные контура тока и скорости показаны на рис. 3.

Из данных осциллограмм видно, что инструмент *Response Optimization* настроил коэффициенты пропорциональной и интегральной части таким образом, что обеспечиваются требуемое время переходного процесса, заданное регулирование и качество переходного процесса[6].

Оценим, как привод отработает приложение номинального момента нагрузки. Данный процесс показан на рис. 4.

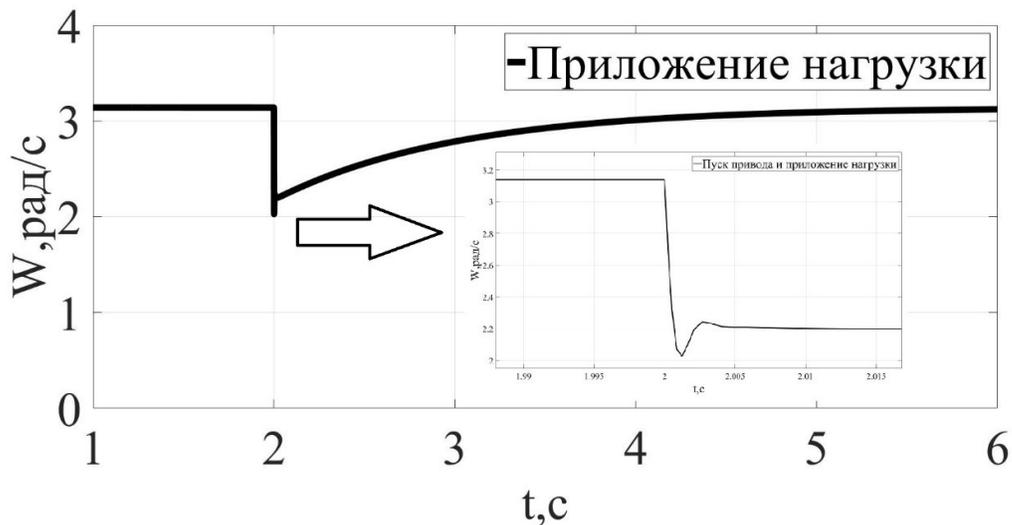


Рис. 4. Приложение номинального момента нагрузки

Из осциллограммы видно, что система отработала приложение номинальной нагрузки за время, которое составляет порядка 3 секунд. Объясняется это тем, что базовое значение тока было выбрано 9 А несмотря на то, что номинальный ток двигателя равен 1.4 А. Сделано это по следующим соображениям. В реальной системе установлены датчики тока LA 25-NP/SP44 [7] с диапазоном преобразования  $1 \div 36$  А. Если задавать базовое значение меньше 9 А, получаем огромные шумы при измерении тока, что не дает корректно настроить контур тока. То есть, например, при настройке контура тока на 1.4 Ампера, в физической установке получаем  $36/1.4 \approx 25$  раз умножаются шумы измерения. Наглядно это выражается в неадекватной реакции двигателя на задание скорости и посторонние шумы при его работе. Если задавать значение, равное максимальному, которое может измерить датчик тока, тогда в физической установке будем иметь большое перерегулирование. Чтобы исправить данный фактор, нужно увеличить пропорциональный коэффициент датчика тока или поставить датчики с номиналом, близким к номиналу двигателя.

При настройке системы управления было принято допущение, что на вход обратной связи регулятора скорости подается сигнал с датчика скорости.

Следует учесть, что в реальной системе производится измерение угла положения ротора, а не его скорости. Применение простого дифференцирования сигнала угла для получения значения скорости может привести к некорректной работе электропривода на малых скоростях, т.к. сигнал угла зашумлен.

Для уменьшения влияния шумов измерения введем дифференцирующий фильтр второго порядка в цепь обратной связи по скорости [8].

Математическое выражение дифференцирующего фильтра 2 порядка:

$$\varphi = \mu^2 \ddot{\hat{\varphi}} + 2d\mu\dot{\hat{\varphi}} + \hat{\varphi}, \quad (3)$$

где  $\hat{\varphi}$  – измеренное значение выходной переменной;  $\mu$  – малый параметр, отражающий инерционность фильтра.

Поскольку дифференцирующий фильтр является линейным звеном, можно записать его передаточную функцию:

$$W_{\hat{\varphi}}(p) = \frac{\hat{y}}{y} = \frac{1}{D(\mu p)}, \quad (4)$$

где  $D(\mu p)$  – характеристический полином фильтра;  $\hat{y}$  – измеренное значение выходной переменной;  $y$  – значение выходной переменной.

Тогда:

$$\hat{y} = \frac{1}{D(\mu p)} \cdot y. \quad (5)$$

Производная от левой и правой части выражения (5)

$$\dot{\hat{\varphi}} = \frac{1 \cdot p}{D(\mu p)} \cdot y = \frac{1}{D(\mu p)} \cdot \dot{y}. \quad (6)$$

При  $\mu$  стремящемся к нулю ( $\mu \rightarrow 0$ ) и учитывая что  $D(\mu p) = \mu^2 p^2 + 2d\mu p + 1$ , получаем  $\dot{\hat{\varphi}} \rightarrow \dot{y}$ , т. е. оценка производной совпадает с ее точным значением. Таким образом, для реализации закона управления необходимо использовать дифференцирующий фильтр 2 порядка с малой инерционностью. На практике достаточно, чтобы инерционность фильтра была на порядок меньше, чем основные процессы в системе.

При использовании фильтра второго порядка [6]  $D(\mu p) = \mu^2 p^2 + 2d\mu p + 1$  соответствующая асимптотическая логарифмическая амплитудная частотная характеристика представлена на рис.5.

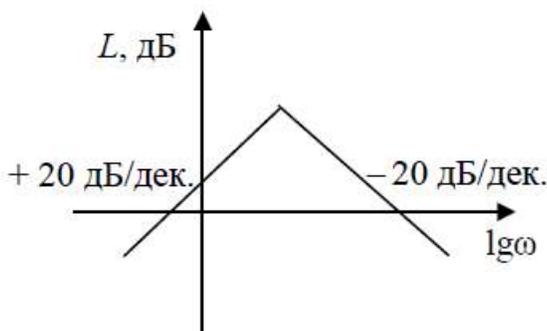


Рис. 5. ЛАЧХ контура с фильтром второго порядка

Очевидно, что высокочастотная помеха будет отфильтровываться контуром. Таким образом, порядок  $D(\mu p)$  полинома должен быть выше порядка требуемого дифференцирования хотя бы на единицу.

Выбирать конкретные численные значения параметров фильтрующего полинома необходимо с учетом условий разделимости движений в системе. На практике можно пользоваться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \mu &\approx 0,1T, \\ d &\approx 0,5 \div 0,7, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $T$  – желаемая постоянная времени,  $t_{\pi} = 3T$ .

В *Matlab*

$$\varphi = \mu^2 \ddot{\phi} + 2d\mu \dot{\phi} + \hat{\phi}. \quad (8)$$

Осциллограмма скорости при пуске на холостом ходу с дифференцирующим фильтром 2 порядка показана на рис. 6.

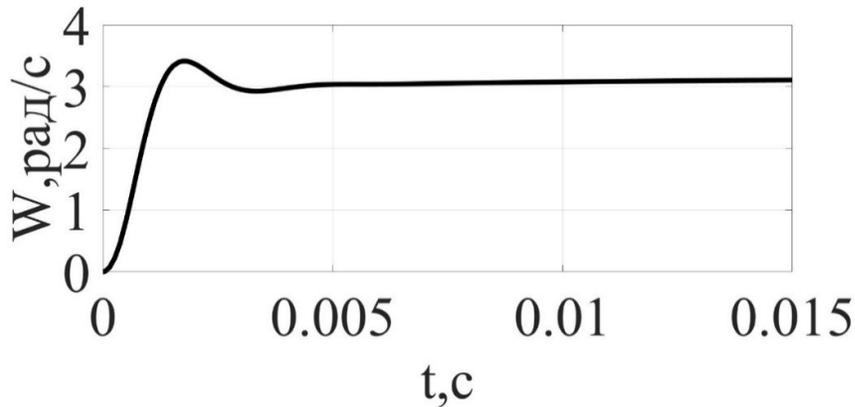


Рис. 6. Осциллограмма скорости при пуске на холостом ходу с дифференцирующим фильтром второго порядка

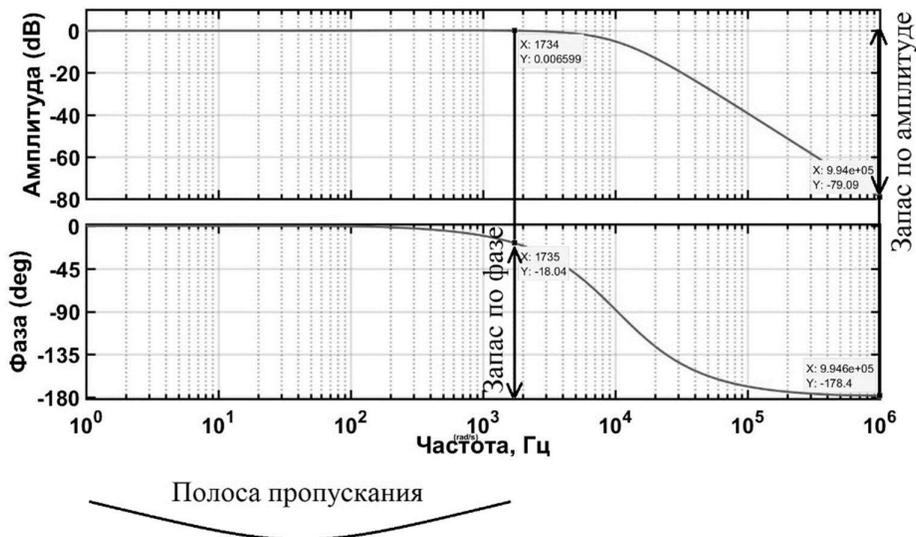


Рис. 7. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика в замкнутой системе по скорости

Стоит заметить, что переходный процесс с дифференцирующим фильтром второго порядка в контуре скорости имеет приблизительно такой же качественный и количественный вид, как и без него.

Оценим устойчивость системы с дифференцирующим фильтром и без него с помощью логарифмической амплитудно-частотной характеристики. Для этого в библиотеке *Simulink* находим блок *Bode plot*. На рис.7 приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика.

По логарифмической амплитудно-частотной характеристике были определены запасы устойчивости по амплитуде и фазе, а также полоса пропускания. Так, в замкнутой системе по скорости запас по фазе составляет:

$$\Delta\varphi = 180^\circ - 18^\circ = 162^\circ. \tag{9}$$

Для определения запаса по амплитуде проводим прямую в точке, где фазная характеристика приближена к  $180^\circ$ . Из рис. 8 видно, что запас по амплитуде равен более 79 дБ. Полосу пропускания определим от начала ЛАЧХ до того момента, когда график пересечет ось частот. Составляет примерно 1.7 кГц.

Выполнены такие же действия с дифференцирующим фильтром и изучено, как введение нелинейного звена в обратную связь по скорости изменило частотную характеристику привода и повлияло на его устойчивость (рис. 8). При данных параметрах, с учетом завышенного датчика тока в реальной системе, при данной настройке регуляторов имеем, что запас устойчивости по фазе и амплитуде уменьшился, в предположении, что датчики выбраны на завышенный ток двигателя.

Запас по фазе:

$$\Delta\varphi_\phi = 180^\circ - 36^\circ = 144^\circ. \tag{10}$$

При этом запас по амплитуде увеличился – около 95 дБ.

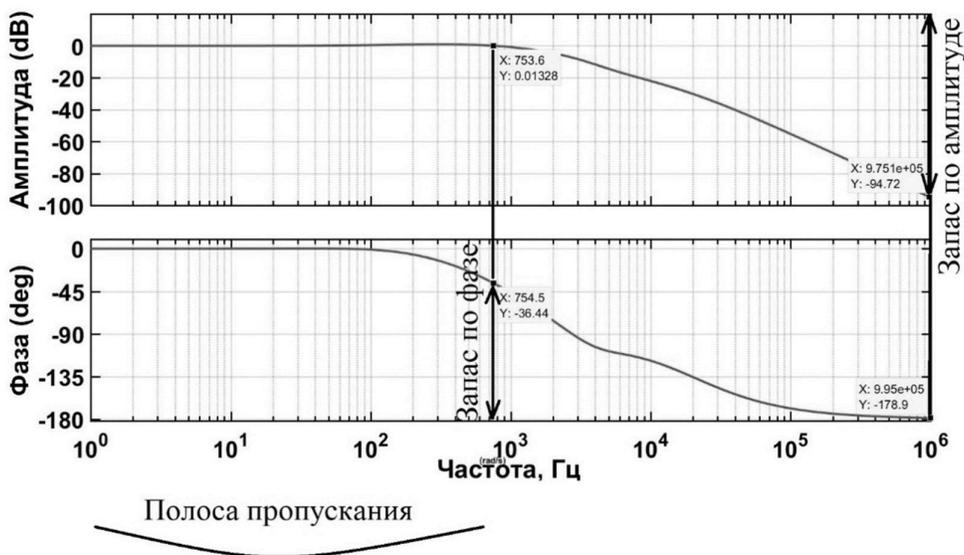


Рис. 8. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика в замкнутой системе по скорости с дифференцирующим фильтром

Таким образом дифференцирующий фильтр оказал негативное влияние внес негативный эффект на устойчивость, уменьшил полосу пропускания и запас по фазе.

### Выводы

На основании проведенных работ получены особенности автоматической настройки регуляторов тока и скорости в системе с подчиненным регулированием параметров с помощью использования инструмента *Response Optimization* в *Matlab Simulink*. Рассмотрено применение дифференцирующего фильтра второго порядка в цепи обратной связи по скорости и проведен сравнительный анализ по оценке устойчивости с помощью логарифмической характеристики.

### Библиографический список

1. **Соколовский, Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учеб. для электротехн. спец. Вузов/ Соколовский Г.Г.. – М.: АСАДЕМА, 2006. –259с: ил.
2. **Виноградов, А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока: Учебное пособие / Виноградов А.Б. – Иваново, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298с.
3. **Iohimovich A.D.** The Development of the Direct Electric Drive System of a Radar Station Antenna / A.D. Iohimovich, A.V. Korovin, V.V. Pankratov // Proceedings of 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013). – Erlagol, Altai, July 1 – 5, 2013, pp. 300 – 304.
4. **Марденский, В.Н.** Устойчивость синхронного электропривода антенны радиолокационных станций с цифровой системой управления / В.Н. Марденский, И.В. Бобылев, М.В. Андриухин, В.Ф. Стрелков, В.Г. Титов, Е.А. Чернов // «Вестник ИГЭУ», 2013, вып.2.
5. **Дьяконов, В.П.** MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров/ Дьяконов В.П. – М.: ДМК Пресс, 2010. –976с: ил.
6. [https://habr.com/ru/company/etmc\\_exponenta/blog/513904/](https://habr.com/ru/company/etmc_exponenta/blog/513904/) ЦИТМ Экспонента [Электронный ресурс]: – дата обращения 03.04.2022.
7. Режим доступа [https://www.lem.com/images/stories/files/RU/ru/Datasheets/La\\_25\\_nr\\_sp44.pdf](https://www.lem.com/images/stories/files/RU/ru/Datasheets/La_25_nr_sp44.pdf) – Технический паспорт [Электронный ресурс]: –дата обращения 22.03.2022
8. **Востриков, А.С.** Теория автоматического регулирования: Учебное пособие / Востриков А.С., Французова Г.А. – Новосибирск, изд-во НГТУ, 2006. – 368с.

M.V. Andryukhin<sup>1</sup>, A.V. Serov<sup>2</sup>, V.G. Titov<sup>2</sup>,

## OPTIMIZATION OF ELECTRIC DRIVE CONTROL LOOP USING A TOOL IN MATLAB SIMULINK

JSC Federal Research and Production Center Nizhny Novgorod  
Research Institute of Radio Engineering<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia<sup>2</sup>

**Abstract:** The article presents the features and benefits of automatic tuning of current and speed controllers in a system with a slave control of parameters using the Response Optimization tool in Matlab Simulink. The use of a second-order differentiating filter in the speed feedback circuit is considered, and a comparative analysis is carried out to assess stability using a logarithmic characteristic.

**Keywords:** synthesis of controllers, 2nd order differentiating filter, logarithmic characteristic.

### References

- [1] Sokolovsky, G.G. Electric drives of alternating current with frequency regulation: Proc. For electrical engineering specialist. Universities / Sokolovsky G.G. - M.: ACADEMA, 2006. - 259s: ill.
- [2] Vinogradov, A.B. Vector control of AC drives. Textbook / Vinogradov, A.B. – Ivanovo, GOUVPO “Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin”, 2008. - 298s.
- [3] Johimovich A.D. The Development of the Direct Electric Drive System of a Radar Station Antenna / A.D. Yohimovich, A.V. Korovin, V.V. Pankratov // Proceedings of 14th International Conference on Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013). – Erlagol, Altai, July 1 – 5, 2013, pp. 300 - 304.
- [4] V.N. Mardensky. Stability of Synchronous Electric Drives of Antenna of Radar Stations with Digital Control System / V.N. Mardensky, I.V. Bobylev, M.V. Andryukhin, V.F. Strelkov, V.G. Titov, E.A. Chernov // Vestnik ISPU, 2013, issue 2.
- [5] V.P. Dyakonov. MATLAB R2007/2008/2009 for radio engineers / Dyakonov V.P. - M.: DMK Press, 2010. -976s: ill.
- [6] [https://habr.com/ru/company/etmc\\_exponenta/blog/513904/](https://habr.com/ru/company/etmc_exponenta/blog/513904/) TsITM Exponent [Electronic resource]: – Accessed 03.04.2022.
- [7] Access mode [https://www.lem.com/images/stories/files/RU/ru/Datasheets/la\\_25\\_np\\_sp44.pdf](https://www.lem.com/images/stories/files/RU/ru/Datasheets/la_25_np_sp44.pdf) - Technical passport [Electronic resource]: - date of access 03/22/2022
- [8] Vostrikov, A.S. Theory of automatic control. Textbook / Vostrikov, A.S., Frantsuzova G.A. - Novosibirsk, NSTU publishing house, 2006. - 368p.

Д.А. Беленов<sup>1</sup>, И.А. Багрянцев<sup>1</sup>, В.Н. Мещеряков<sup>1</sup>

## УМЕНЬШЕНИЕ ТОКОВ И МОМЕНТОВ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПУТЕМ ПООЧЕРЕДНОЙ ПОДАЧИ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Липецкий государственный технический университет<sup>1</sup>

**Аннотация:** В данной статье рассмотрено влияние поочередной подачи фазных напряжений на пусковые характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Были синтезированы модели в среде Matlab Simulink, получены графики, произведена оценка полученных зависимостей и влияние применяемых методов пуска на величину пусковых параметров асинхронного двигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, энергосбережение, энергоэффективность.

Пусковые характеристики электропривода достаточно сильно влияют на его надёжность и долговечность. Особенно остро это проявляется там, где используются нерегулируемые приводы. Пики пусковых параметров электропривода негативно воздействуют на его обмотки, вал ротора, муфты, редуктора, рабочего органа, это приводит к их ускоренному изнашиванию. Поэтому проблема уменьшения влияния пуска двигателя на элементы электропривода является актуальной.

В [1] был представлен весь необходимый для моделирования переходных процессов при прямом пуске двигателя математический аппарат. Для моделирования координатных преобразований был использован источник [2]. В статье [3] была представлена двухфазная модель двигателя при прямом пуске с учётом вытеснения тока, потерь в стали и насыщения магнитной системы основным потоком, что позволило достаточно точно описать переходные процессы в асинхронном двигателе при пуске напрямую от сети.

Целью же данной статьи является оценка достоверности и точности ранее произведенных исследований, а также разработка динамической модели электропривода для оценки возможности снижения влияния прямого пуска на элементы асинхронного электропривода.

При составлении модели асинхронного двигателя используются некоторые допущения, которые позволяют упростить моделирование, при этом сохраняя достаточную её точность:

- 1) трехфазная система симметрична, нулевой ток в ней отсутствует, сумма мгновенных значений токов фаз равна нулю;
- 2) каждый протекающий по фазной обмотке ток порождает общую магнитодвижущую силу, синусоидально распределенную по окружности воздушного зазора;
- 3) сложение магнитодвижущих сил отдельных фаз обмоток порождает

общую магнитную индукцию, также синусоидально распределенную по окружности воздушного зазора;

- 4) характеристика намагничивания машины линейна;
- 5) без учёта потерь в стали.

Условия проведения моделирования:

- 1) произведенный расчёт параметров модели велся в именованных единицах;
- 2) входящим воздействием являлось трехфазное напряжение, подаваемое напрямую на обмотки статора;
- 3) производился контроль следующих выходных параметров: момент на валу ротора, ток ротора, частота вращения ротора;
- 4) статический момент – активный, равный номинальному моменту двигателя.

Моделируемая схема представлена на рис. 1.

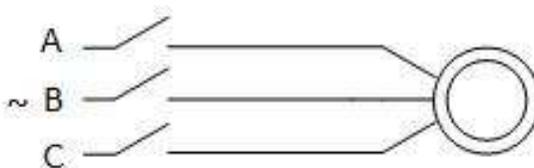


Рис. 1. Моделируемая схема электропривода

Блоками  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  подаётся номинальное напряжение двигателя 380 В. Запаздывание подачи фазного напряжения формируется с помощью блоков Step, Constant и Switch. Блок ABC to ab производит преобразование трехфазного напряжения системы ABC в двухфазное системы ab. Блоком ab to xy производим координатное преобразование напряжений в систему координат xy.

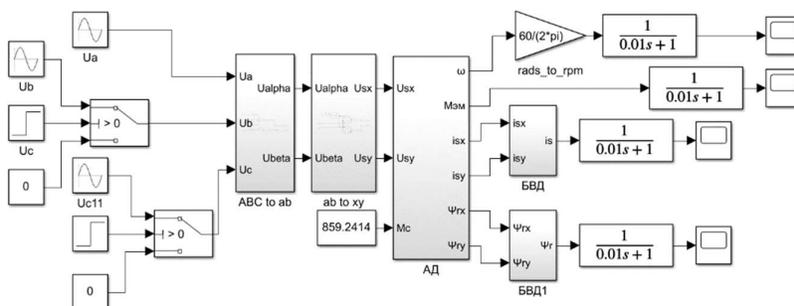


Рис. 2. Математическая модель асинхронного двигателя в программной оболочке Simulink

В блоке АД реализована математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе координат  $xy$ . С помощью блоков БВД производится выделение модуля векторов тока ротора и потокосцепления ротора. На выходе этих блоков стоят аperiодические фильтры с постоянной времени 0,01 с. Блок `rads_to_rpm` производит пересчёт из радиана в обороты в

минуту. В табл.1 сведены паспортные данные моделируемого двигателя. Математическая модель в оболочке Simulink приведена на рис. 2.

Таблица 1

## Паспортные данные двигателя

Тип	АИР280М4
Синхронная частота вращения $n$ , об/мин	1500
Число пар полюсов $p_n$	2
Номинальное скольжение $s_n$	2,2%
Номинальная механическая мощность $P_n$ , кВт	132
Номинальное линейное напряжение питания $U$ , В	380
КПД в номинальном режиме $\eta_n$	94%
Коэффициент мощности двигателя $\cos\varphi_n$	0,93
Кратность максимального момента $\lambda$	2,2
Кратность пускового момента $k_{пм}$	1,6
Кратность пускового тока $k_{пт}$	6,5
Момент инерции двигателя $J_{дв}$ , кг · м <sup>2</sup>	2,5

Первый пуск двигателя производится с одновременной подачей питания по трем фазам, второй пуск производится с одновременной подачей питания по двум фазам, на третью фазу питание подается с задержкой. Методом последовательных итераций был определен оптимальный момент подачи третьей фазы, позволяющий добиться большего снижения броска пусковых характеристик двигателя. Подача третьей фазы производится через 0,017 с после первоначальной подачи двух других фаз.

В табл.2 приведен алгоритм работы схемы при разных методах пуска двигателя.

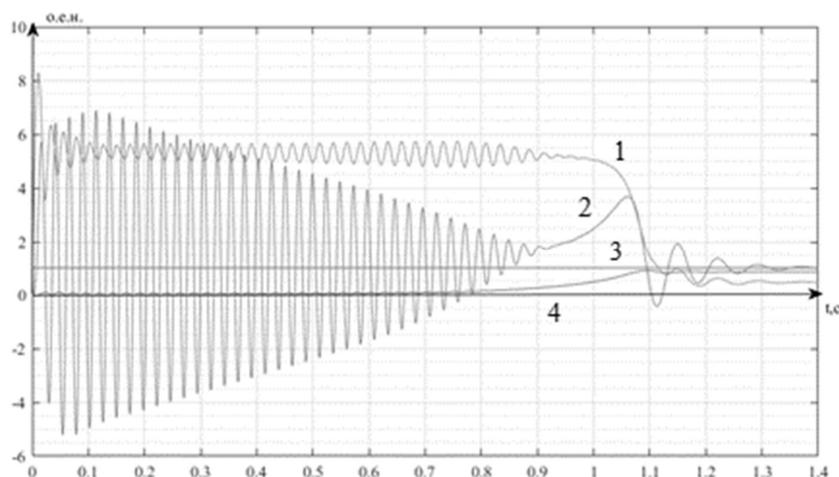
Таблица 2

## Алгоритм работы схемы

Метод пуска	Время подачи питания фаз, с		
	А	В	С
1	0	0	0
2	0	0	0,017

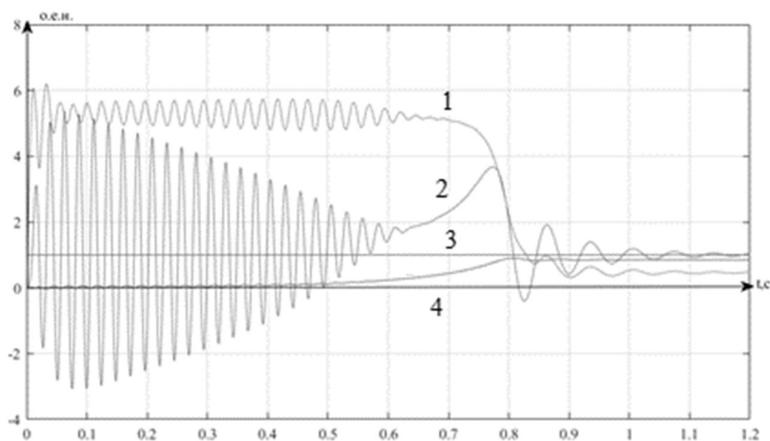
Результаты моделирования прямого пуска с номинальным статическим моментом приведены на рис. 3.

Полученные значения моментов, модуля тока статора, скорости при разных методах прямого пуска на графиках приведены в относительных единицах от номинальных значений.



**Рис. 3. Результаты моделирования прямого пуска с номинальным статическим моментом:** 1 – ток ротора, о.е.н.; 2 – момент на валу двигателя, о.е.н. ; 3 – момент статический; 4 – скорость вращения вала, о.е.н.

Полученные колебания на характеристиках объясняется разными постоянными времени, коэффициентами затухания [4] элементов электрической и магнитной систем двигателя, а также ортогональным положением векторов тока и потокосцепления [5]. Результаты моделирования второго метода прямого пуска приведены на рис. 4.



**Рис. 4. Пуск с одновременно подачей двух фаз и задержанной на 0,017 с. подачей третьей фазы:** 1 – ток ротора, о.е.н.; 2 – момент на валу двигателя, о.е.н.; 3 – момент статический; 4 – скорость вращения вала, о.е.н.

В табл. 3 приведены характеристики:

- 1) при прямом пуске (три фазы подаются одновременно);
- 2) при пуске с одновременной подачей двух фаз и задержанной на 0,017 с. подачей третьей фазы.

## Характеристики разных методов прямого пуска

Метод пуска	1	2
Максимум $I_1$ , о.е.н.	8,28	6,2
Максимум $M$ , о.е.н.	6,88	5,36
Минимум $M$ , о.е.н.	5,22	3,07
Переходный процесс по току $t$ , с	1,3	1,1
Переходный процесс по моменту $t$ , с	1,3	1,1

Такой пуск позволил понизить максимальное значение модуля тока статора приблизительно на 25% и момента на 22%, а также сократить время переходных процессов в двигателе на 15%.

Таким образом, при одновременной подаче всех трех фаз на двигатель появляются слабозатухающие колебания с большой амплитудой. Эти колебания приводят к излишним нагрузкам двигателя. Поочередная подача фазных напряжений позволяет снизить первоначальный небаланс между фазами, свободные составляющие потокосцепления и, соответственно, момент, развиваемого двигателем.

## Библиографический список

1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с
2. **Терёхин, В.Б.** моделирование систем электропривода в simulink (matlab 7.0.1) / В.Б. Терёхин – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
3. **Каширских, В.Г.** Переверзев С.С. Сравнительный анализ способов плавного пуска асинхронных электроприводов горных машин / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) ГИАБ, 2005 / Семинар № 17.
4. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. В 3-х т. Т. 1. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. СПб – Питер, 2003. 463 с.
5. **Шрейнер, Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654.

D.A. Belenov<sup>1</sup>, I.A. Bagryantsev<sup>1</sup>, V.N. Mesheryakov<sup>1</sup>

## REDUCTION OF CURRENTS AND TORQUES WHEN STARTING AN ASYN-CHRONOUS MOTOR WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR BY ALTERNATIVE SUPPLY OF PHASE VOLTAGES

Lipetsk State Technical University Lipetsk, Russia<sup>1</sup>

**Abstract:** The article discusses the effect of alternating supply of phase voltages on the starting characteristics of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor. Models were synthesized in the Matlab Simulink environment, graphs were obtained. The obtained dependences and the influence of the applied start-up methods on the value of the starting parameters of an induction motor were evaluated.

**Key words:** asynchronous motor, energy saving, energy efficiency.

### References

- [1] V.I. Klyuchev, Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov [Electric drive theory: Textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 2001. (in Russian).
- [2] V.B. Terekhin, Modelirovanie sistem elektroprivoda v simulink (matlab 7.0.1) [Simulation of electric drive systems in Simulink (Matlab 7.0.1)]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008. (in Russian).
- [3] V.G. Kashirskih, S.S. Pereverzev. Sravnitel'nyj analiz sposobov plavnogo puska asinhronnyh elektroprivodov gornyh mashin / Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Comparative analysis of soft start methods for asynchronous electric drives of mining machines / Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. MIAB, 2005 / Seminar № 17. (in Russian).
- [4] K.S. Demirchan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin, Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: uchebnik dlya vuzov. T. 1. [Theoretical foundations of electrical engineering: Textbook for universities. Vol. 1]. St.Petersburg: Piter, 2003. (in Russian).
- [5] P.T. Schreiner, Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg: URO RAS, 2000. (in Russian).

УДК 621.313-57

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_80

И.Е. Бердников, А.П. Слuzов, С.А. Смирнов, В.В. Соколов

## ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье рассматривается вариант реализации лабораторного стенда, для изучения принципов действия и электромагнитных процессов в вентильном двигателе с микропроцессорной системой управления и регулирования. Описаны алгоритмы управления вентильным двигателем, такие как блочная коммутация и бездатчиковое управление. Разработаны имитационные модели вентильного двигателя в среде MATLAB/Simulink, реализующие данные алгоритмы работы. Приведены результаты имитационного моделирования переходных процессов работы двигателя.

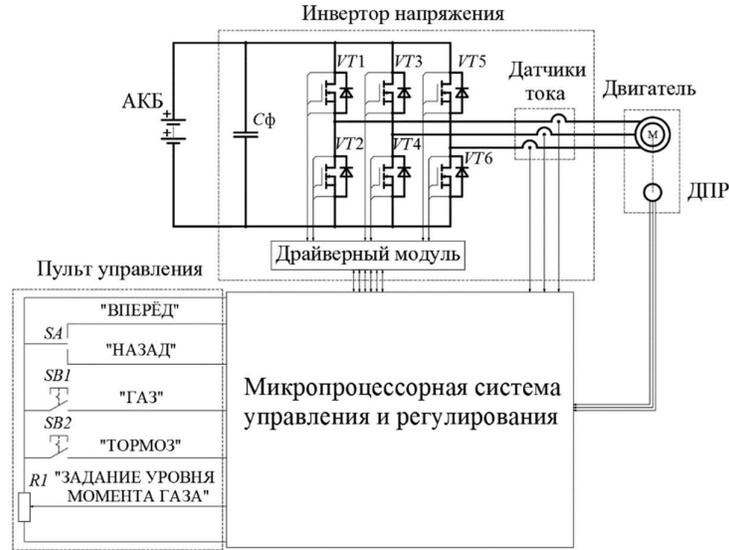
**Ключевые слова:** вентильный двигатель, блочная коммутация, бездатчиковое управление, инвертор напряжения, микропроцессорная система управления и регулирования, дискретный датчик положения ротора.

В настоящее время использование вентильных двигателей (ВД) является одним из перспективных направлений развития электропривода. Отсутствие коллекторного узла и нагреваемых частей ротора в разы повышают его надежность и эффективность по сравнению с двигателями постоянного тока. Так же ВД не требуют профилактического ухода в процессе эксплуатации. Кроме этого, они обладают несложной конструкцией и малыми габаритами.

Перечисленные достоинства данных двигателей делают их применение привлекательным в различных областях техники. К примеру, в электротранспорте малой мощности: электроскутеры, гироскутеры, электросамокаты. Помимо этого, они широко применяются и развиваются в таких отраслях промышленности, как робототехника, станкостроение, автомобилестроение, авиастроение и многих других, где требуется сочетание таких качеств, как высокий момент, малые масса и габариты, высокое быстродействие.

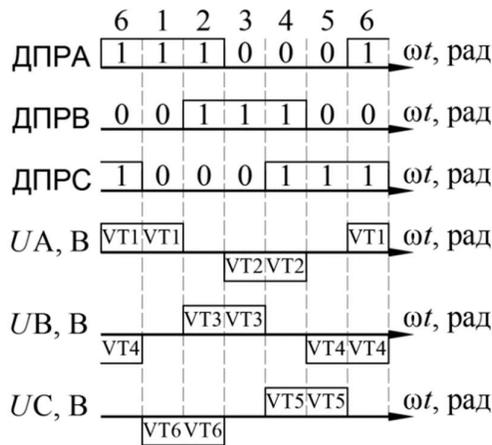
В соответствии с приведёнными достоинствами ВД актуальна задача разработки лабораторного стенда по дисциплине «Системы управления электроприводов» для изучения системы тягового электропривода как в виртуальной среде на имитационных моделях, так и экспериментально.

На сегодняшний день наиболее простым алгоритмом управления для вентильного двигателя является алгоритм блочной коммутации по сигналам с дискретного датчика положения ротора на базе элементов Холла. На рис. 1 представлена функциональная схема тягового электропривода с реализацией алгоритма блочной коммутации.



**Рис. 1. Функциональная схема тягового электропривода с реализацией алгоритма блочной коммутации**

Алгоритм управления данной системой строится следующим образом. На микропроцессорную систему управления и регулирования поступают сигналы с дискретного датчика положения ротора. Датчик положения ротора имеет дискретность в 60 электрических градусов. По данным сигналам определяется нужная пара силовых транзисторов инвертора напряжения и выполняется их коммутация. Таким образом, в любой момент времени ток может протекать только через две обмотки статора вентильного двигателя. При этом силовые транзисторы открыты в течении 120 электрических градусов. На рис. 2 приведена последовательность переключения силовых транзисторов инвертора напряжения по сигналам с дискретного датчика положения ротора.



**Рис. 2. Последовательность переключения силовых транзисторов инвертора напряжения по сигналам с дискретного датчика положения ротора**

Для рассмотрения работы вентильного двигателя с алгоритмом блочной коммутации была разработана имитационная модель вентильного двигателя с

замкнутым контуром тока. Имитационная модель функционирует по описанному ранее алгоритму работы и представлена на рис. 3.

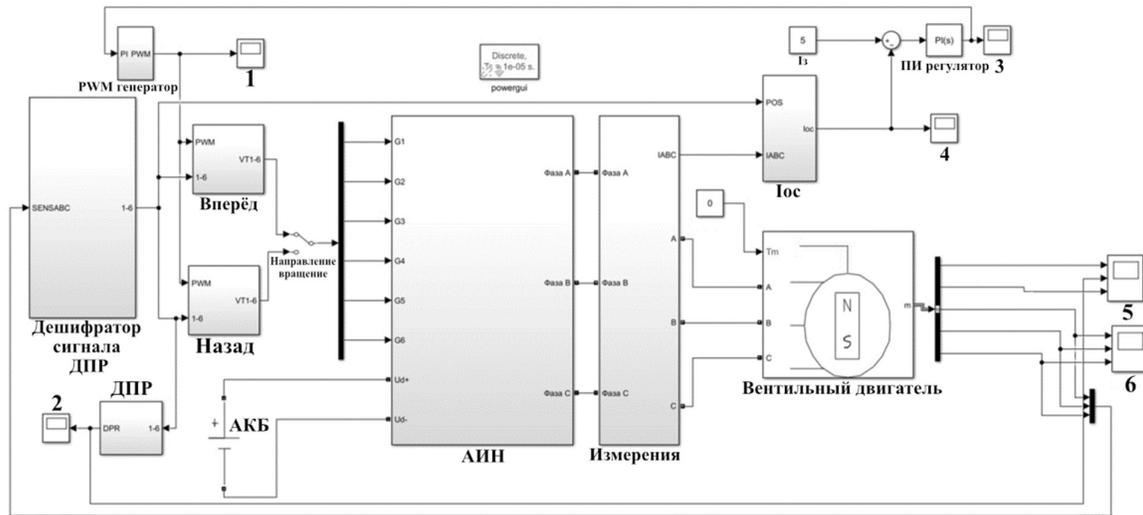


Рис. 3. Имитационная модель вентильного двигателя, реализующая алгоритм блочной коммутации с замкнутым контуром тока

Данная модель позволяет вращать двигатель вперёд и назад с заданным значением тока  $I_3$ . Для рассмотрения процесса работы вентильного двигателя на рис. 4 представлена осциллограмма работы вентильного двигателя при вращении вперёд с алгоритмом блочной коммутации.

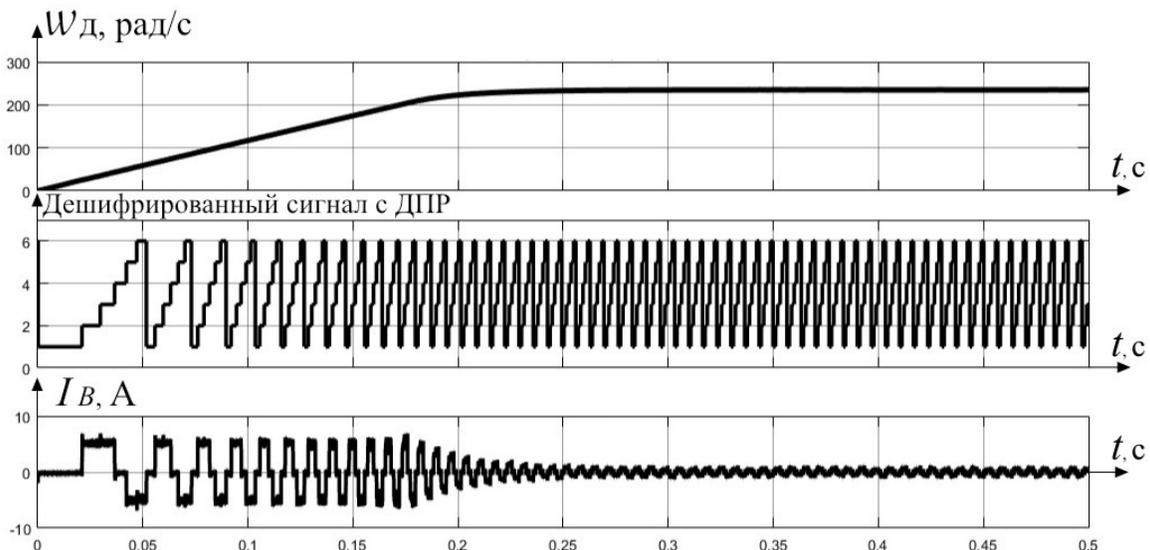


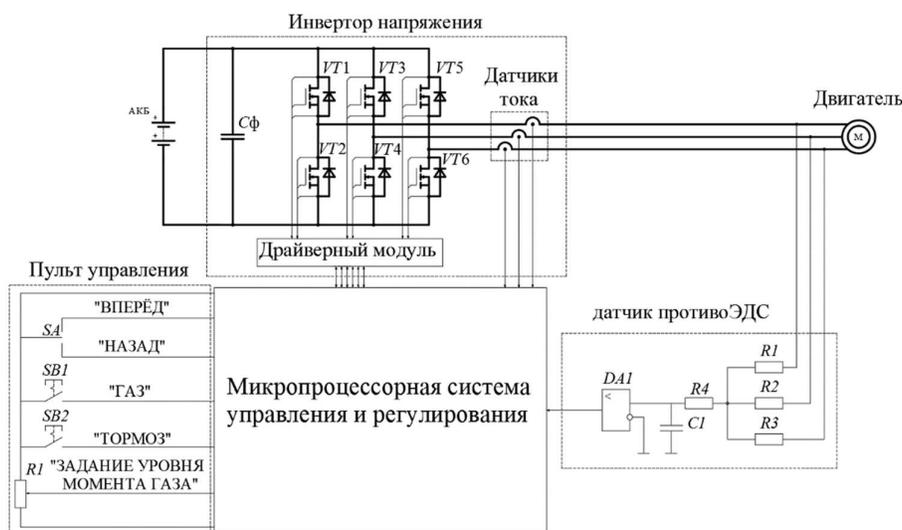
Рис. 4. Осциллограмма работы двигателя при вращении вперёд с алгоритмом блочной коммутации

Как видно из рис. 4, разгон двигателя происходит при постоянном

значении тока двигателя, равном 5 А, заданным с помощью задатчика тока ( $I_z$ ). Как только двигатель выходит на скорость, близкую к установившейся, ток двигателя уменьшается до значения тока нагрузки.

Для построения контура регулирования скорости вентильного двигателя требуется датчик положения ротора. Однако в этом случае возникают дополнительные затраты на его установку, наладку и профилактику, а также снижается общая надежность всей системы электропривода. Кроме того, наличие ДПР увеличивает стоимость системы управления. Поэтому в последние годы всё чаще разрабатываются бездатчиковые системы управления вентильным двигателем. В них оценка положения ротора двигателя осуществляется по сигналу противоЭДС, наводимой в обмотках статора вентильного двигателя.

Для рассмотрения данного алгоритма работы была разработана функциональная схема вентильного электропривода с бездатчиковым управлением (рис. 5).



**Рис. 5. Функциональная схема тягового электропривода с реализацией алгоритма блочной коммутации**

В данной системе алгоритм управления строится следующим образом. В каждый момент времени одна из фаз двигателя остается неподключенной к питанию. При вращении вентильного двигателя в обмотке наводится противоЭДС, измеряя которую можно определить нужный момент для переключения вектора магнитного потока статора. Удобнее всего фиксировать переключения в момент перехода противоЭДС двигателя через ноль. Для фиксации этих моментов используется компаратор датчика противоЭДС двигателя. Данный компаратор изменяет своё состояние при каждом пересечении противоЭДС с нулём. При этом запускается таймер  $T_{МЗ}$ , который отсчитывает время до следующего изменения сигнала на компараторе. Таким образом, мы можем определить время между двумя пересечениями противоЭДС с нулём. Также при следующем пересечении включается таймер  $T_4$ , который отсчитывает половину времени, измеренного таймером  $T_3$  и вызывает коммутацию следующей пары транзисторов. На рис. 6 представлена диаграмма работы, описывающая принцип переключения силовых

транзисторов при бездатчиковом управлении.

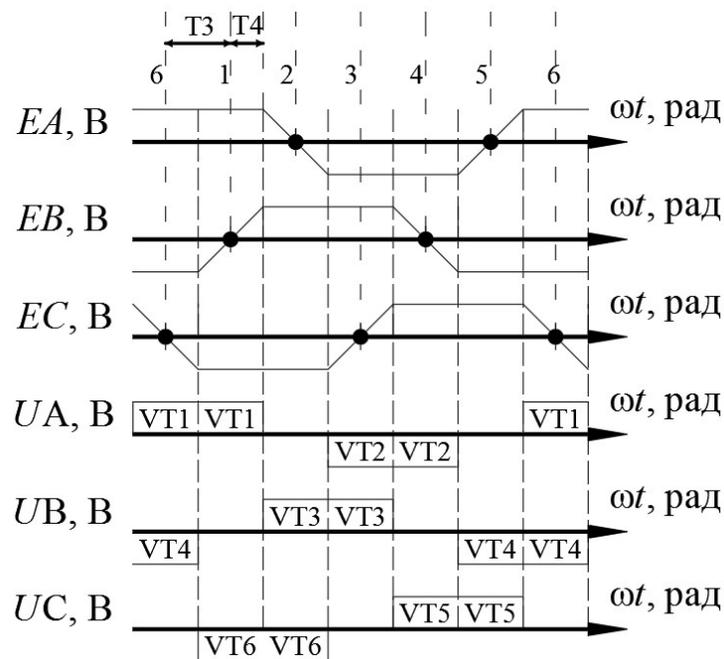


Рис. 6. Диаграмма работы, описывающая принцип переключения силовых транзисторов при бездатчиковом управлении

Для рассмотрения работы вентильного двигателя с бездатчиковым алгоритмом управления была разработана имитационная модель вентильного двигателя с замкнутым контуром тока. Имитационная модель построена по описанному ранее алгоритму работы. Данная модель представлена на рис. 7.

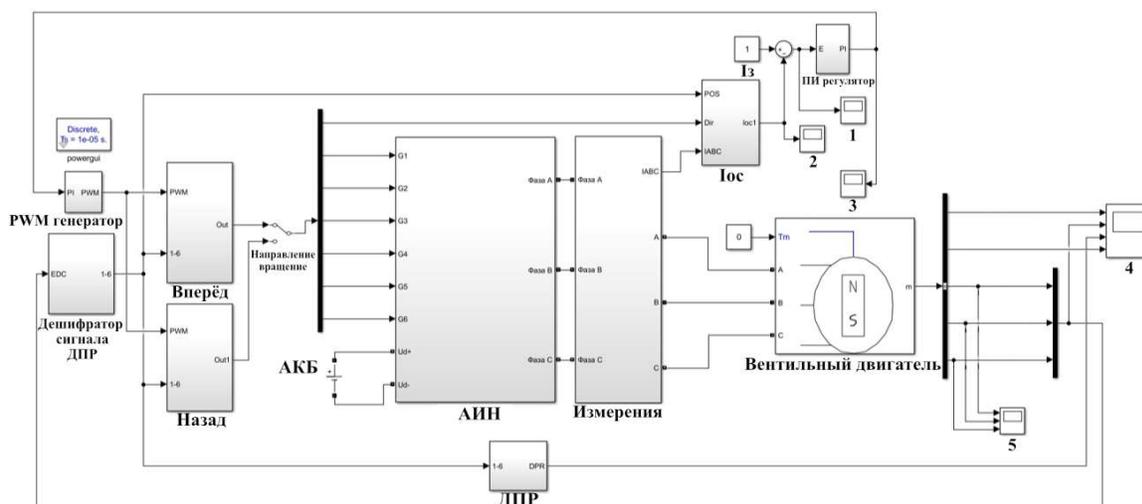
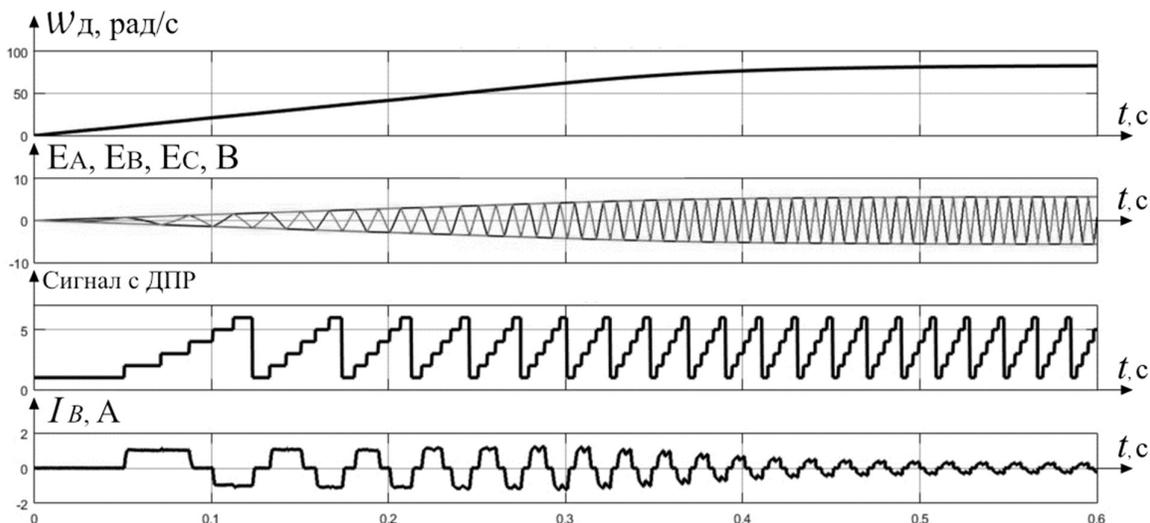


Рис. 7. Имитационная модель вентильного двигателя, реализующая бездатчиковый алгоритм управления с замкнутым контуром тока

Данная модель, как и предыдущая, позволяет вращать двигатель вперёд и

назад с заданным значением тока  $I_3$ . Для рассмотрения процесса работы данной системы на рис. 8 представлена осциллограмма работы вентильного двигателя при вращении вперед с бездатчиковым алгоритмом управления.



**Рис. 8. Осциллограмма работы двигателя при вращении вперед с бездатчиковым алгоритмом управления**

Из рис. 8 видно, что разгон двигателя происходит при постоянном значении тока двигателя, равном 1 А. Как только двигатель выходит на скорость, близкую к установившейся, ток двигателя уменьшается до значения тока нагрузки.

Представленные осциллограммы работы подтверждают работоспособность данной системы. Разработанное программное обеспечение отлажено и может использоваться в системах управления вентильными двигателями. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность данных систем управления.

### Библиографический список

1. **Анучин, А.С.** Системы управления электроприводов. Учебник для вузов/ А.С. Анучин — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 373. с.
2. **Аракелян, А.К.** Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов. Учебное пособие для вузов. В 2 т. Т.1/ А.К. Аракелян, А.А. Афанасьев. — М.: Высш.шк., 2006. -546 с.
3. **Башарин, А.В.** Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982.-392 с.
4. **Овчинников, И.Е.** Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность)/ И.Е. Овчинников: Курс лекций – СПб.: Корона Век 2006 – 336 с.
5. **Терехов, В.М.** Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов. Под ред. В.М. Терехова.-М.: Издательский центр «Академия»,2005. -304 с.
6. **Чернов, Е.А.** Комплектные электроприводы станков с ЧПУ. Справочное пособие / Е.А. Чернов, В.П. Кузьмин - Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1989.-320с.

I.E. Berdnikov, A.P. Sluzov, S.A. Smirnov, V.V. Sokolov

## TRACTION ELECTRIC DRIVE BASED ON A VALVE MOTOR WITH MICROPROCESSOR CONTROL

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

**Abstract:** The article considers a microprocessor control and regulation system for an electric drive based on a brushless motor. The algorithms for controlling a brushless motor, such as block switching and sensorless control, are described. Simulation models of a brushless motor have been developed in the MATLAB/Simulink environment that implement these operation algorithms. The results of simulation modeling of transient processes of engine operation are presented.

**Key words:** valve motor, block switching, sensorless control, voltage inverter, microprocessor control and regulation system, discrete rotor position sensor.

### References

- [1] Anuchin A.S. Electric drive control systems. Textbook for universities / Anuchin A.S. — M.: Publishing House MEI, 2015. — 373. p.
- [2] Arakelyan A.K. Valve electric machines in systems of controlled electric drives. Textbook for universities. T.1/ A.K. Arakelyan— M.: High school, 2006. -546 p.
- [3] Basharin A.V. Control of electric drives. Study guide for universities / A.V. Basharin, V.A. Novikov, G.G. Saraokolovsky - L.: Energy publishing, Leningrad department, 1982. - 392 p.
- [4] Ovchinnikov I.E. Valve electric motors and a drive based on them (small and medium power)/ I.E. Ovchinnikov: A course of lectures – Saint Petersburg: Crown of the Century 2006 – 336 p.
- [5] Terekhov V.M. Control systems of electric drives: Textbook for students. higher. studies. institutions / V.M. Terekhov, O.I. Osipov, ed. by V.M. Terekhov. -M.: Publishing center "Academy", 2005. -304 p.
- [6] Chernov, E.A. Complete electric drives of CNC machines. Reference manual / E.A. Chernov, V.P. Kuzmin - Gorky: Volga-Vyatka Publishing House, 1989.-320p.

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, А.И. Ермолаев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>,  
А.С. Плехов<sup>2</sup>, К.С. Степанов<sup>2</sup>

## ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ВАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ ВИБРАЦИИ

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФИЦ ИПФ РАН<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

**Аннотация:** В статье рассмотрена задача измерения угловой деформации вращающихся валов. Выявлено, что изменения фазы отраженного акустического сигнала относительно опорного, падающего на исследуемую поверхность вращающегося вала, можно проводить с погрешностью 0,6% при скоростях не более 0,5 м/с.

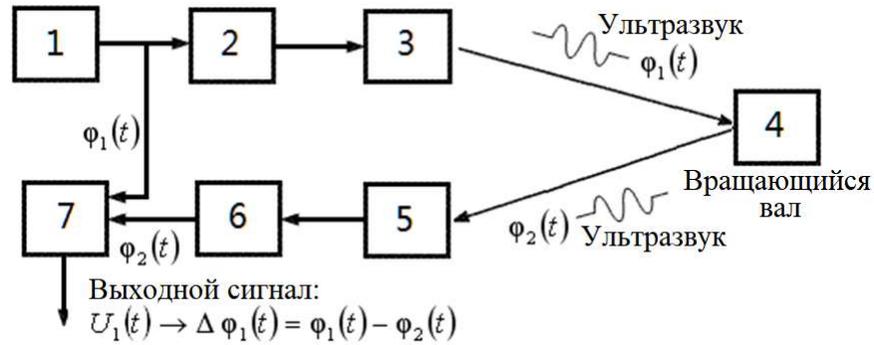
**Ключевые слова:** вращающийся вал, угловая деформация, эффект Доплера, девиация отраженного акустического сигнала, крутящий момент.

Измерение параметров вибрации вращающихся валов является актуальной задачей при технической диагностике электромеханических комплексов, турбин, буровых установок, металлорежущих станков и т.д. [1,2]. К измеряемым параметрам вибрации вращающихся валов относится их угловая деформация и крутящие моменты, возникающие, к примеру, от крутильных колебаний валопроводов силовых энергетических установок [3]. Своевременное отслеживание уровней крутильных колебаний валопровода позволяет на ранней стадии выявлять дефекты и устранять поломки, угрожающие жизни и безопасности персонала [4].

Однако при этом возникает сложная задача с установкой на исследуемом объекте вибропреобразователей, позволяющих в реальном масштабе времени считывать информативные сигналы [5,6]. Применение для решения данной задачи ультразвуковых бесконтактных методов и средств измерения вибраций позволяет решить ее, но только в части измерения виброперегрузок гладких вращающихся валов или направленных по нормали к зондирующему лучу волн. Акустические способы измерения параметров вибрации давно применяются в машиностроении и хорошо изучены [1,2].

Поэтому, при исследовании угловой деформации вращающихся валов незаменимы в качестве первичных преобразователей бесконтактные ультразвуковые фазовые измерители виброперемещений [7,8].

Определение деформации валов ультразвуковым фазовым измерителем виброперемещений основано на сравнении фаз прямого и отраженного от исследуемого вала ультразвуковых сигналов [7,8]. Функциональная схема ультразвукового измерителя вибрации, считывающего угловое смещение поверхности вала по фазовому рассогласованию  $\Delta \varphi_1(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t)$  ультразвуковых сигналов, имеет вид, показанный на рис. 1.



**Рис 1. Функциональная схема ультразвукового измерителя вибрации:**

1 – генератор гармонического сигнала, 2 – усилитель, 3 – акустический излучатель, 4 – исследуемый вал, 5 – акустический приемник, 6 – усилитель, 7 – фазовый детектор

Вырабатываемый генератором 1 гармонический сигнал частотой 100...300 кГц (рис.1) усиливается усилителем мощности 2, преобразуется излучателем 3 в ультразвуковую волну, которая излучается на исследуемый объект (вал) 4 [9]. Отраженная от объекта волна улавливается приемником 5, преобразуется в электрический сигнал, усиливается усилителем 6 и подается на первый вход фазового детектора 7, на второй вход которого поступает сигнал с генератора 1. На выходе фазового детектора 7 будет получен электрический сигнал  $U_1(t)$ , пропорциональный разности фаз излученного и отраженного акустических сигналов  $\Delta \varphi_1(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t)$  и, следовательно, угловому смещению поверхности исследуемого объекта (вращающегося вала) [8].

Частота зондирующего ультразвукового сигнала выбирается исходя из оценочных параметров измеряемой угловой скорости вращающегося вала. Так, при значениях углового смещения порядка сотен угловых секунд предпочтительно применение ультразвуковых сигналов с длиной волны 1,0...3,0 мм, что для воздуха соответствует частоте 100...300 кГц. Измерение угловой задержки  $\Delta t(t)$  заключается в измерении разности фаз излученного и отраженного гармонических сигналов [8]:

$$\Delta t(t) = \frac{\Delta \varphi(t)}{2\pi} T = \frac{\Delta \varphi(t)}{2\pi f}, \quad (1)$$

где  $\Delta t(t)$  – задержка отраженного сигнала относительно излученного;  $T$  и  $f$  – период и частота ультразвукового сигнала соответственно.

Процесс измерения угловых деформаций волновыми методами состоит в следующем [9,10]. Акустическое поле в любой момент времени и в любой точке пространства полностью определяется зависимостью одной из трех взаимосвязанных величин:

$x$  – вектор смещения частицы среды из положения покоя;

$\dot{x} = dx/dt$  – вектор колебательной скорости;

$P$  – звуковое давление в среде.

Каждая из этих величин в любой момент времени и в каждой точке пространства удовлетворяет волновому уравнению [11]:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа,  $C_0$  – скорость звука в воздухе.

С помощью волнового уравнения (2) можно получить распределение в пространстве и во времени любой из характеризующих акустическое поле величин  $(P, x, \dot{x})$  в выбранной системе координат. Уравнение (2) описывает сферические смещения среды, возбуждаемые источником зондирующего сигнала, которые без учета граничных условий представляются в виде [9-11]:

$$U_{tt} - c^2 U_{xx} = 0, \quad (3)$$

где  $c = \sqrt{E/\rho}$  – скорость звука в среде,  $E$  – модуль упругости среды,  $\rho$  – удельная плотность среды [6].

Излучаемая источником ультразвуковой волна  $U_t$  используется в качестве зондирующего сигнала и определяется волновым уравнением (3).

Положим, что на границе, при  $x=0$  расположен источник зондирующего сигнала и согласованный приемник. Тогда условие непрерывности на этой границе запишется в виде:

$$Z_0 U_t(0, t) - E U_x(0, t) = \mu(t), \quad (4)$$

где  $Z_0 = \sqrt{E\rho}$  – волновое сопротивление среды,  $\mu(t)$  – функция, определяющая закон перемещения границы [9-11].

Движущаяся поверхность вала непроницаема для зондирующего сигнала, тогда второе граничное условие при  $x = L + l(t)$  запишется в виде:

$$U[L+l(t)] = l(t),$$

где  $L$  – расстояние от источника до неподвижной границы раздела сред,  $l(t)$  – закон движения границы раздела сред.

В случае движения границы раздела сред с постоянной скоростью  $V$  закон движения границы  $l(t) = L_1 + Vt$ , где  $L_1$  – начальное расстояние от источника излучения до границы раздела сред.

Тогда закон движения границы запишется в виде [9-11]:

$$f(t) = -h \left[ \frac{1-V/c}{1+V/c} - \frac{2L_1}{c(1+V/c)} \right]. \quad (5)$$

При таком законе движения границы раздела сред излученный  $h(t)$  и отраженный  $f(t)$  акустические сигналы представляются в виде:

$$h(t) = A \sin \omega_0 t, \quad f(t) = -A \sin (\omega_1 t + \varphi),$$

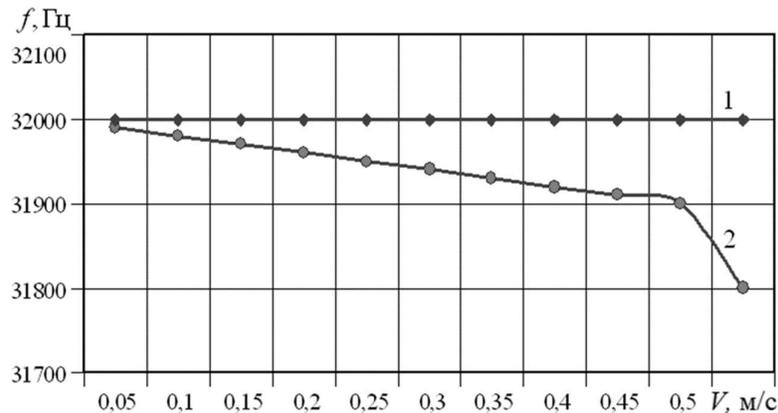
где  $A$  – амплитуда,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $f_0$  и  $f_1$  – циклические частоты излученного  $h(t)$  и отраженного  $f(t)$  акустических сигналов,  $\varphi$  – набег фаз.

Зависимость между частотами излученного и отраженного акустических сигналов определяется эффектом Доплера:

$$\omega_1 = \omega_0 \frac{1 - V/c}{1 + V/c},$$

где  $V$  – скорость отражающей поверхности объекта.

На рис. 2 показана зависимость циклической частоты  $f$  отраженного сигнала от изменения скорости  $V$  отражающей поверхности вала при акустическом зондировании.



**Рис. 2. Зависимость циклической частоты прямого 1 и отраженного 2 сигналов от скорости отражающей поверхности при акустическом зондировании**

При движении границы раздела сред по гармоническому закону со скоростью  $v(t)$  движение отражающей поверхности является модулирующим гармоническим вибросигналом [9-11]:

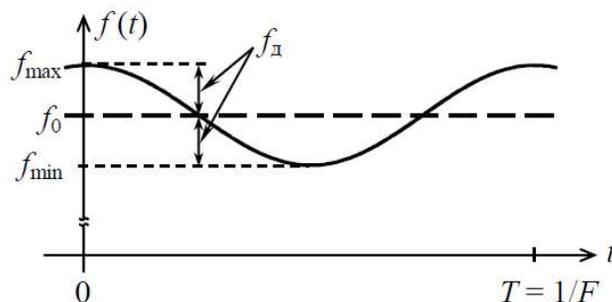
$$v(t) = V \cos(2\pi F t),$$

где  $V$  – амплитуда модулирующего вибросигнала,  $F$  – циклическая частота вибрации поверхности исследуемого объекта.

Частотная модуляция возникает тогда, когда изменяется частота отраженного акустического сигнала, т.е. при достижении скорости объекта 1% от скорости фронта зондирующей волны (рис. 3). Изменение частоты отраженного сигнала можно представить в виде следующего выражения:

$$f(t) = f_0 + kv(t) = f_0 + kV \cos(2\pi F t) = f_0 + f_d \cos(2\pi F t), \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $f_d = \Delta f = kV$  – девиация частоты.



**Рис. 3. Диапазоны изменения частоты отраженного от вибрирующей поверхности акустического сигнала при его частотной модуляции**

В данном методе измерения угловой деформации вращающегося вала информативными параметрами будут девиация частоты и индекс частотной модуляции отраженного акустического сигнала за счет эффекта Доплера и модуляция фазы [9,10]:

$$m = \Delta\omega_d / \Omega = 2\pi\Delta f / 2\pi F = \Delta f / F, \quad (7)$$

где  $\Delta\omega_d = 2\pi\Delta f$  и  $\Omega = 2\pi F$  – круговая девиация частоты отраженного акустического сигнала и частота модуляции вибрирующей поверхности.

Допустим, что скорость движения границы раздела сред много меньше скорости распространения акустической волны  $V/c = \dot{l}(t)/c \ll 1$ , тогда выражение (7) можно представить в виде ряда Фурье [9-10]:

$$\omega_1 = \omega_0 \left[ 1 - \dot{l}(t)/c + 2\dot{l}(t)^2/c^2 - 2\dot{l}(t)^3/c^3 + \dots \right]. \quad (8)$$

Интегрируя (8), находим фазу отраженного сигнала:  $\omega_1 t \approx \omega_0 (t - 2l/c)$ . Если граница движется по закону  $\Delta t = l_0 \sin \Omega t$ , то отраженная волна может быть представлена в следующем виде [12]:

$$\begin{aligned} f_+ = A_0 \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t) = A_0 \{ & J_0(m) \cos(\omega_0 t + \\ & + J_1(m) [\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t] + \\ & + J_2(m) [\cos(\omega_0 + 2\Omega)t + \cos(\omega_0 - 2\Omega)t] + \\ & + J_3(m) [\cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(\omega_0 - 3\Omega)t] + \\ & + J_4(m) [\cos(\omega_0 + 4\Omega)t + \cos(\omega_0 - 4\Omega)t] + \dots \}, \end{aligned} \quad (9)$$

где:  $J_n(m)$  – функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка от аргумента  $m$   $m = \Delta\omega_d/\Omega = \Delta f/F$  – индекс частотной модуляции,  $\Delta\omega_d$  – девиация частоты отраженного акустического сигнала [12].

В спектре отраженного сигнала вклад различных боковых составляющих определяется величиной  $m$  – индексом частотной модуляции. При частотной и фазовой модуляции меняется как мгновенная частота, так и фаза отраженного акустического сигнала. Параметры, характеризующие эти виды модуляции – девиация частоты  $\Delta\omega_d$  и девиация фазы  $\Delta\varphi_d$  – по-разному зависят от частоты модулирующего вибросигнала  $\Omega = 2\pi F$  [12].

Отраженный частотно-модулированный ультразвуковой сигнал (далее отраженный ЧМ-сигнал) от вибрирующей поверхности вала (4) может быть представлен рядом [9-12]:

$$G(t) = A_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} |J_n(m)| \cdot \cos[2\pi(f_0 + nF)t + \varphi_n], \quad (10)$$

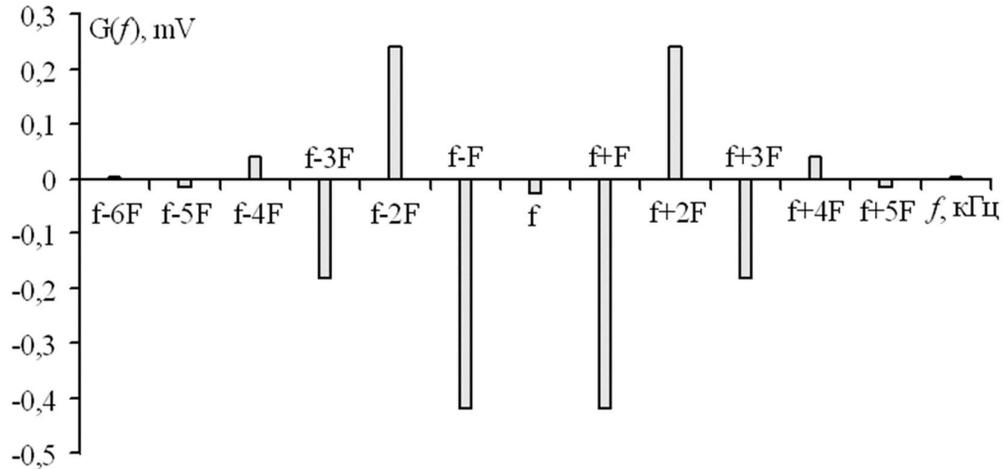
где  $J_n(m)$  – значение функции Бесселя 1-го рода  $n$ -го порядка.

Спектр отраженного ЧМ-сигнала от вибрирующей поверхности вращающегося вала определяется выражением:

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{A_0 \cdot |J_n(m)|}{2} e^{j\phi_n} \delta(f - f_0 - nF) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{G_n}{2} \cdot e^{j\phi_n} \delta(f - f_0 - nF), \quad (11)$$

где  $G_n = A_0 \cdot |J_n(m)|$  – амплитудные коэффициенты ряда Фурье,  $f > 0$ .

При  $m = 2,5$  основная гармоника с частотой  $\omega_0 = 2\pi f_0$  равна нулю. При этом основная спектральная составляющая в отраженном от вала сигнале может присутствовать. Пример такой спектрограммы отраженного ЧМ- сигнала при  $m = 2,5$  для виброперемещений  $s = 2,0$  мм приведен на рис. 4 [9].

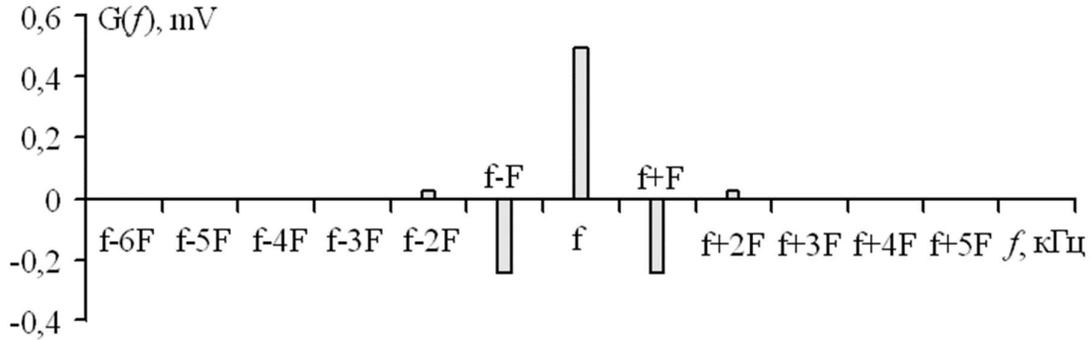


**Рис. 4. Спектр отраженного акустического сигнала при частотной модуляции при заданных значениях:  $f = 32$  кГц;  $F = 10$  Гц;  $s = 2,0$  мм;  $m = 2,5$**

Из рис. 4 следует, что уровень мощности основной гармоники с частотой  $f \rightarrow \omega_0 = 2\pi f_0$  в отраженной акустической волне близок к нулю [9].

Из соотношений (9) и (11) следует, что нижние нечетные составляющие отличаются от соответствующих верхних составляющих на фазовый угол, равный  $\pi$ , что обеспечивает постоянство амплитуды отраженного ЧМ-сигнала с угловой модуляцией, к примеру при  $m_q \ll 1$ . При частотной модуляции спектр отраженного акустического сигнала  $u(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + m_q \sin \Omega t)$  от поверхности вращающегося вала имеет бесконечное число спектральных составляющих. Эти составляющие расположены симметрично относительно частоты зондирующего акустического сигнала  $f \rightarrow \omega_0 = 2\pi f_0$  через интервалы, кратные частоте вибрации  $\Omega = 2\pi F$ . Частоты спектральных составляющих равны  $f \pm nF \rightarrow \omega_0 \pm n\Omega$ , а амплитуды –  $A_0 \times J_n(m)$ . Аналогичный результат получается и при фазовой модуляции отраженного от поверхности вращающегося вала акустического сигнала с заменой параметра  $m$  на  $\Delta\phi_d$  [9,12].

С помощью (11) строятся спектры отраженных ЧМ-сигналов от поверхности вращающегося вала при их частотной и фазовой модуляции при заданных значениях  $m = x$ . Спектрограмма отраженного ЧМ-сигнала при  $m = 0,6$  при виброперемещении  $s = 0,5$  мм приведена на рис. 5.



**Рис.5.** Спектр отраженного акустического сигнала при частотной модуляции при заданных значениях:  $f = 32$  кГц;  $F = 10$  Гц;  $s = 0,5$  мм;  $m = 0,6$

Теоретически спектр отраженного ЧМ-сигнала от вибрирующей поверхности вращающегося вала (особенно при  $m \gg 1$ ) безграничен [9,10,12]. Чем выше значение индекса модуляции, тем шире полоса частот, занимаемая отраженным акустическим сигналом с частотной модуляцией.

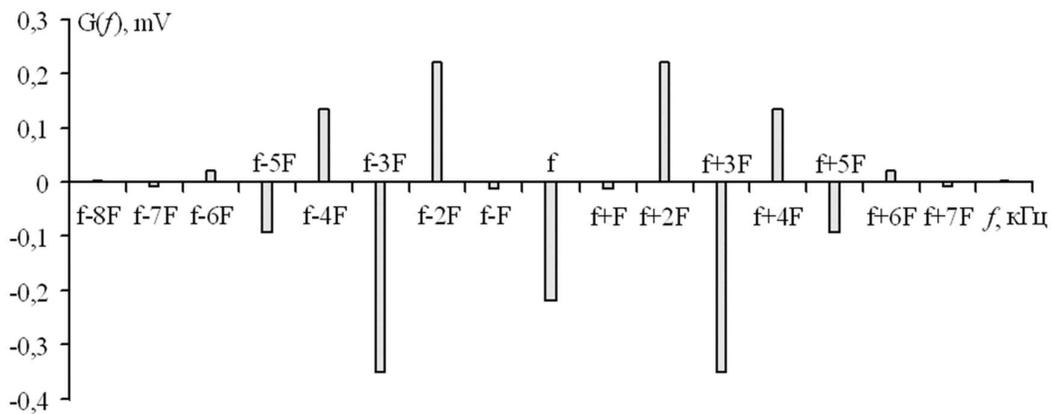
Однако, как показывает анализ, большая часть энергии частотно-модулированного отраженного акустического сигнала сосредоточена в полосе:

$$\Delta f_{cn} = 2(1 + m + \sqrt{m})F, \tag{12}$$

где  $F$  - циклическая частота вибрации в спектре отраженного ЧМ-сигнала.

Именно на эту величину и следует рассчитывать полосу пропускания тракта ультразвукового фазового вибропреобразователя. При  $m \ll 1$  ширина спектра акустического ЧМ-сигнала:  $\Delta f_{cn} = 2F$  [9,10].

При  $m \gg 1$  величина  $|J_n(m)|$  наиболее либо наименее равномерна при всех целых значениях  $|n|$ , наименьших, чем аргумент  $m$ . При  $|n|$ , близких к  $m$ ,  $|J_n(m)|$  образует всплеск, а при предстоящем увеличении  $|n|$  функция  $|J_n(m)|$  быстро убывает до нуля. Общий вид данной зависимости для  $m = 3,8$  показан на рис. 6.



**Рис.6.** Спектр отраженного акустического сигнала при частотной модуляции при заданных значениях:  $f = 32$  кГц;  $F = 10$  Гц;  $s = 3,0$  мм;  $m = 3,8$

Приравнивая наибольшее значение  $n_{\max}$  величине  $m$ , приходим к выводу, что полная ширина диапазона отраженного ЧМ-сигнала будет равна  $2|n_{\max}|\Omega = 2|n_{\max}|2\pi F \approx m4\pi F$ . Следовательно, при больших индексах модуляции  $m$  ширина диапазона отраженного ЧМ-колебания близка к двойной девиации частоты. Так для индекса модуляции  $m = 3,8$  ширина диапазона отраженного акустического колебания ограничена полосой частот  $f - 4F \div f + 4F$  (рис. 6). Можно констатировать последующее положение: при быстрой угловой модуляции (когда  $\omega_d \ll \Omega$ ) ширина диапазона отраженного акустического колебания близка к значению  $2\Omega$ ; при медленной угловой модуляции (когда  $\omega_d \gg \Omega$ ) ширина диапазона близка к значению  $2\omega_d$ .

### Заключение

Измерение изменения фазы отраженного акустического сигнала относительно опорного, падающего на исследуемую поверхность вращающегося вала можно проводить с погрешностью 0,6% только при скоростях вала, не более 0,5 м/с. Если скорость вращающегося вала превышает данный порог, то начинает проявляться девиация частоты отраженного сигнала, в спектре которого появляются дополнительные гармоники. Амплитуда основной гармоники при этом снижается, и если фазовые измерения продолжают, то они могут быть проведены уже не по основной, а по ближайшей соседней гармонике с большей амплитудой. Если эта гармоника находится в противофазе основной гармонике, то погрешность измерения может превышать 3%, что недопустимо.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00372).

### Библиографический список

1. **Генкин, М.Д.** Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова // М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. **Костюков, В.Н.** Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин / В.Н. Костюков, А.П. Науменко // учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.: ил.
3. **Ефремов, Л.В.** Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. – СПб.: Наука, 2007. – 276 с.
4. **Назолин, А.Л.** Предупреждение аварий и катастроф вращающегося оборудования критически и стратегически важных объектов техносферы: (на примере мощных турбоагрегатов атомных и тепловых электростанций): научный доклад. – М.: РАН, 2017. – 39 с.
5. **Касаткин, Б.С.** Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов // Справочное пособие. – Киев: Наукова думка 1981. – 584 с.
6. **Гапонов, В.Л.** Измерение крутящего момента на вращающихся валах / В.Л. Гапонов, А.С. Гуринов, В.В. Дудник // Вестник ДГТУ. 2012. №1(162), С. 25-32.
7. **Гордеев, Б.А.** Измерения параметров вибрации конструкций акустическими методами / Б.А. Гордеев, И.Г. Куклина, А.Н. Осмехин // Приволжский научный журнал. 2009. №2(10). С. 13-20.
8. **Гордеев, Б.А.** Определение дисбаланса жестких роторов дорожных машин акустическими методами / Б.А. Гордеев, И.Г. Куклина // Строительные и дорожные машины. 2010, №2, С. 32-35.

9. **Гордеев, Б.А.** Влияние эффекта Доплера на погрешность измерения вибрации электро-механических комплексов волновыми методами / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин, А.С. Плехов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2. С. 56-61.
10. **Гордеев, Б.А.** Влияние девиации частоты отраженного от вибрирующей поверхности ультразвукового сигнала на его спектр / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.С. Плехов, А.Н. Осмехин // Актуальные проблемы электроэнергетики. 2017. С. 88-92.
11. Андрэ Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1967. - 780 с.
12. **Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1979. – 608 с.

**B.A. Gordeev<sup>1,2</sup>, A.I. Ermolaev<sup>1,2</sup>, S.N. Okhulkov<sup>1,2</sup>,  
A.S. Plekhov<sup>2</sup>, K.S. Stepanov<sup>2</sup>**

## **MEASUREMENT OF ANGULAR DEFORMATION OF ROTATING SHAFTS BY ULTRASONIC VIBROMETER**

Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Abstract:** The article considers the problem of measuring the angular deformation of rotating shafts. It is revealed that the phase changes of the reflected acoustic signal relative to the reference one falling on the investigated surface of the rotating shaft can be carried out with an error of 0.6% at velocities of no more than 0.5 m/s.

**Keywords:** rotating shaft, angular deformation, Doppler effect, deviation of the reflected acoustic signal, torque.

### **References**

- [1] Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]*. Mechanical Engineering, Moscow, 1987. (in Russian)
- [2] Kostukov V.N., Naumenko A.P. *Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin: ucheb. posobie [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines: textbook]*. OmGTU Publishing, Omsk, 2011. (in Russian)
- [3] Efremov L.V. *Teoriya i praktika issledovaniy krutil'nyh kolebanij silovyh ustanovok s primeneniem komp'yuternykh tekhnologij [Theory and practice of research of torsional vibrations of power plants using computer technologies]*. Nauka, Saint-Petersburg, 2007. (in Russian)
- [4] Nazolin A.L. *Preduprezhdenie avarij i katastrof vrashchayushchegosya oborudovaniya kriticheski i strategicheskii vazhnykh ob'ektov tekhnosfery: (na primere moshchnykh turboagregatov atomnykh i teplovykh elektrostancij): nauchnyj doklad [Prevention of accidents and catastrophes of rotating equipment of critically and strategically important objects of the technosphere: (on the example of powerful turbine units of nuclear and thermal power plants): scientific report]*. Russian Academy of the Sciences Publishing, Moscow, 2017. (in Russian)
- [5] Kasatkin B.S. et al. *Eksperimental'nye metody issledovaniya deformacij i napryazhenij. Spravochnoe posobie [Experimental methods for studying deformations and stresses. Textbook]*. Naukova Dumka, Kyiv, 1981. (in Russian)
- [6] Gaponov V.L., Gurinov A.S., Dudnik V.V. "Izmerenie krutyashchego momenta na vrashchayushchihsiya valah [Measurement of torque on rotating shafts]", *Vestnik DGTU [Vestnik DGTU]*, vol. 1 (is. 162), 2012, pp. 25-32. (in Russian)
- [7] Gordeev B.A., Kuklina I.G., Osmekhin A.N. "Izmereniya parametrov vibracii konstrukcij akusticheskimi metodami [Measurements of vibration parameters of structures by acoustic methods]", *Privolzhskij nauchnyj zhurnal [Volga Scientific Journal]*, vol. 2 (is. 10), 2009, pp. 13-20. (in Russian)
- [8] Gordeev B.A., Kuklina I.G. "Opredelenie disbalansa zhestkih rotorov dorozhnykh mashin akusticheskimi metodami [Determination of the imbalance of rigid rotors of road vehicles by acoustic methods]", *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Construction and road vehicles]*, vol. 2, 2010, pp. 32-35. (in Russian)
- [9] Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Osmekhin A.N., Plekhov A.S. "Vliyanie effekta Doplera na pogreshnost' izmereniya vibracii elektromekhanicheskikh kompleksov volnovymi metodami

- [The influence of the Doppler effect on the error of vibration measurement of electromechanical complexes by wave methods]”, *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [NNTU n.a. R.E. Alekseev Proceedings]*, vol. 2, 2017, pp. 56-61. (in Russian)
- [10] Gordeev B.A., Okhulkov S.N., Osmekhin A.N., Plekhov A.S. “Vliyanie deviacii chastoty otrazhennogo ot vibriruyushchej poverhnosti ultrazvukovogo signala na ego spektr [Influence of frequency deviation of the ultrasonic signal reflected from the vibrating surface on its spectrum]”, *Aktual'nye problemy elektroenergetiki [Actual problems of electric power industry]*, 2017, pp. 88-92. (in Russian)
- [11] Ango, A. *Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov [Mathematics for electrical and radio engineers]*. Nauka, Moscow, 1967. (in Russian)
- [12] Gonorovskiy I.S. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]*. Sovetskoe Radio, Moscow, 1979. (in Russian)

Б.А. Гордеев<sup>1</sup>, А.И. Ермолаев<sup>1</sup>, А.С. Плехов<sup>1</sup>, Д.Ю. Титов<sup>1</sup>

## СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ УПРАВЛЯЕМЫХ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ МУФТ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>1</sup>

**Аннотация:** В статье описан стенд для испытаний управляемых магнитореологических муфт. Приведена структура стенда и измерительного канала. Система измерения крутящего момента основана на тензометрических датчиках. Приведено устройство управляемой магнитореологической муфты. Дана методика определения демпфирующих свойств управляемых магнитореологических муфт.

**Ключевые слова:** крутильные колебания, испытательный стенд, измерение крутящего момента, магнитореологическая муфта.

Повреждения вала, редуктора, упругой муфты и других элементов силовой установки, обеспечивающих передачу и преобразование механической энергии, могут быть вызваны крутильными колебаниями, которые относят к опасным динамическим нагрузкам [1]. Крутильные колебания валов и, как следствие, шум и вибрация, могут быть вызваны изменением динамического момента. Источниками переменного динамического момента, с одной стороны, могут быть приводные агрегаты. Так, валы всех двигателей внутреннего сгорания, используемые в автономных генераторных установках, подвержены крутильным колебаниям. Поскольку сгорание топлива происходит в определенные моменты времени, то в эти моменты возникают пульсации момента на валу. С другой стороны, нагрузка на валу может иметь прерывистый или резко-переменный характер, например, электрический привод бетономешалки. Такая нагрузка также вызывает колебания момента [2]. Колебания вращающего электромагнитного момента могут быть вызваны искажениями питающего напряжения асинхронного двигателя, питающегося преобразователем частоты или колебаниями напряжения при прямом включении [3].

Гармонические токи, питающие электрический двигатель, вызывают пульсирующие крутящие моменты. В трехфазных системах гармоника тока обычно имеют частоты  $\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19$  и выше, кратные основной частоте – 50 Гц. Гармоники тока  $5, 11, 17, \dots (6n-1)$  создают вращающееся магнитное поле, которое противоположно основному потоку от первой гармоники. Гармоники тока  $7, 13, 19, \dots (6n+1)$  также создают вращающееся магнитное поле, но оно вращается в том же направлении, что и поле от основной гармоники. Вращающиеся поля от высших гармоник создают вредные паразитные моменты и добавочные потери. Как показано в [4, 5] снижение вибрации электрических машин повышает ресурс и снижает потери электрической мощности.

Для снижения крутильных колебаний применяются как специальные алгоритмы управления преобразователями частоты [6], так и муфты с вязкоупругими

магнитореологическими материалами [7, 8].

Управляемая муфта содержит электромагниты и ее упругие и демпфирующие свойства изменяются под действием внешнего магнитного поля. Поэтому возникает задача оценки демпфирующих свойств управляемой муфты. Для решения этой задачи предложен стенд. Структурная схема стенда для измерения демпфирующих свойств магнитореологических муфт показана на рис. 1. На рис. 1 показано: Д1, Д2 – тензорезистивные датчики момента; М – исследуемая магнитореологическая муфта; В – вал; НУ – нагрузочное устройство; ПЧ – преобразователь частоты электропривода; РПН1, РПН2 – регулируемый преобразователь напряжения; СУ – система управления.

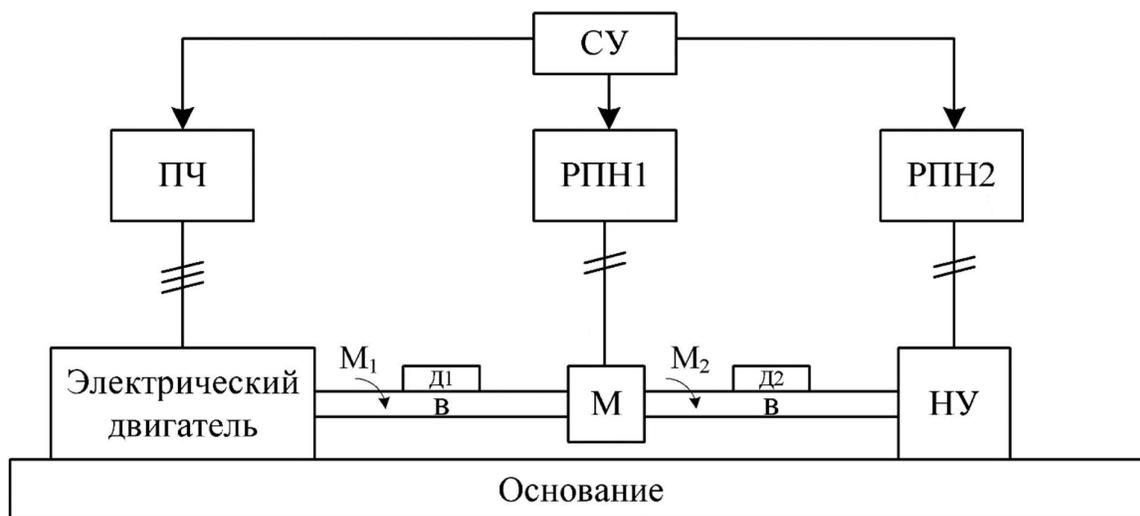


Рис. 1. Структурная схема стенда

Для измерения колебаний крутящего момента применяется система измерения крутящего момента, основанная на тензорезистивных датчиках (рис. 2).

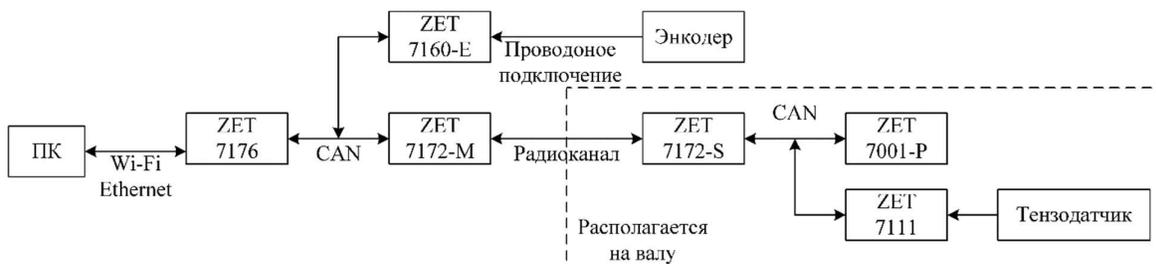
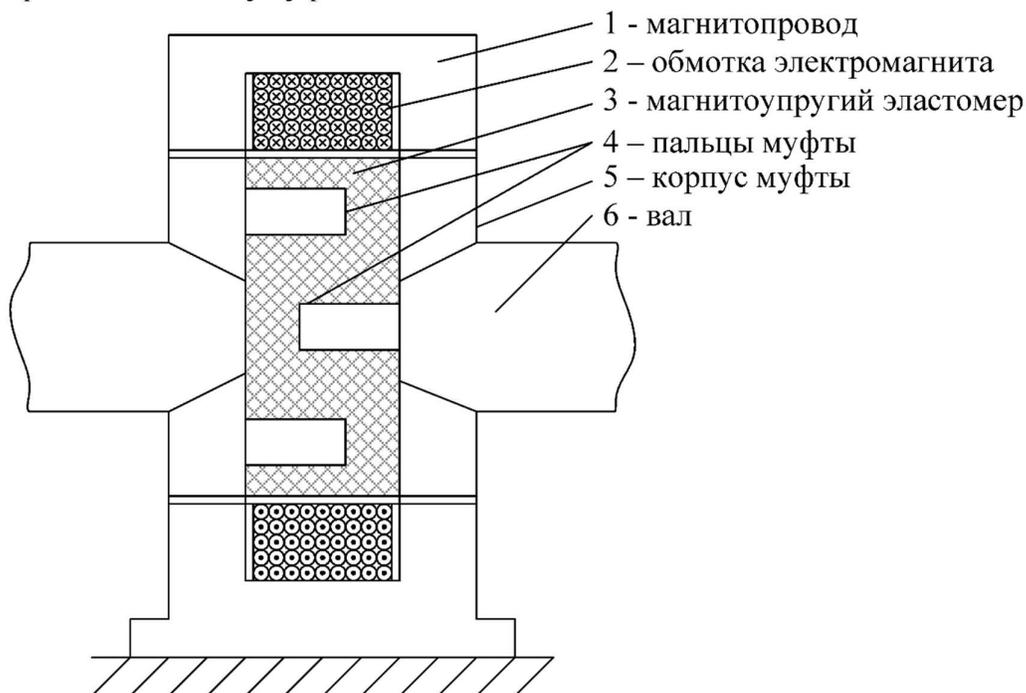


Рис. 2. Структура системы измерения крутящего момента

На рис. 2 показано: ZET 7176 – преобразователь интерфейса Wi-Fi ↔ CAN 2.0; ZET 7160-E – цифровой энкодер; ZET 7172-M – приёмник (преобразователь радиоканал – CAN); ZET 7172-S передатчик (преобразователь CAN – радиоканал); ZET 7001-P - соединитель измерительных линий; ZET 7111 - цифровой тензодатчик [9]. Питание оборудования измерительной системы, расположенного

на валу, реализовано от аккумуляторной батареи.

На рис. 3 показано устройство управляемой магнитореологической муфты с 4 стержнями на полумуфтах.



**Рис. 3. Устройство управляемой магнитореологической муфты**

Методика оценки основана на измерении крутящих моментов на участках вала до и после управляемой магнитореологической муфты с помощью двух датчиков. Зависимость вращающего момента от угла поворота вала может быть представлена в виде суммы синусоидальных кривых с разными амплитудами и частотами. Поэтому определяя частотный спектр крутящих моментов  $M_1$  и  $M_2$ , можно экспериментально определить частотные характеристики управляемой магнитореологической муфты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00372).

### Библиографический список

1. Ефремов, Л. В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма "Наука", 2007. – 276 с.
2. Ермолаев, А.И., Влияние сил в зоне резания на движение привода подачи фрезерного станка / В.И. Ерофеев, А.С. Плехов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2020. - № 11 (728). - С. 13-25.
3. Ермолаев, А.И., Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством МКЭ-моделирования / В.И. Ерофеев, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов // Интеллектуальная электротехника, 2021. - № 3 (15). - С. 37-56.
4. Ермолаев, А.И., Оценка мощности вибрации в электроприводе / А.И.Плехов А.С., Титов Д.Ю., Чернов Е.А. // Электротехнические системы и комплексы, 2019. - № 1 (42). -

- С. 30-37.
5. Байков, А.И., Анализ вибраций двигателей, смонтированных на одном основании / А.Б. Дарьенков, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2016. - С. 8-12.
  6. Ermolaev, A., Erofeev, V., Plekhov, A., Titov, D. Active reduction of magnetic noise occurring in the stators of an induction motors // *Vibroengineering procedia*, 2021. - № 38. – P. 172-178.
  7. Ванягин, А.В., Снижение интенсивности крутильных колебаний валов с использованием магнитореологических муфт / Б.А. Гордеев, В.И. Ерофеев, С.Н. Охулков // *Вестник научно-технического развития*, 2020. - № 1 (149). - С. 11-22.
  8. Гордеев, Б.А., Оценка упругих и демпфирующих свойств соединительной магнитореологической муфты вращающихся валов / С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин, Г.К. Корендяев // *Вестник машиностроения*, 2018. - № 5. - С. 9-14.
  9. Электронные технологии и метрологические системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zetlab.com/>, свободный – (01.06.2022).

**B.A. Gordeev<sup>1</sup>, A.I. Ermolaev<sup>1</sup>, A.S. Plekhov<sup>1</sup>, D.Yu. Titov<sup>1</sup>**

## **STAND FOR TESTING CONTROLLED MAGNETORHEOLOGICAL COUPLINGS**

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia<sup>1</sup>

**Abstract:** The article describes a stand for testing controlled magnetorheological couplings. The structure of the stand and the measuring channel is given. The torque measurement system is based on tensometric sensors. The device of a controlled magnetorheological coupling is given. The methodology for determining the damping properties of controlled magnetorheological couplings is given.

**Key words:** torsional vibrations, test stand, torque measurement, magnetorheological coupling.

### **References**

- [1] L.V. Efremov, “Teoriya i praktika issledovaniy krutil'nykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniym komp'yuternykh tekhnologiy [Theory and practice of researching steep fluctuations in power plants using computer technology]”. St. Petersburg: St. Petersburg Publishing and Common-Boarding Company "Science", 2007.- 276 p (in Russian)
- [2] A.I. Ermolaev, V.I. Erofeev, A.S. Plekhov, “Vliyaniye sil v zone rezaniya na dvizheniye privoda podachi frezernogo stanka [The influence of forces in the cutting zone on the movement of the drive of the milling machine]”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [Bulletin of higher educational institutions. Mechanical Engineering], No 11, pp. 13-25, 2020 (in Russian)
- [3] A.I. Ermolaev, V.I. Erofeev, A.S. Plekhov, D.Yu. Titov, “Issledovaniye magnitnoy vibratsii asinkhronnogo elektrodvigatelya posredstvom MKE-modelirovaniya [The study of the magnetic vibration of the asynchronous electric motor by means of MKE -modeling]”, *Intel'ktual'naya elektrotehnika* [Intellectual electrical engineering], No 3, pp. 37-56, 2021 (in Russian)
- [4] A.I. Ermolaev, A.S. Plekhov, D.Yu. Titov, E.A. Chernov, “Otsenka moshchnosti vibratsii v elektroprivode [Vibration capacity assessment in electric drive]”, *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes], No. 1, pp. 30-37, 2019 (in Russian)
- [5] A.I. Baykov, A.B. Dar'enkov, A.S. Plekhov, D.Yu. Titov, B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov, “Analyzing vibration of motors mounted on a single foundation”, 9th International Conference on Power Drives Systems, pp. 7756691, 2016
- [6] A.I. Ermolaev, V.I. Erofeev, A.S. Plekhov, D.Yu. Titov, “Active reduction of magnetic noise occurring in the stators of an induction motors”, *Vibroengineering procedia*, No 38, pp. 172-178, 2021.
- [7] A.V. Vanyagin, B.A. Gordeev, V.I. Erofeev, S.N. Okhulkov, “Snizheniye intensivnosti krutil'nykh kolebaniy valov s ispol'zovaniyem magnitoreologicheskikh muft [Reducing the intensity of steep vibrations of shafts using magnetoreological couplings]”, *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Scientific and Technical Development], No 1, pp. 11-22, 2020 (in Russian)
- [8] B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov, A.N. Osmekhin, G.K. Korendyasev, “Elastic and damping properties of a magnetorheological coupling for rotating shafts”, *Russian Engineering Research*, No 12, pp. 911-915, 2018.
- [9] ZETLAB Company [Online]. – Avaiabe at: <https://zetlab.com> (Accessed: Jun. 01, 2022).

А.Б. Дарьенков, И.Е. Бердников, А.П. Слuzов, В.В. Соколов

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И СХЕМОТЕХНИКА МОДУЛЯ ДИСКРЕТНОГО ВЫХОДА ДЛЯ УСТРОЙСТВ АСУТП НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье рассмотрены разработанные авторами научно-технические решения по созданию канала дискретного выхода для устройств промышленной автоматики. Приведено описание схемотехнических решений, применяемых в настоящее время иностранными компаниями, а также разработанные авторами.

**Ключевые слова:** промышленная автоматика, ПЛК, дискретный выход, отечественная компонентная база.

Надежность и безотказность — неотъемлемые параметры для систем автоматизированного управления технологическим процессом. Самым низкоуровневым звеном в такой системе является, например, дискретный выход, входящий в состав соответствующего модуля программируемого логического контроллера (ПЛК). С его помощью управляют различными клапанами, магнитными пускателями или промежуточными реле. Нагрузочная способность дискретного выхода обычно находится в промежутке от 100 мА до 2 А и зависит не только от производителя, но и от схемотехники модуля вывода.

Анализ рынка существующих решений импортных производителей показал, что каналы модулей дискретного выхода имеют широкий функционал и имеют такие функции как самодиагностика и определение обрыва нагрузки как при работающем выходе, так и отключенном. Некоторые фирмы предлагают решения с реализацией максимально-токовой защиты (индивидуальной и групповой).

Маломощные дискретные выходы с нагрузочной способностью до 0,5 А чаще всего построены без индивидуальных защит на р-п-р транзисторах [3] (рис. 1). Это достаточно простые устройства, в которых защита от токов короткого замыкания выполняется плавкой вставкой на группу из 8 или 16 выходов, а гальваническая изоляция выхода от микропроцессорной части модуля обеспечивается оптроном.

Мощные транзисторные дискретные выходы с нагрузочной способностью до 2 А построены с использованием интеллектуальных ключей, в основе которых MOSFET транзисторы (рис. 2). Как правило, это специализированные микросхемы, которые управляют состоянием выхода, а также реализуют максимально-токовую и тепловую защиты. Для примера рассмотрим решение компании Schneider Electric, примененное в ПЛК серии Modicon.

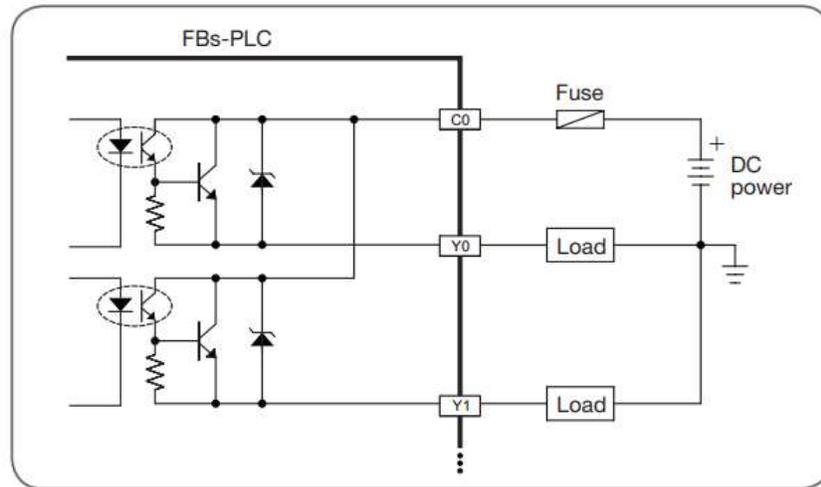


Рис. 1. Типовая структура маломощного дискретного выхода

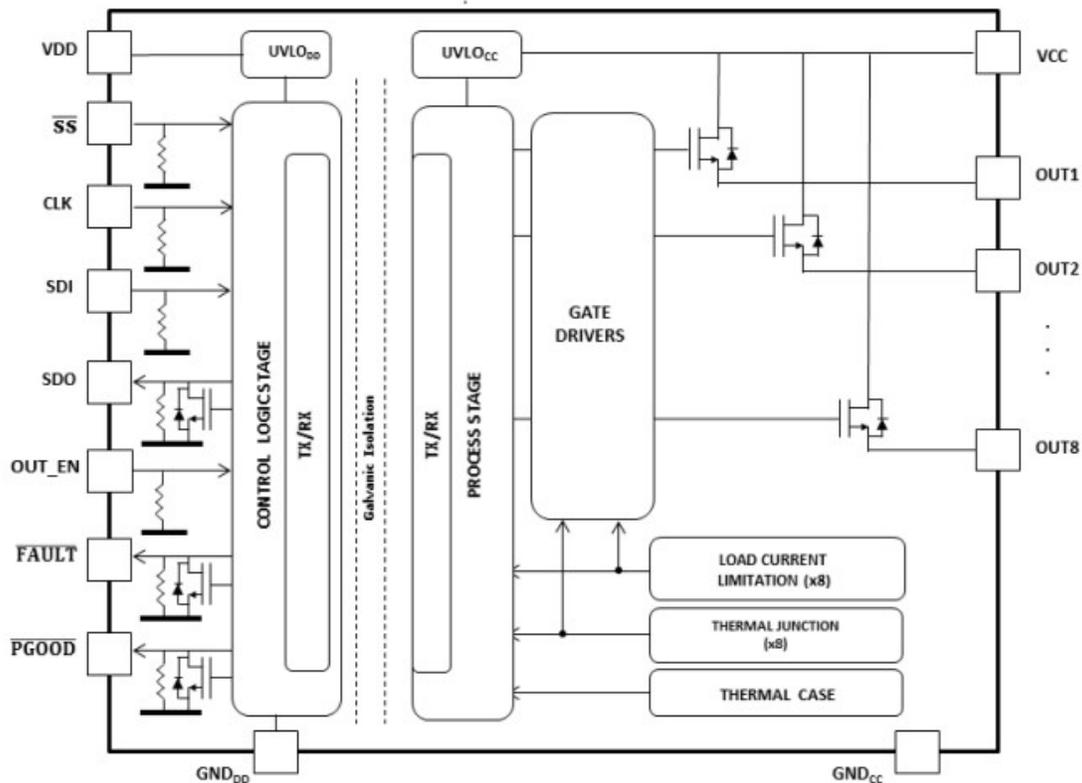


Рис. 2. Структура микросхемы ISO8200AQ

Микросхема ISO8200AQ (рис. 2) применяется в ПЛК фирмы Schneider Electric для построения дискретных выходов. Она содержит 8 силовых ключей с номинальным током 700 мА на канал, реализует максимальнотокую и тепловую защиты и имеет цифровой гальванически изолированный интерфейс управления. Использование подобных микросхем иностранными производителями сильно упрощает конструкцию и уменьшают габариты модулей вывода.

На основании анализа импортных решений можно сделать вывод, что проектируемый канал дискретного выхода должен иметь и выполнять следующие функции:

- максимально-токовую защиту;
- сигнализацию о превышении номинального тока;
- сигнализацию об обрыве цепи нагрузки;
- защиту от перенапряжений;
- гальваническую изоляцию.

Кроме того, желательно преимущественное применение отечественной элементной базы.

На рис. 3 приведена структура разработанного канала дискретного выхода.

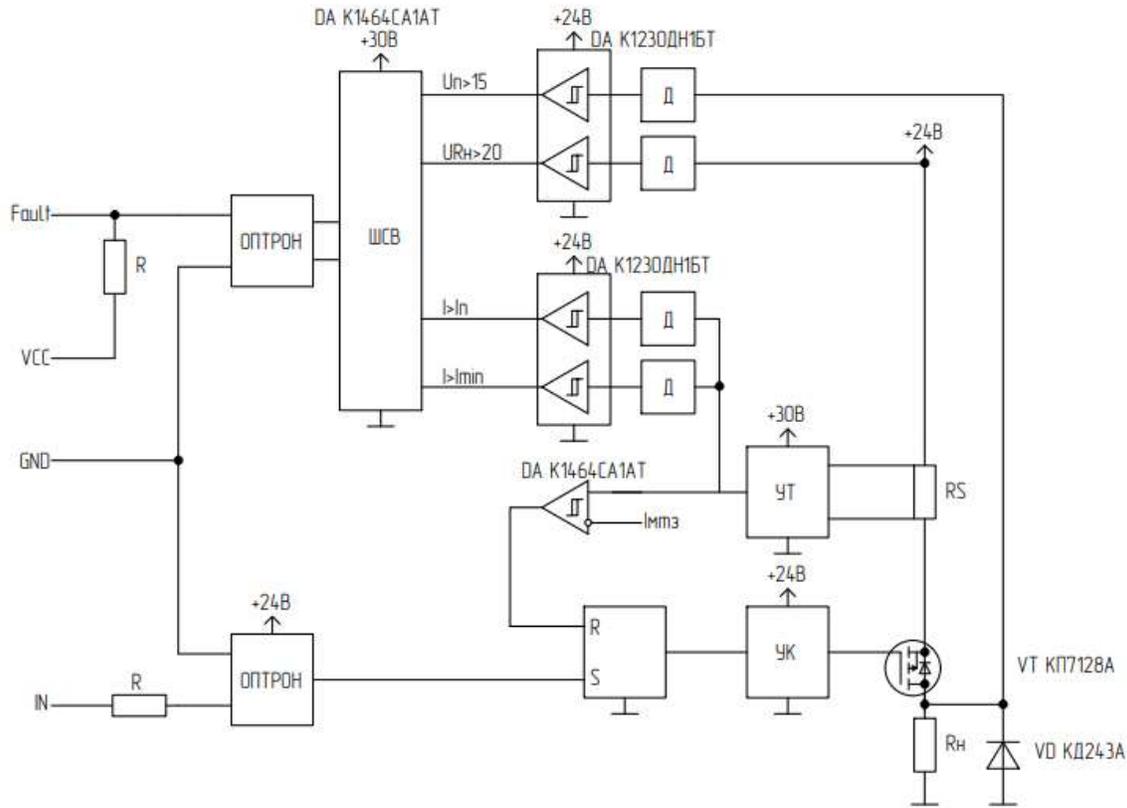


Рис. 3. Структура канала дискретного выхода: Д – делитель, УТ – усилитель тока, УК – усилительный каскад, ШСВ – шифратор состояния выхода

В качестве силового ключа применен р-канальный MOSFET транзистор фирмы «Интеграл» в корпусе ТО-220. Измерение тока, протекающего через канал, осуществляется с помощью шунта с сопротивлением 50 мОм. Усиление сигнала шунта выполняется операционным усилителем с дифференциальным включением К1464УД1А, сигнал с которого поступает на компаратор К1464СА1АТ и переключает RS-триггер в случае возникновения короткого замыкания [1]. RS-триггер построен на дискретных транзисторах КТ229А9 фирмы «АО Группа Кремний-Эл».

Усилительный каскад выполнен на двух биполярных транзисторах разной проводимости КТ229А9 и КТ228А9 и согласующим компаратором К1464СА1АТ [2].

Для индикации состояния выхода используется метод широтно-импульсной модуляции с низкой частотой. Схемотехнически реализуется с помощью ОУ К1464УД1А, работающего по схеме мультивибратора. На рис. 4 приведен фрагмент схемы монитора состояния на одной из итераций выхода.

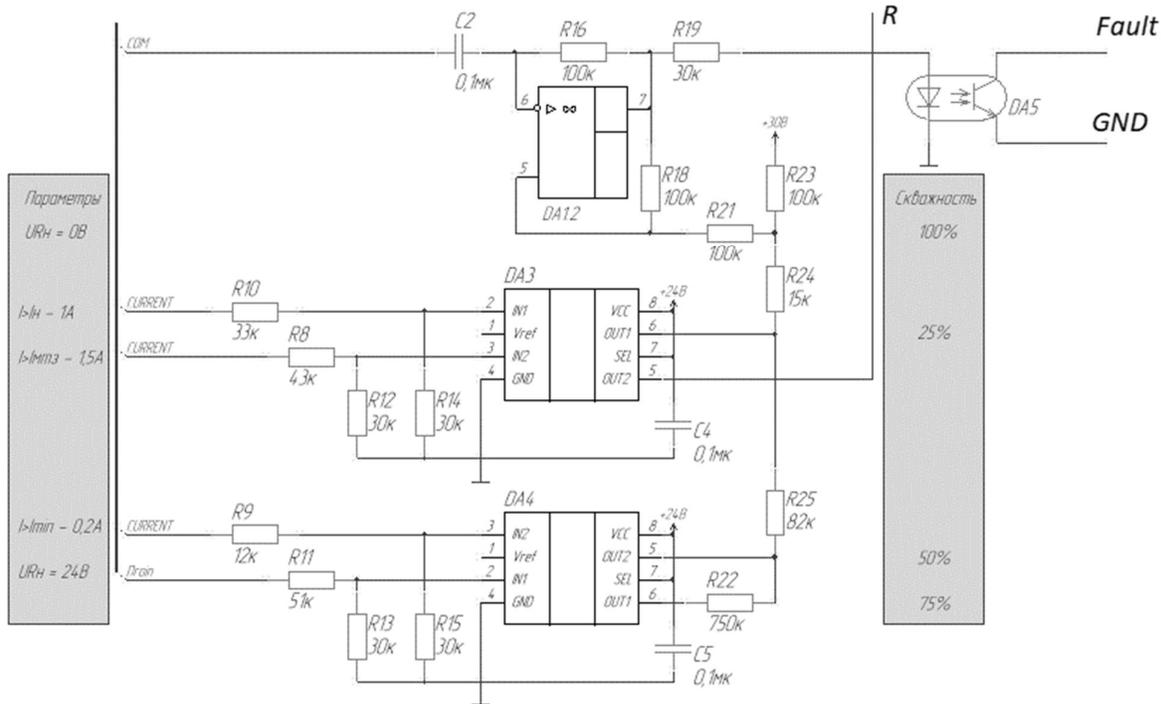


Рис. 4. Фрагмент схемы монитора состояния дискретного выхода

В качестве компараторов, которые производят сравнение скважности ШИМ, использованы микросхемы монитора питания К1230ДН1БТ, фирмы «АО Группа Кремний-Эл». На их входы подаются соответствующие сигналы, приведенные к необходимому уровню с помощью делителей. Гальваническая изоляция осуществляется с помощью оптронов РВ181S, фирма «ОАО Протон».

Информация о состоянии выхода шифруется скважностью ШИМ сигнала Fault и расшифровывается управляющим микроконтроллером модуля:

- 0% - нагрузка подключена, силовой транзистор закрыт;
- 25% - обрыв нагрузки, ток менее 10мА, силовой транзистор открыт;
- 50% - нагрузка подключена, ток в пределах от 10 мА до 700 мА, силовой транзистор открыт;
- 75% - нагрузка подключена, ток превышает 700 мА, силовой транзистор открыт;
- 100% - не подключен полевой источник питания напряжением 24В, или обрыв нагрузки.

- Срабатывание максимальной токовой защиты определяется условием подачи логической единицы на вход IN при наличии нулевой скважности ШИМ-сигнала Fault.

Для проверки работоспособности схемотехнического решения был разработан макетный образец. Применение дискретных элементов потребовало изготовления отдельной платы управления силовым транзистором, внешний вид которой показан на рис. 5. Данный модуль устанавливается рядом с транзистором и управляет им.

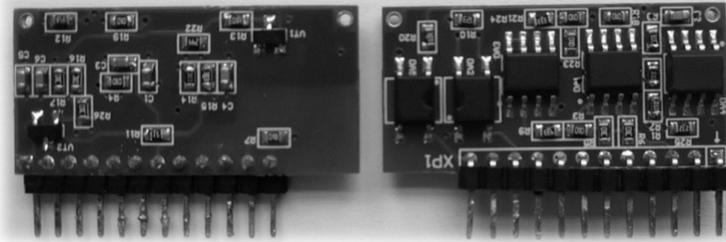


Рис. 5 Внешний вид модуля управления силовым транзистором

В ходе проверки работоспособности канала дискретного выхода были получены осциллограммы, представленные на рис. 6. Из осциллограммы видно, что скорость срабатывания защиты составляет около 10 мкс при настройке максимально токовой защиты на 2 А.

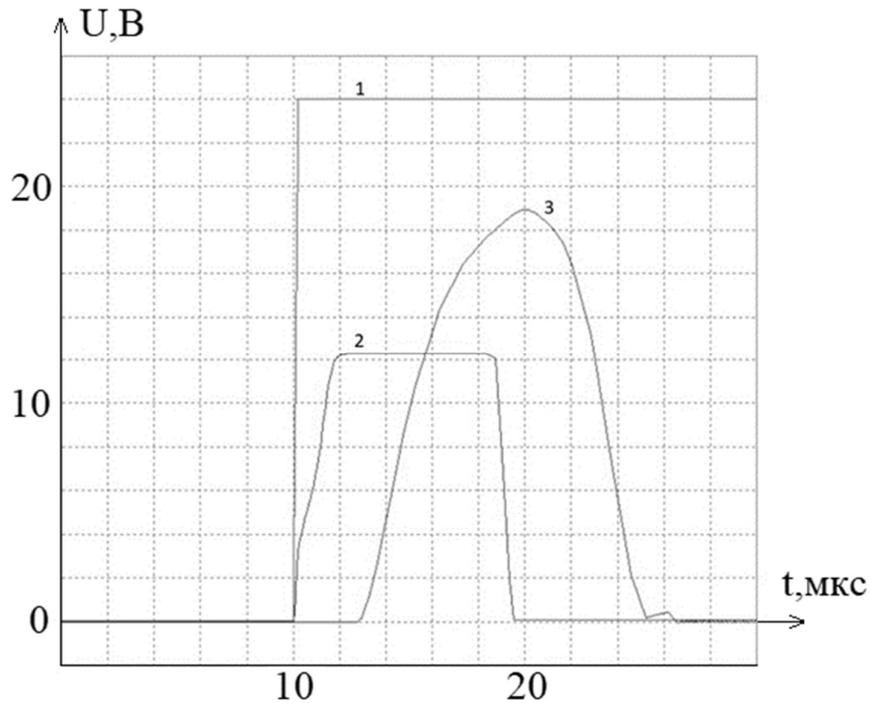


Рис. 6 Осциллограмма срабатывания максимальной токовой защиты:  
 1 – напряжение на входе S триггера; 2 – напряжение на выходе Q триггера;  
 3 – напряжение на сопротивлении нагрузки в 1 Ом

### Выводы

1. Разработанное техническое решение канала дискретного вывода, полностью соответствует предъявляемым техническим требованиям.
2. Время срабатывания максимально токовой защиты составляет менее 10 мкс.
3. Все комплектующие, использованные при разработке, производятся в России. На рис. 7 представлен вариант компоновки 32-канального модуля дискретных выходов.

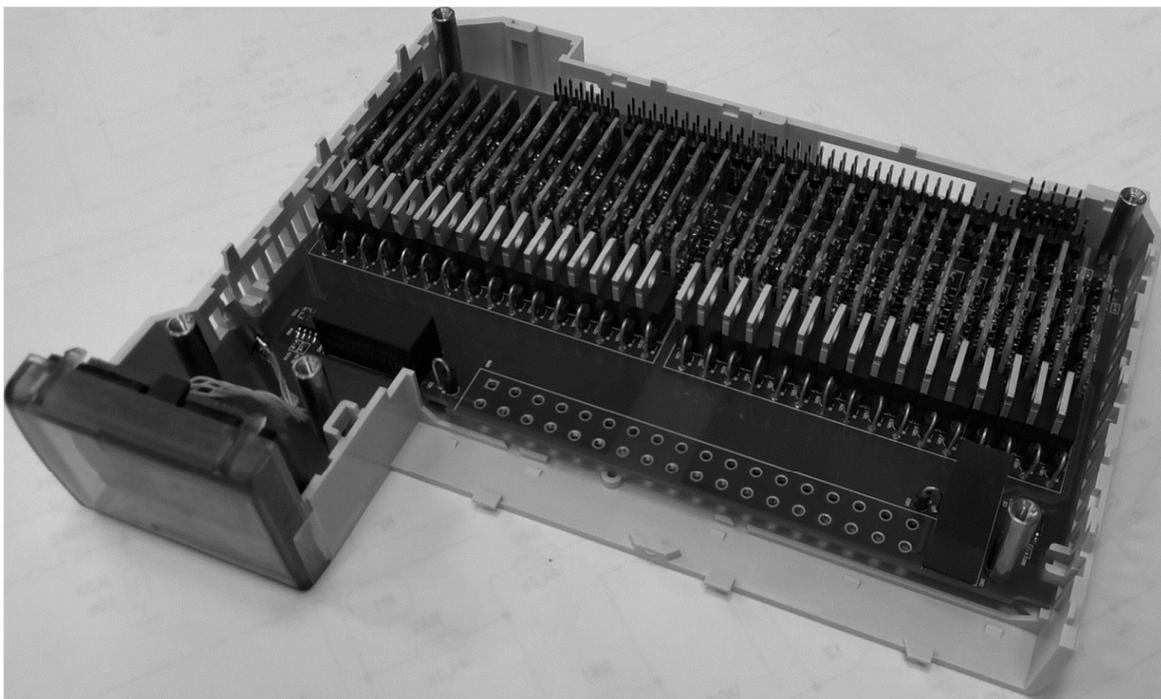


Рис. 7. 32-канальный модуль дискретных выходов

### Библиографический список

1. Хоровиц, П., Искусство схемотехники: Пер. с англ. Изд. 2-е./ П. Хоровиц, У. Хилл - М.: Издательство БИНОМ 2014. - 704 с.
2. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы / В. Л. Шило — М.: Сов. радио, 1979.
3. FATEK FBs Руководство пользователя – I Аппаратура и инструкции: Пер. с англ. М.: компания «Сервотехника» 2007. – 347 с.

**A.B. Dar'enkov, I.E. Berdnikov, A.P. Sluzov, V.V. Sokolov**

**TECHNICAL SOLUTIONS AND CIRCUIT DESIGN OF A DISCRETE  
OUTPUT CHANNEL FOR AUTOMATIC DEVICES BUILT ON A  
DOMESTIC COMPONENT BASE**

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

**Abstract:** The article considers the scientific and technical solutions developed by the authors for the creation of a discrete output channel for industrial automation devices. The description of circuit solutions currently used by foreign companies, as well as those developed by the authors, is given.

**Key words:** industrial automation, PLC, discrete output, domestic component base.

**References**

- [1] Horowitz P., Hill W. The art of circuitry: Transl. from English. - Ed. 2nd. - M.: Publishing house BINOM 2014. - 704 p. (in Russian)
- [2] Shilo V.L. Linear integrated circuits.— M.: Sov. radio, 1979 (in Russian)
- [3] FATEK FBs User's Manual - I Hardware and Instructions: Transl. from English. M.: Servotekhnika company, 2007. – 347 p. (in Russian)

УДК 621.3.078

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_110

В.В. Дмитриева, Д.В. Дзюин

## АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПОДАЧИ ВОДЫ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

**Аннотация:** В данной работе разработана система управления многодвигательной электромеханической системой технологической установки подачи воды теплоэлектростанции с частотно-регулируемым приводом центробежных насосов в целях минимизации потерь воды и электроэнергии. В среде *Simulink* программы *MATLAB* синтезирована компьютерная модель схемы с многоинверторным преобразователем частоты, промоделирован процесс автоматического регулирования расхода воды, обеспечены синусоидальная форма напряжения и единичный коэффициент мощности сети электроснабжения.

**Ключевые слова:** теплоэлектростанция, многодвигательная электромеханическая система, частотно-регулируемый электропривод, центробежный насос, технологическая установка подачи воды, система автоматического управления, *MATLAB/Simulink*.

На тепловой электростанции (ТЭЦ) для обеспечения конечных потребителей теплоносителем в требуемом объеме группа сетевых насосов поддерживает требуемый расход воды и давление в тепловой сети и сети горячего водоснабжения. В случае изменения состава работающих агрегатов, из-за недостаточного быстродействия регуляторов, взаимного влияния их друг на друга не удастся достичь достаточной точности и надежности поддержания гидравлических параметров. Соответственно, в каждый момент времени возникает проблема включения и поддержания работы нужного числа сетевых насосов с определенной подачей. Для решения этой проблемы возможно применение автоматизированного регулируемого многодвигательного электропривода насосных установок [1].

Цель данной работы – разработать систему автоматического управления (САУ) многодвигательной электромеханической системой (МЭС) технологической установки подачи воды на ТЭЦ, чтобы минимизировать потери воды и электроэнергии в технологическом процессе тепло- и горячего водоснабжения потребителей. Задачи работы включают анализ процесса регулирования подачи насосов; синтез САУ частотно-регулируемым электроприводом, САУ активным выпрямителем напряжения и САУ расхода воды; моделирование МЭС в среде *Simulink* программы *MATLAB*, оценку качества её работы.

При постоянной частоте вращения рабочего колеса центробежного насоса регулирование подачи изменением поперечного сечения трубопровода (дресселированием) приводит к избыточному напору, гидравлическим ударам, разрывам труб и т.д. В современных насосных установках наибольшее

распространение получил частотно-регулируемый привод (ЧРП), обеспечивающий плавное изменение подачи и напора насоса путём изменения частоты вращения рабочего колеса, при этом электроэнергия используется рационально и отсутствует избыточное потребление воды [2].

Схема МЭС с одним групповым преобразователем частоты (ПЧ) способна обеспечить только одновременное и одинаковое управление всеми параллельно работающими агрегатами. В этом случае предпочтительным является вариант создания многодвигательной системы ЧРП с количеством ПЧ, равным количеству нагнетателей, что увеличивает первоначальные затраты на 30% по сравнению с групповым регулированием [1, 3, 4].

В схеме МЭС с многоинверторным ПЧ (рис. 1) каждый инвертор имеет автономную систему управления, задающую формирование на обмотках статора соответствующего приводного двигателя напряжения требуемой амплитуды и частоты, обеспечивая индивидуальное регулирование электромеханических координат каждого двигателя МЭС. Все инверторы подключены к общему активному выпрямителю напряжения (АВН), система управления которым обуславливает поддержание стабильного напряжения в звене постоянного тока (ЗПТ) и требуемый коэффициент мощности сети электроснабжения, даже в случаях колебания напряжения питания [4].

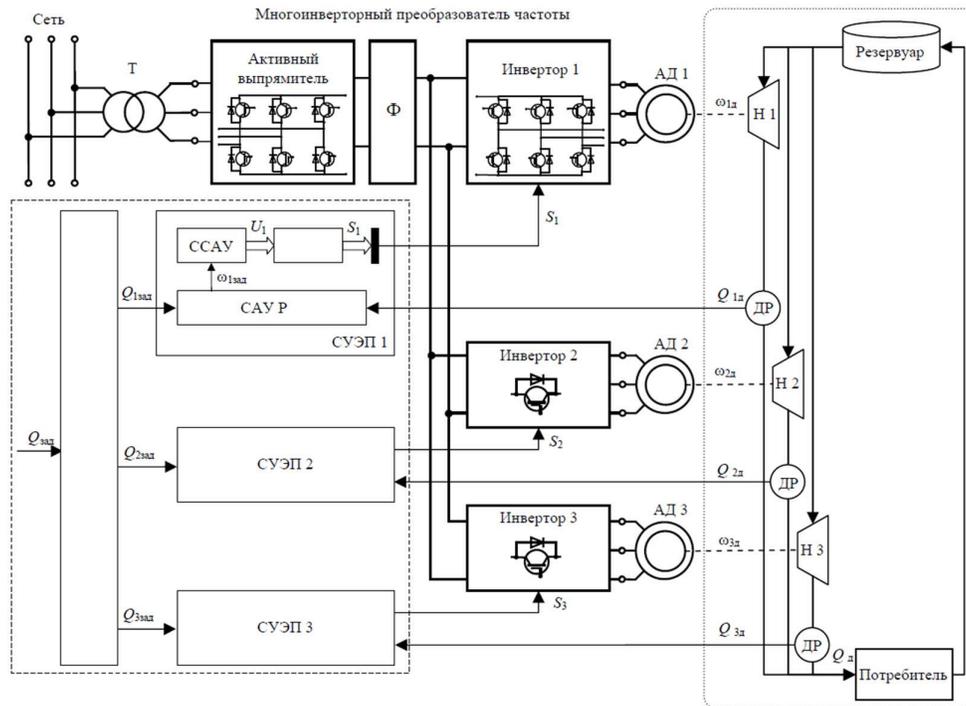


Рис. 1. Функциональная схема МЭС с многоинверторным ПЧ

Для технологической САУ МЭС входным управляющим воздействием выступает задание на расход воды  $Q_{зад}$ , который ТЭЦ поддерживает на входе потребителя. Технологическая САУ в соответствии с заданием на расход формирует индивидуальное задание на частоту вращения каждого приводного электродвигателя насоса [4].

В технологической установке подачи воды ТЭЦ используются три центробежных насоса К-100-65-250 и три асинхронных двигателя АИР200L2 [4].

В среде *Simulink* синтезирована компьютерная модель многодвигательной электромеханической системы технологической установки подачи воды (рис. 2). Силовая часть включает источник напряжения 0,4 кВ, активный выпрямитель и три автономных инвертора на *IGBT*, звено постоянного тока с *C*-фильтром, три асинхронных двигателя с насосами. Система управления состоит из системы автоматического управления расходом воды (САУР), трёх систем управления электроприводами (СУЭП) и замкнутой системы управления АВН с обратной связью по напряжению звена постоянного тока.

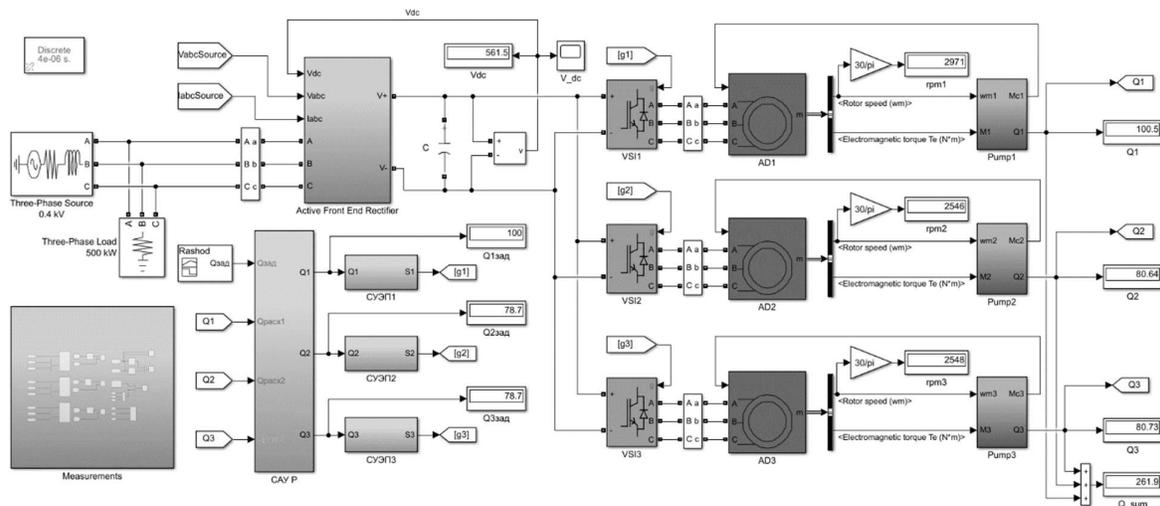


Рис. 2. Компьютерная модель многодвигательной электромеханической системы технологической установки подачи воды в *Simulink*

Математическая модель центробежного насоса и трубопроводной системы строится по основным уравнениям из [2]. Вычисляемое значение момента сопротивления подаётся на вход механической части модели асинхронного двигателя (обратная связь по моменту). В системе требуется высокая точность регулирования по расходу, а не по скорости, поэтому применяется скалярное управление ЧРП по квадратичному закону регулирования при вентиляторной нагрузке. Напряжение на обмотках статора формируется по алгоритму широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с использованием метода пространственно-векторной модуляции (*Space Vector Pulse Width Modulation*).

В *Simulink* синтезирована двухконтурная система подчиненного регулирования активного выпрямителя напряжения с ПИ-регуляторами. С помощью преобразования координат АВН управляется отдельно по проекциям  $I_d$  и  $I_q$  обобщенного вектора сетевого тока во внутреннем контуре тока. Положительным значениям  $I_d$  соответствует режим потребления энергии из сети, отрицательным – режим рекуперации. Для потребления из сети чисто активной мощности задётся значение  $I_q = 0$ . Внешний контур стабилизирует напряжение конденсатора звена постоянного тока [5].

Система автоматического регулирования расхода воды представляет собой программируемый микроконтроллер, получающий сигналы с датчиков-

расходомеров. Задание на частоту вращения каждого двигателя представлено алгоритмом с несколькими условиями, зависящими от требуемой величины расхода [4]. САУР может изменять параметры в режиме реального времени в соответствии с изменениями в системе управления электроприводом насоса, что повышает её устойчивость и надежность. Адаптивное ПИД-регулирование может эффективно адаптировать центробежные насосы к различным сложным условиям эксплуатации и повысить эффективность их работы [6].

Результаты моделирования работы системы регулирования расхода воды представлены на рисунке 3. Максимальное отклонение от заданного расхода (ошибка регулирования) составляет 0,6 м<sup>3</sup>/ч, время регулирования 0,7 с, перерегулирование 0%.

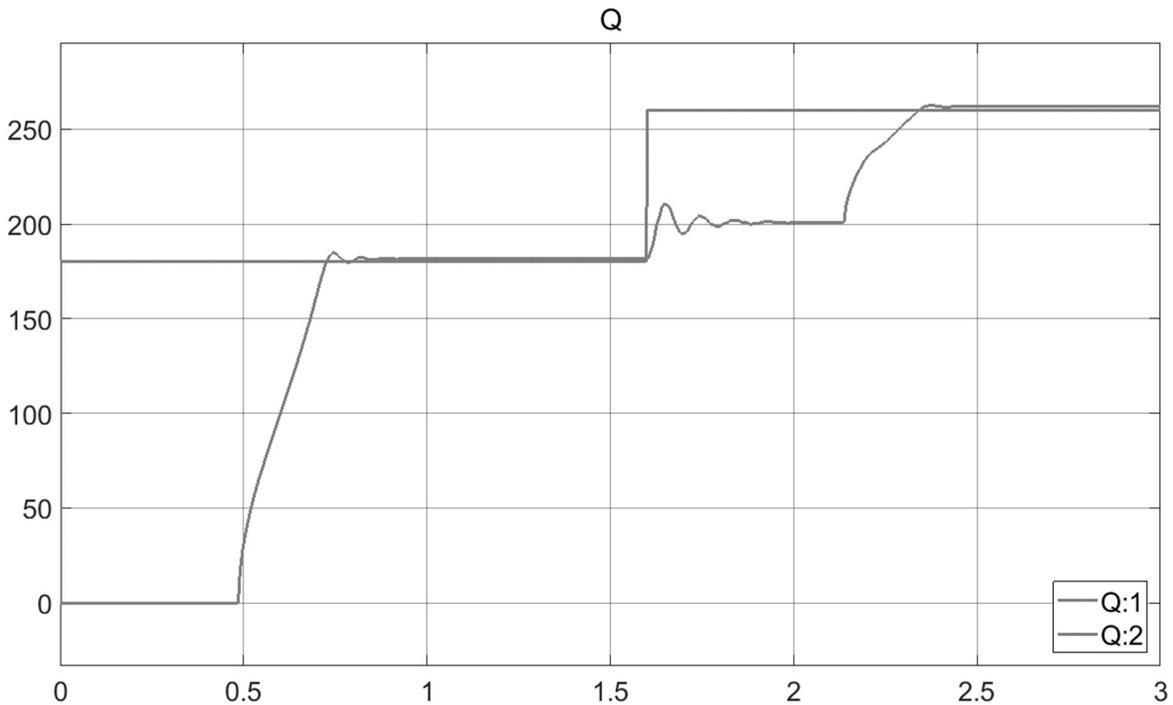


Рис. 3. Переходный процесс по расходу воды

Результаты работы системы управления активным выпрямителем напряжения (рис. 4) иллюстрируют стабильное поддержание заданного постоянного напряжения. Синусоиды напряжения и тока на входе дросселя совпадают по фазе, что означает работу системы с коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 1$ . Управление инвертором обеспечивает эффективную работу асинхронного двигателя с синусоидальными токами фаз как на номинальной, так и на пониженной частоте.

Технико-экономическое обоснование применения ЧРП, выполненное по методике из [2], показывает, что внедрение ЧРП обеспечивает экономию 11% электроэнергии, расходуемой на перекачку воды; снижение расхода чистой воды на 5,6% вследствие стабилизации давления в водопроводной сети и соответственно уменьшения утечек и нерациональных расходов воды; сокращение сброса сточных вод в канализацию на 5%. Регулируемый электропривод многоагрегатных насосных установок способствует уменьшению строительных

объемов зданий насосных станций на 15–20% в результате укрупнения единичной мощности насосных агрегатов и соответственно уменьшения их количества. Снижается износ электродвигателей, насосов и трубопроводов, вероятность аварий.

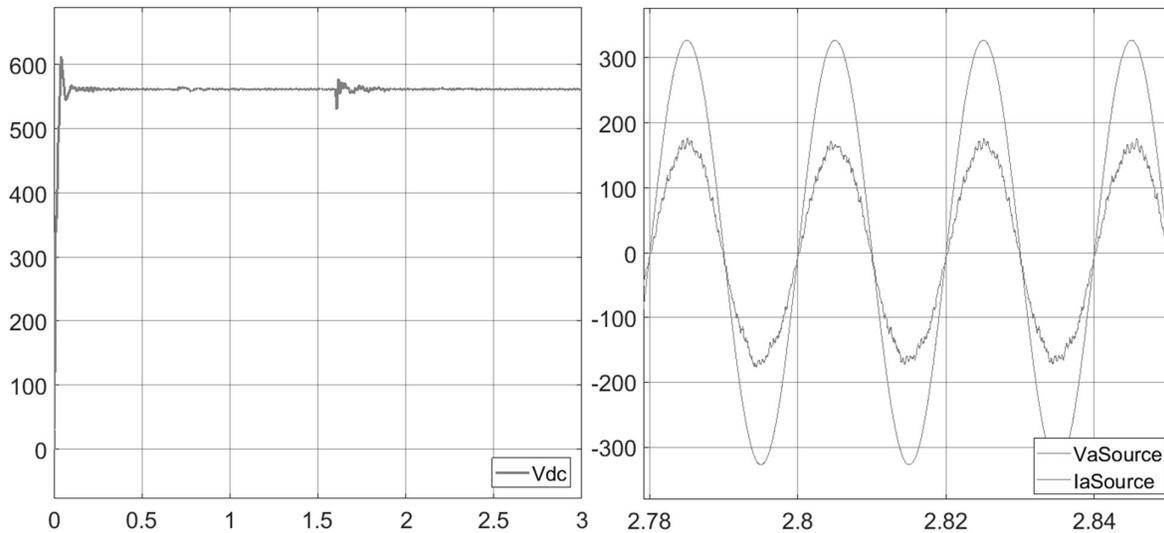


Рис. 4. Напряжение ЗПТ и синусоиды напряжения и тока фазы А источника

Рассчитано, что предлагаемая энергосберегающая многодвигательная система частотно-регулируемого привода насосов в ценах на начало 2022 г. на 1 кВт·ч электроэнергии, 1 м<sup>3</sup> подаваемой воды, электрооборудование компании «Schneider Electric» серии *Altivar ATV990 MultiDrive* окупается за 1 год.

### Выводы

1. Анализ вариантов построения многодвигательных электромеханических систем асинхронного электропривода насосов показывает, что наибольшими преимуществами обладает схема с индивидуальным регулированием частоты вращения каждого двигателя.

2. Питание нескольких автономных инверторов многоинверторного преобразователя частоты от одного активного выпрямителя позволяет обеспечить регламентированное качество электроэнергии: синусоидальную форму напряжения сети электроснабжения и потребление чисто активной мощности.

3. Разработанная система регулирования расхода воды изменяет параметры на входе скалярной системы управления электроприводами в режиме реального времени, что гарантирует устойчивую и надежную работу центробежных насосов без перерегулирования, со временем регулирования 0,7 с и максимальной ошибкой регулирования расхода воды 0,6 м<sup>3</sup>/ч.

4. Предлагаемое решение по внедрению частотно-регулируемого привода технологической установки подачи воды на теплоэлектростанции технологически и экономически оправдано, так как данная система ежегодно экономит 11% электроэнергии, 5,6% чистой воды, сокращает объем сточных вод на 5%.

## Библиографический список

1. Сербин, Ю. В., Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования. / А. А. Прокопов, В. П. Бугров – Информационный бюллетень ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР "АРТ". – 2007. – №2. – С. 57-65. URL: <http://www.ic-art.ru/Pdf/1.1.%20Параллельная%20работа%20насосных%20агрегатов.pdf> (дата обращения: 13.12.2021).
2. **Лезнов, Б.С.** Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. / Б.С. Лезнов – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с., ил.
3. **Иванова, В.Р.** Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах / В.Р. Иванова, И.Н. Киселев // Известия высших учебных заведений. – ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2019. – Т. 21. – №5. – С. 59-70. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.
4. **Поликашов, С. А.** Преобразователь частоты многодвигательного электропривода с активной коррекцией коэффициента мощности и энергосберегающей системой управления / С. А. Поликашов, Б. Ю. Васильев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – №4 (65). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preobrazovatel-chastoty-mnogodvigatel'nogo-elektroprivoda-s-aktivnoy-korreksiyey-koeffitsienta-moschnosti-i-energoberegayuschey> (дата обращения: 03.11.2021).
5. **Козлов, М. Д.** Векторное управление активным выпрямителем напряжения // Молодой ученый. – 2016. – № 9 (113). – С. 184-189. – URL: <https://moluch.ru/archive/113/29440/> (дата обращения: 03.11.2021).
6. Wang Y.; Zhang H.; Han Z.; Ni X. Optimization Design of Centrifugal Pump Flow Control System Based on Adaptive Control // Processes. – 2021. – Т. 9. – № 9. – С. 1538. doi: 10.3390/pr9091538

V.V. Dmitrieva, D.V. Dzyuin

**ANALYSIS, MODELING AND SYNTHESIS OF CONTROL  
OF A MULTI-ENGINE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF A  
TECHNOLOGICAL WATER SUPPLY UNIT FOR A THERMAL POWER  
PLANT**

National University of Oil and Gas «Gubkin University»

**Abstract:** In this paper, a control system for a multi-engine electromechanical system of a technological water supply unit for a thermal power plant with frequency-controlled centrifugal pump drives is developed in order to minimize the loss of water and electricity. In *MATLAB/Simulink* a computer model of the multi-inverter frequency converter circuit has been synthesized, the process of automatic regulation of water flow has been simulated, a sinusoidal voltage waveform and unity power factor of the power supply network have been provided.

**Key words:** thermal power plant, multi-engine electromechanical system, frequency-controlled electric drive, centrifugal pump, technological water supply unit, automatic control system, *MATLAB/Simulink*.

**References**

- [1] Serbin Yu. V., Prokopov A. A., Bugrov V. P. Parallel operation of pumping units using frequency control technology. - Newsletter ENGINEERING CENTER "ART". - 2007. - No.2. - PP. 57-65. URL: <http://www.ic-art.ru/Pdf/1.1.%20Параллельная%20работа%20насосных%20агрегатов.pdf> (accessed: 13.12.2021).
- [2] Leznov B. S. Frequency-controlled electric drive of pumping units. - M.: Mashinostroenie, 2013. - 176 p., ill.
- [3] Ivanova V. R., Kiselev I. N. Frequency-controlled electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrotechnical complexes // Izvestia of higher educational institutions. – ENERGY PROBLEMS. – 2019. – T. 21. – No. 5. – P. 59-70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.
- [4] Polikashov S. A., Vasiliev B. Yu. Frequency converter of a multi-motor electric drive with active power factor correction and energy-saving control system // Bulletin of Cherepovets State University. – 2015. – №4 (65). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preobrazovatel-chastoty-mnogodvigatel'nogo-elektroprivoda-s-aktivnoy-korreksiey-koeffitsienta-moschnosti-i-energoberegayuschey> (accessed: 03.11.2021).
- [5] Kozlov, M. D. Vector control of an active voltage rectifier / M. D. Kozlov. - Text: direct // Young scientist. – 2016. – № 9 (113). – Pp. 184-189. - URL: <https://moluch.ru/archive/113/29440/> (accessed: 03.11.2021).
- [6] Wang, Y.; Zhang, H.; Han, Z.; Ni, X. Optimization design of the centrifugal pump flow control system based on adaptive control // Processes. - 2021. - Vol. 9. - No. 9. - p. 1538. DOI: 10.3390/pr9091538

Д. М. Кочеганов<sup>1</sup>, А. В. Серебряков<sup>1</sup>, А. С. Стеклов<sup>2</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ТАКАГИ-СУГЕНО-КАНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
АО «ОКБМ Африкантов»<sup>2</sup>

**Аннотация:** В статье описывается модель системы мониторинга условий работы фотоэлектрических преобразователей с применением аппарата нечеткой логики. Имитационная модель системы построена в пакете Matlab Simulink с использованием расширения Fuzzy Logic Toolbox. В статье приводится структурная схема системы мониторинга, функции принадлежности входных и выходных переменных, а также поверхности нечеткого вывода. Построенная модель может быть использована в качестве функционального блока Matlab Simulink при моделировании работы электротехнических установок, а также для разработки и проверки работоспособности систем поддержки принятия решений операторов электротехнических установок.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, мониторинг технического состояния, нечеткая логика, фотоэлектрический преобразователь.

Негативное влияние на глобальную экологическую обстановку, а также логистические трудности, сопряженные с использованием ископаемого топлива, приводят к тому, что возобновляемые источники энергии становятся конкурентоспособным вариантом электроснабжения потребителей России, в том числе, находящихся вне зоны централизованного электроснабжения [1]. Солнечная радиация является одним из наиболее широко используемых для выработки электроэнергии возобновляемых ресурсов, доля которого в энергетическом балансе России в последние годы растет благодаря сооружению новых солнечных электростанций. На данный момент одним из наиболее масштабных проектов солнечной энергетики является электростанция мощностью 135 МВт в Дербентском районе, строительство которой планируется завершить к 2025 году [2].

Солнечная электростанция, как и любой другой современный энергетический комплекс, должна иметь интеллектуальную систему мониторинга технического состояния и диагностики для сокращения штата обслуживающего персонала и уменьшения расходов на проведение планового технического обслуживания. В рамках данной работы была построена имитационная модель системы мониторинга условий работы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), предназначенная для оказания помощи оператору энергетического комплекса в принятии решений при оценке технического состояния оборудования и необходимости проведения технического обслуживания и ремонта.

Задачей системы является формирование оценки условий работы фотоэлектрических преобразователей, на основе информации о значимых для работы оборудования физических параметрах, руководствуясь правилами, сформированными экспертами по эксплуатации и ремонту данного оборудования [3].

Поскольку в настоящее время нет возможности достоверно оценить степень старения и деградации материалов и внутренней структуры элементов электротехнического оборудования без вывода из технологического процесса, решение о проведении технического обслуживания и превентивной замены устаревшего оборудования принимается в ситуации неполноты и несовершенства исходных данных. По этой причине важным является мониторинг условий работы конкретного устройства, так как при нарушении условий нормальной эксплуатации отказ устройства может наступить раньше предсказываемого срока службы. Для решения подобных задач эффективным подходом является применение аппарата нечеткой логики. Данный подход позволяет расширить функционал методов классической логики при помощи наборов правил, являющихся формализованным опытом экспертного сообщества, что позволяет построить систему, оказывающую поддержку при принятии управленческих решений даже при неполноте исходных данных.

На рис. 1 приводится структура системы. Для создания модели применен программный пакет Matlab Simulink с расширением Fuzzy Logic Toolbox [4, 5].



**Рис. 1. Структурная схема системы**

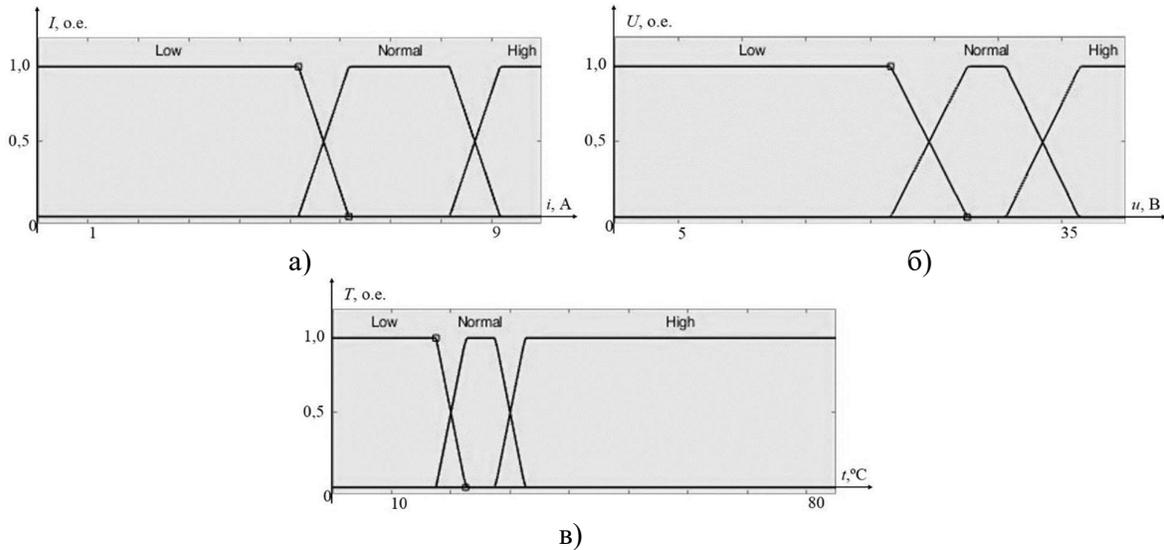
В рамках данной работы в качестве примера оборудования рассматривается фотоэлектрический преобразователь СНН250-60Р [6] с параметрами, приведенными в табл. 1.

**Таблица 1**

**Параметры фотоэлектрического преобразователя**

Электрическая мощность при стандартных условиях, Вт	250
Напряжение разомкнутой цепи, В	36,3
Ток короткого замыкания, А	8,71
Напряжение в точке максимальной мощности, В	30,6
Ток в точке максимальной мощности, А	8,17
Температура стандартных тестовых условий, °С	25

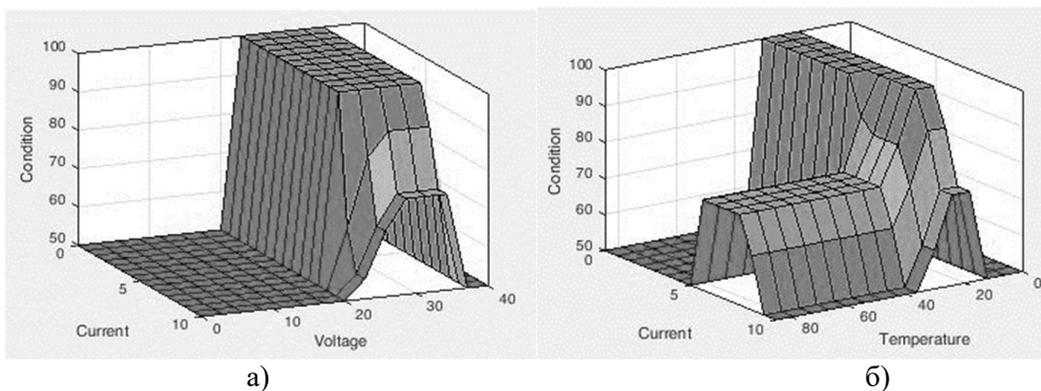
В качестве диагностических признаков были использованы ток, напряжение и температура фотоэлектрического преобразователя. Выходным сигналом является оценка условий работы ФЭП, формируемая системой нечеткого вывода по принципу Такаги-Сугено-Канга [7]. На рис. 2 приведен вид функций принадлежности используемых диагностических признаков, построенных с учетом характеристик выбранного ФЭП. Для входных переменных системы оценки используются термины «Низкий» («Low»), «Нормальный» («Normal») и «Высокий» («High») [8, 9].



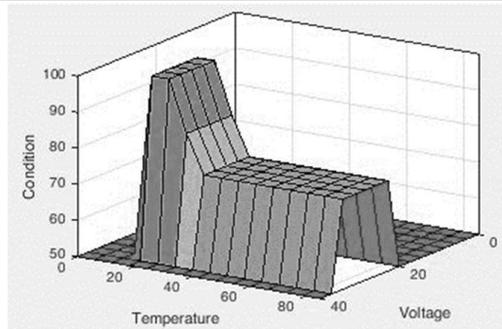
**Рис. 2. Функции принадлежности переменных**  
*a* – ток ФЭП; *б* – напряжение ФЭП; *в* – температура ФЭП

Выходная переменная системы «Оценка условий работы» может принимать значения от 0 до 100 условных единиц, при этом значение 100 соответствует термину «Нормальная работа», значение 75 - «Предупреждение», значение 50 – «Тревога».

Для визуальной оценки взаимосвязей между входными сигналами системы и выходной переменной можно воспользоваться поверхностями нечеткого вывода системы, представленными на рис. 3.



**Рис. 3. Поверхности нечеткого вывода системы (начало)**



в)

**Рис. 3. Поверхности нечеткого вывода системы (окончание):**

а – ток ФЭП и напряжение ФЭП; б – температура ФЭП и ток ФЭП; в – температура ФЭП и напряжение ФЭП

### Выводы

Разработанная система оценки условий работы фотоэлектрических преобразователей может быть использована для поддержки оператора при анализе диагностических данных электротехнического комплекса и принятии решений о проведении внепланового технического обслуживания и превентивной замены оборудования. Принципы нечеткой логики, используемые в системе, позволяют формализовать опыт экспертов в данной области, а также применить к оценке, полученной в результате работы системы, процедуры статистической обработки и прогнозирования с целью предупреждения аварийных ситуаций.

### Библиографический список

1. Информационный обзор рынка ВИЭ в России (октябрь – декабрь 2021 г.) [Электронный ресурс]. – URL: <https://ireda.ru/information-obzor-oktobor-dekabr-2021> (дата обращения 10.03.2022).
2. Дербент, сетевое издание: самая крупная солнечная электростанция будет у нас - в Дагестане [Электронный ресурс]. – URL: <http://derbent.ru/2022/01/11/samaya-krupnaya-solnechnaya-elektrostantsiya-budet-u-nas-v-dagestane/> (дата обращения 21.03.2022).
3. **Стеклов, А.С.** Применение экспертных систем для обработки результатов диагностирования / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Научный альманах – 2015. 10–3. – Тамбов, 2015. – С. 247–250.
4. Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://person.dibris.unige.it/masulli-francesco/lectures/ML-CI/lectures/MATLAB%20fuzzy%20toolbox.pdf> (дата обращения 21.03.2022).
5. Fuzzy Logic Toolbox [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy> (дата обращения 21.03.2022).
6. High Performance 60 Cell Poly crystalline 156x156mm Solar Photovoltaic Photovoltaic Module [Электронный ресурс]. – URL: <https://westech-pv.com/download/250Watt.pdf> (дата обращения 01.03.2022).
7. Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html#:~:text=to%20mathematical%20analysis-,Mamdani%20Fuzzy%20Inference%20Systems,rule%20is%20a%20fuzzy%20set.> (дата обращения 20.02.2022).
8. Кочеганов, Д.М. Применение аппарата нечеткой логики для оценки качества функционирования синхронного генератора / Д.М. Кочеганов, А.В. Серебряков // Энергоэффективность

и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019) сборник трудов, 2019, С. 186 – 189.

9. **Кочеганов, Д.М.** Имитационная модель солнечно-ветряной электростанции с нейро-нечеткой системой прогнозирования технического состояния / Д.М. Кочеганов, А.В. Серебряков, А.С. Стеклов // Электротехнические системы и комплексы. 2021. №2(51). С. 68-75.

D. M. Kocheganov<sup>1</sup>, A. V. Serebryakov<sup>1</sup>, A. S. Steklov<sup>2</sup>

## APPLICATION OF THE TAKAGI-SUGENO-KANG SYSTEM FOR EVALUATION OF THE OPERATING CONDITION OF PHOTOVOLTAIC CELLS

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia <sup>1</sup>  
JSC “Afrikantov OKBM” Nizhny Novgorod, Russia <sup>2</sup>

**Abstract:** The article describes a model of a system for monitoring the operating conditions of photovoltaic converters using a fuzzy logic apparatus. The simulation model of the system was designed in the Matlab Simulink package using the Fuzzy Logic Toolbox extension. The article provides a block diagram of the monitoring system, membership functions of input and output variables, as well as fuzzy inference surfaces. The constructed model can be used as a Matlab Simulink functional block when simulating the operation of electrical installations, as well as for developing and testing the operability of decision support systems for operators of electrical installations.

**Key words:** simulation modeling, technical condition monitoring, fuzzy logic, photovoltaic cells.

### References

- [1] Informacionnyj obzor rynka VIE v Rossii (oktyabr' – dekabr' 2021 g.) [Information review of the renewable energy market in Russia (October - December 2021)] [Electronic resource]. – URL: <https://rreda.ru/information-obzor-october-december-2021> (date of access 10.03.2022).
- [2] Derbent, setevoe izdanie: samaya krupnaya solnechnaya elektrostanciya budet u nas - v Dagestane [Derbent, online publication: we will have the largest solar power plant - in Dagestan] [Electronic resource]. – URL: <http://derbend.ru/2022/01/11/samaya-krupnaya-solnechnaya-elektrostanciya-budet-u-nas-v-dagestane/> (date of access 21.03.2022). (In Russian).
- [3] A.S. Steklov, V.G. Titov, A.V. Serebryakov, “Primenenie ekspertnyh sistem dlya obrabotki rezul'tatov diagnostirovaniya [Application of expert systems for processing diagnostic results]” // Scientific almanac – 2015. 10–3. – Tambov, 2015. – pp. 247–250. (In Russian).
- [4] Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide [Electronic resource]. – URL: <https://person.dibris.unige.it/masulli-francesco/lectures/ML-CI/lectures/MATLAB%20fuzzy%20toolbox.pdf> (дата обращения 21.03.2022).
- [5] Fuzzy Logic Toolbox [Electronic resource]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy> (date of access 21.03.2022).
- [6] High Performance 60 Cell Poly crystalline 156x156mm Solar Photovoltaic Photovoltaic Module [Electronic resource]. – URL: <https://westech-pv.com/download/250Watt.pdf> (date of access 01.03.2022).
- [7] Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems [Electronic resource]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html#:~:text=to%20mathematical%20analysis-,Mamdani%20Fuzzy%20Inference%20Systems,rule%20is%20a%20fuzzy%20set.> (date of access 20.02.2022).
- [8] D.M. Kocheganov, A.V. Serebryakov, A.S. Steklov, “Imitacionnaya model' solnechno-vetryanoj elektrostancii s nejro-nechetkoj sistemoj prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya [Simulation Model of a Wind-Solar Power Plant with a Technical Condition Neuro-Fuzzy Forecasting System]” Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 68-75. (In Russian).

Е.С. Ребенков, Н.Д. Майорова

**ФОРМУЛА ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ СКОРОСТЕЙ  
МНОГОМАССОВОГО МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

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

**Аннотация:** Получена формула передаточной функции скоростей масс в электроприводе с частотнорегулируемыми асинхронными двигателями, подключенными, в общем случае, к каждой массе. На примере двухдвигательного частотного электропривода конвейера, имеющего четыре сосредоточенные массы, показано применение разработанной формулы.

**Ключевые слова:** формула передаточной функции, частотный электропривод, регулятор системы управления, демпфирование колебаний скоростей.

В многомассовых электроприводах, где в общем случае каждая масса имеет с другими массами упруго-вязкую механическую связь, возникают колебательные переходные процессы скоростей элементов масс, приводящие к снижению надежности механизма. Демпфирование колебаний предложено осуществлять введением регуляторов в систему управления частотнорегулируемого электропривода. В общем случае частотно-управляемый асинхронный электродвигатель может быть подключен к каждой массе многомассового привода.

Для определения переходных функций скоростей масс привода разработана формула передаточной функции скоростей по управляющему воздействию системы «преобразователь частоты–асинхронный двигатель» (ПЧ-АД). Передаточная функция *i*-той скорости масс привода получена в операторной форме в виде отношения матриц  $R_n(s)$  и  $X(s)$ , составленных по параметрам привода [1]:

$$\omega_i(s) = u_v(s) \cdot R_n(s) / X(s), \tag{1}$$

где  $u_v(s)$  – напряжение управления системами «ПЧ-АД» с равными параметрами, а матрица  $R_n(s)$  определяется по уравнению:

$$R_n(s) = [\sum_{j=1}^{j=n} R_j(s)] / n. \tag{2}$$

Порядок матриц равен числу *n* элементарных масс привода [2].

Матрицы  $X(s)$  и  $R_j(s)$  имеют квадратную форму  $n \times n$ :

$$X(s) = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & \dots & V_{1n} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & \dots & V_{2n} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & \dots & V_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{n1} & V_{n2} & V_{n3} & \dots & V_{nn} \end{bmatrix}; \quad R_j(s) = \begin{bmatrix} V_{11} & 0 & V_{13} & \dots & V_{1n} \\ V_{21} & 0 & V_{23} & \dots & V_{2n} \\ V_{31} & s & V_{33} & \dots & V_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{n1} & 0 & V_{n3} & \dots & V_{nn} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Компоненты матриц  $V_{ij}$  имеют индексы:  $i$  – номер скорости массы,  $j$  – номер системы «ПЧ-АД» привода. Матрицы дополнительно к параметрам упруго-вязких связей включают параметры системы «ПЧ-АД». При  $i \neq j$ , компонента матрицы имеет вид:

$$V_{ij} = -(c_{mf} + b_{mf}s) \cdot N_j(s) / U_j(s), \quad (4)$$

если  $i=j$ , то

$$V_{ij} = \{N_j(s)[J_i s^2 + \sum_{i,j=1}^{i,j=k} (c_{ij} + b_{ij}s)] + F_j(s)s\} / U_j(s), \quad (5)$$

где  $J_i$  – приведенный момент инерций  $i$ -той массы,  $c_{mf}$  и  $b_{mf}$  – соответственно жесткость и вязкость упругой связи между  $m$ -той и  $f$ -той массами привода, операторные полиномы  $N_j(s)$ ,  $U_j(s)$ ,  $F_j(s)$  включают параметры частотно-регулируемой системы «ПЧ-АД», подключенной к  $k$ -той массе, и равные соответственно:

$$N_j(s) = (T_{1j}s + 1)(T_{2j}s + 1); \quad (6)$$

$$F_j(s) = \beta_j(T_{1j}s + 1); \quad (7)$$

$$U_j(s) = Kn_j \beta_j, \quad (8)$$

где  $T_{1j}$  и  $T_{2j}$  – постоянные времени соответственно преобразователя и двигателя;  $\beta_j$  и  $Kn_j$  – соответственно жесткость механической характеристики двигателя и коэффициент усиления преобразователя.

Вращающий момент двигателя  $M_j$ , напряжение управления преобразователя частоты  $u_j$  и скорость  $\omega_i$  асинхронного двигателя связаны операторным уравнением [2]:

$$u_j(s) U_j(s) = \omega_i(s) F_j(s) + M_j(s) N_j(s). \quad (9)$$

Полученная формула применена для расчета скоростей масс в электроприводе конвейера с двумя частотноуправляемыми двигателями (рис.1). Двигатели подключены к приводным барабанам массой  $J_1$  и  $J_3$ . Грузёная ветвь конвейера приведенной массой  $J_2$ , холостая ветвь  $J_4$  и приводные барабаны соединены упруго-вязким тяговым органом. Электропривод конвейера имеет следующие приведенные параметры:  $J_1 = J_3 = 21,56$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_2 = 32$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_4 = 8,768$  кг·м<sup>2</sup>,  $c_{12} = c_{23} = c_{34} = c_{41} = 60$  Н·м,  $b_{12} = b_{23} = b_{34} = b_{41} = 0,2$  Н·с/м,  $Kn_1 = Kn_3 = 1$ ,  $\beta_1 = \beta_3 = 146,8$  Н·с,  $T_{11} = T_{13} = 0,02$  с,  $T_{21} = T_{23} = 0,0127$  с.

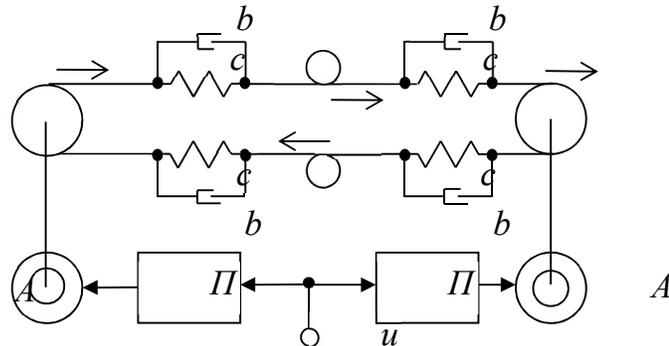


Рис. 1. Структурная схема электропривода конвейера

Значения скоростей масс привода получены в виде операторных изображений при воздействии на привод управляющего сигнала  $u_y(s)$  в виде ступенчатой функции Хевисайда:

$$\omega_1(s) = u_y(s) \frac{R_1(s)}{X(s)} = (1268,35s + 12,6835s^2 + 658,824s^3 + 4,39193s^4 + 102,139s^5 + 0,340439s^6 + 4,44013s^7) / X(s); \quad (10)$$

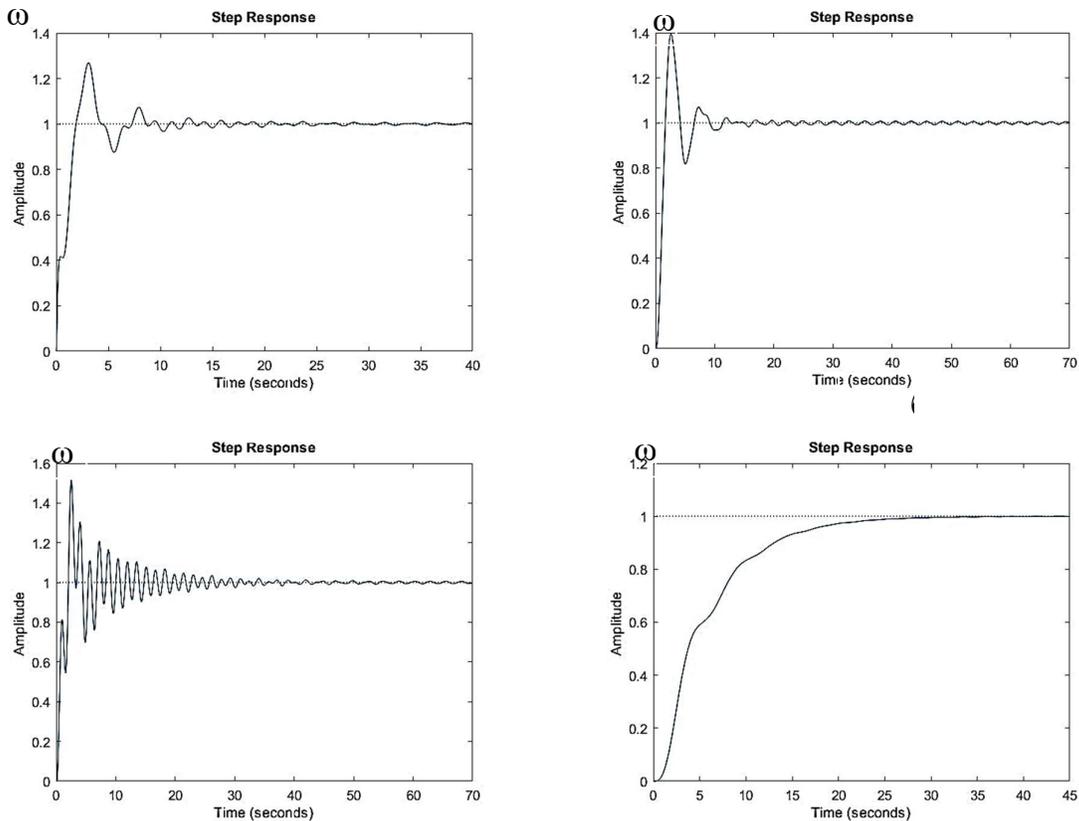
$$\omega_2(s) = u_y(s) \frac{R_2(s)}{X(s)} = (1268,35s + 12,6835s^2 + 320,597s^3 + 2,13708s^4 + 16,654s^5 + 0,0555016s^6) / X(s); \quad (11)$$

$$\omega_3(s) = u_y(s) \frac{R_3(s)}{X(s)} = (1268,35s + 12,6835s^2 + 658,824s^3 + 4,39193s^4 + 102,139s^5 + 0,340439s^6 + 4,44013s^7) / X(s); \quad (12)$$

$$\omega_4(s) = u_y(s) \frac{R_4(s)}{X(s)} = (1268,35s + 12,6835s^2 + 566,15s^3 + 3,7741s^4 + 60,7744s^5 + 0,202561s^6) / X(s); \quad (13)$$

$$X(s) = 1268,35s + 762,843s^2 + 1133,36s^3 + 327,03s^4 + 216,125s^5 + 42,1685s^6 + 10,237s^7 + 1,49534s^8 + 0,0426793s^9 + 0,00033127s^{10}. \quad (14)$$

Оригиналы операторных функций скоростей масс привода показаны на рисунке 2. а, б, в.



**Рис. 2. Переходные функции скоростей масс привода:**  
 а, б, в – привод без регулятора; з – привод с регулятором

Для демпфирования колебаний скоростей масс в приводе конвейера на вход системы управления преобразователями частоты подключен

пропорционально-интегральный регулятор с отрицательной обратной связью по скорости нагруженной ветви конвейера  $\omega_{2p}$  (рис.3) [3].

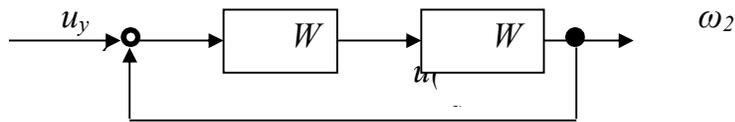


Рис. 3. Структурная схема электропривода конвейера  $W_0$  и ПИ-регулятора  $W_p$  с отрицательной обратной связью.

ПИ-регулятор получен в результате расчета в виде:  $W_p(s) = 0,16656/s$ . Передаточная функция скорости  $\omega_{2p}(s)$  по управляющему сигналу  $u_y(s)$  в приводе с регулятором получена в операторной форме [4]:

$$W(s) = \frac{\omega_{2p}(s)}{u_y(s)} = (211,257s + 2,11257s^2 + 53,3987s^3 + 0,355952s^4 + 2,7739s^5 + 0,00924434s^6) / (211,257s + 1270,046s^2 + 816,242s^3 + 1133,71s^4 + 329,804s^5 + 216,134s^6 + 42,1685s^7 + 10,237s^8 + 1,49534s^9 + 0,0426793s^{10} + 0,00033127s^{11}) \quad (15)$$

Переходная функция скорости привода с регулятором  $\omega_{2p}$  представлена на рис. 2, г, она имеет неколебательный, аperiodический характер [5]. Исследование в полученной модели привода конвейера проведено с применением интерактивного программного пакета Simulink-Matlab.

#### Библиографический список

1. **Ребенков, Е.С.** Цифровой регулятор демпфирования упругих колебаний в многомассовом электроприводе / Е.С. Ребенков // ГИАБ №2.-М.: Изд-во МГГУ, 2014, С.330-336.
2. **Ключев, В.И.** Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев.- М.: Энергоатомиздат, 1985.-560с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под.ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.- 616с.
4. **Чикуров, Н.Г.** Моделирование систем и процессов: Учебное пособие / Н.Г. Чикуров - М.:РИОР: ИНФА-М, 2013.- 398с.
5. **Ким, Д.П.** Теория автоматического управления. Т2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы – 2-е изд., испр. и доп/ Д.П. Ким- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.-440с.

**E.S. Rebenkov, N.D. Mayorova**

**THE FORMULA OF THE TRANSFER FUNCTION OF THE SPEEDS OF A MULTI-MASS MULTI-MOTOR FREQUENCY ELECTRIC DRIVE**

Novomoskovskiy Institute (branch) D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

**Abstract:** The formula of the transfer function of mass velocities in an electric drive with frequency-controlled asynchronous motors connected, in general, to each mass is obtained. Using the example of a two-motor frequency electric drive of a conveyor having four concentrated masses, the application of the developed formula is shown.

**Keywords:** transfer function formula, frequency electric drive, control system controller, damping of speed fluctuations.

**References**

- [1] Rebenkov E.S. Digital damping regulator of elastic vibrations in a multi-mass electric drive. //GIAB No.2.-M.: Publishing House of Moscow State University, 2014, pp.330-336.
- [2] Klyuchev V.I. Theory of electric drive: Textbook for universities. - M.: Energoatomizdat, 1985.-560s.
- [3] Methods of classical and modern theory of automatic control: Textbook in 5 tt.; 2-e ed., re-print. and additional T.Z: Synthesis of regulators of automatic control systems / Edited by K.A. Pupkov and N.D. Egupov. – M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2004.- 616s.
- [4] Chikurov N.G. Modeling of systems and processes: Textbook. - M.:RIOR: INFA-M, 2013.- 398s.
- [5] Kim D.P. Theory of automatic control. T2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems – 2nd ed., ispr. and add.- M.: FIZMATLIT, 2007.-440s.

**К.П. Слядзевская, О.А. Мотина**

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА СКОРОСТИ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ «ШИП – ДПТ НВ»  
В СООТВЕТСТВИИ С НОРМИРОВАННОЙ СТАНДАРТНОЙ  
ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ**

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья посвящена синтезу регулятора скорости электропривода по схеме «широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения» по нормированной стандартной передаточной функции разомкнутой системы. Оптимизация внутреннего контура тока произведена по критерию минимизации суммарной квадратичной ошибки с учетом внутренней обратной связи по ЭДС двигателя.

**Ключевые слова:** передаточная функция, регулятор.

Применение микропроцессорной системы управления скорости ШИП – ДПТ НВ позволяет реализовать практически любые критерии настройки контуров регулирования для обеспечения заданных показателей качества. Поэтому разработка регулятора скорости, обеспечивающего отработку скачка задания в соответствии с нормированной передаточной функцией разомкнутой системы, является актуальной темой для исследования.

Методика синтеза цифрового регулятора по желаемой передаточной функции замкнутой системы изложена в [1].

Передаточная функция объекта контура скорости при настройке контура тока на критерий минимизации квадратичной ошибки имеет вид:

$$W_{\text{окс}}(z) = \frac{k \frac{p_{1\omega}}{p_{1y}} \left( z + \frac{p_{2\omega}}{p_{1\omega}} \right)}{z(z-1)}, \quad (1)$$

где  $p_{1y} = \frac{1}{L_e} \cdot \frac{(z_1 - z_2)}{(\lambda_1 - \lambda_2)}$ ;  $z = \exp(p \cdot T_0)$ ;

$\lambda_1, \lambda_2$  - собственные числа матрицы ( $|\lambda \cdot E - A| = 0$ );

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_e} & -\frac{c_e \cdot \Phi_n}{L_e} \\ \frac{c_e \cdot \Phi_n}{J} & 0 \end{bmatrix};$$

$z_1 = \exp(\lambda_1 \cdot T_0)$ ,  $z_2 = \exp(\lambda_2 \cdot T_0)$ ;

$$p_{1\omega} = \frac{1}{L_e} \cdot \frac{c_e \cdot \Phi_H}{J} \cdot \frac{-\lambda_2 \cdot (1 - z_1) + \lambda_1 \cdot (1 - z_2)}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2};$$

$$p_{2\omega} = \frac{1}{L_e} \cdot \frac{c_e \cdot \Phi_H}{J} \cdot \frac{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot z_1 \cdot z_2 + \lambda_2 \cdot z_2 - \lambda_1 \cdot z_1}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2};$$

$T_0$  - интервал дискретности  $T_0 = 0.001$  с;

$$k = \frac{k_\omega}{k_{iy}};$$

$k_{iy}$  - коэффициент обратной связи по току якоря;

$k_\omega$  - коэффициент обратной связи по скорости.

Нормированная стандартная передаточная функция разомкнутого системы для первого порядка астатизма и объекта регулирования второго порядка [2] имеет вид:

$$W_{рн1}(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 1.4\omega_0 p} \tag{2}$$

Изображение переходной характеристики замкнутого контура скорости

$$H_{зн1}(p) = \frac{\omega_0^2}{p(p^2 + 1.4\omega_0 p + \omega_0^2)} \tag{3}$$

где  $\omega_0 = \frac{7}{t_p}$ ;

$t_p = 2T_0 \cdot 7$ .

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{зкн1}(z) = \frac{q_4 z + q_5}{z^2 + q_1 z + q_2} \tag{4}$$

где  $\alpha = 0.7\omega_0$ ;  $\beta = \sqrt{0.51}\omega_0$ ;  $d = e^{-\alpha T_0}$ ;

$q_1 = -2d \cos(\beta T_0)$ ;  $q_2 = d^2$ ;

$q_4 = q_1 + 1 + d \cos(\beta T_0) - \frac{\alpha}{\beta} d \sin(\beta T_0)$ ;  $q_5 = q_2 - d \cos(\beta T_0) + \frac{\alpha}{\beta} d \sin(\beta T_0)$ .

Передаточная функция регулятора скорости, обеспечивающая нормированную стандартную передаточную функцию разомкнутой системы,

$$W_{рсн1}(z) = \frac{\frac{p_{1y}}{kp_{1\omega}} q_4 z^3 + \frac{p_{1y}}{kp_{1\omega}} (q_4 - q_5) z^2 + \frac{p_{1y}}{kp_{1\omega}} (-q_5) z}{z^3 + (b_x + q_6) z^2 + (q_6 b_x + q_7) z + q_7 b_x} \tag{5}$$

где  $b_x = \frac{p_{2\omega}}{p_{1\omega}}$ ;

$q_4 = q_1 - q_4$ ;  $q_7 = q_2 - q_5$ .

Соответствующий алгоритм регулирования скорости

$$U_{зт}[n] = -(b_x + q_6)U_{зт}[n - 1] - (q_6 b_x + q_7)U_{зт}[n - 2] - q_7 b_x U_{зт}[n - 3] + \frac{p_{1y}}{kp_{1\omega}} q_4 \delta\omega[n] + \frac{p_{1y}}{kp_{1\omega}} (q_4 - q_5) \delta\omega[n - 1] + \frac{p_{1y}}{kp_{1\omega}} (-q_5) \delta\omega[n - 2], \tag{6}$$

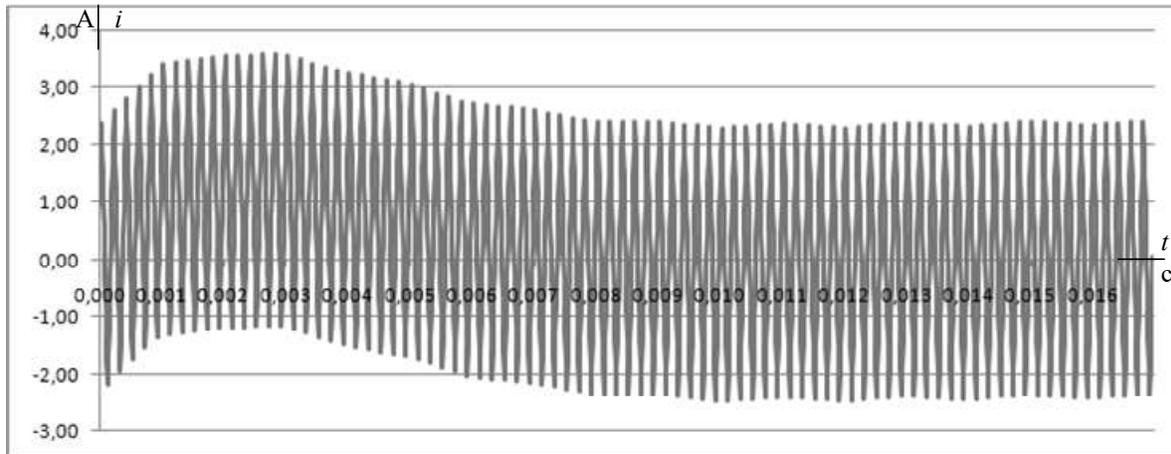
где  $\delta\omega = \omega_3 - k_\omega \omega$ .

В пакете MATLAB была создана модель МПСАР ШИП–ДПТ НВ. Моделирование проводилось для двигателя 2ПН132МУХЛ4 мощностью 7 кВт при скачке сигнала задания  $\omega_3=0.1 \text{ с}^{-1}$ , симметричном способе управления ШИП (частота пилы 5 кГц), интервале дискретности 0.001 с и  $M_c = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Полученные переходные процессы представлены на рис. 1.

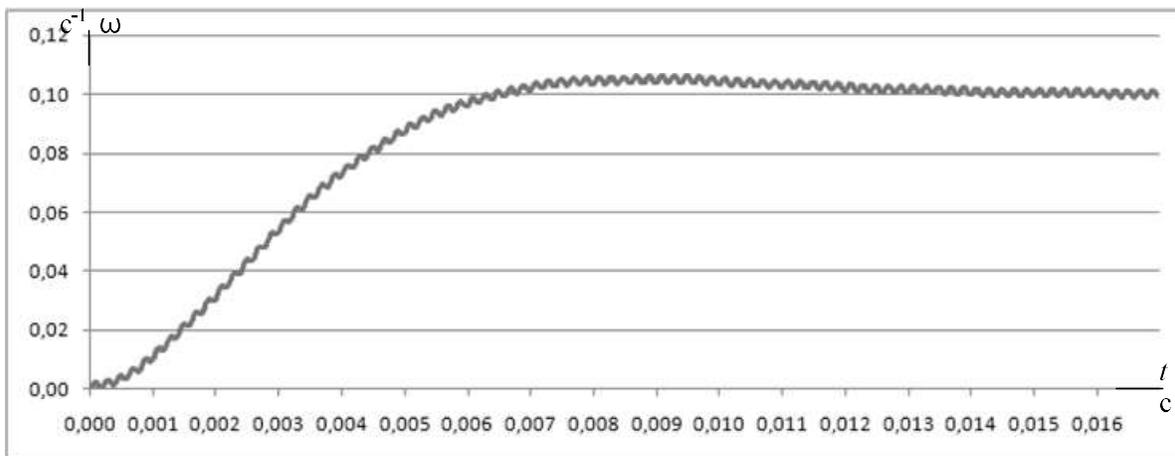
### Выводы

1. При оптимизации контура скорости МПСАР ШИП–ДПТ НВ на нормированную стандартную передаточную функцию разомкнутой системы обработка скачка задания происходит с перерегулированием в 5,325% за время 0.014 с (14 интервалами дискретности).

2. Алгоритм регулирования скорости, обеспечивающий нормированную стандартную передаточную функцию разомкнутой системы, при скачке задания имеет третий порядок.

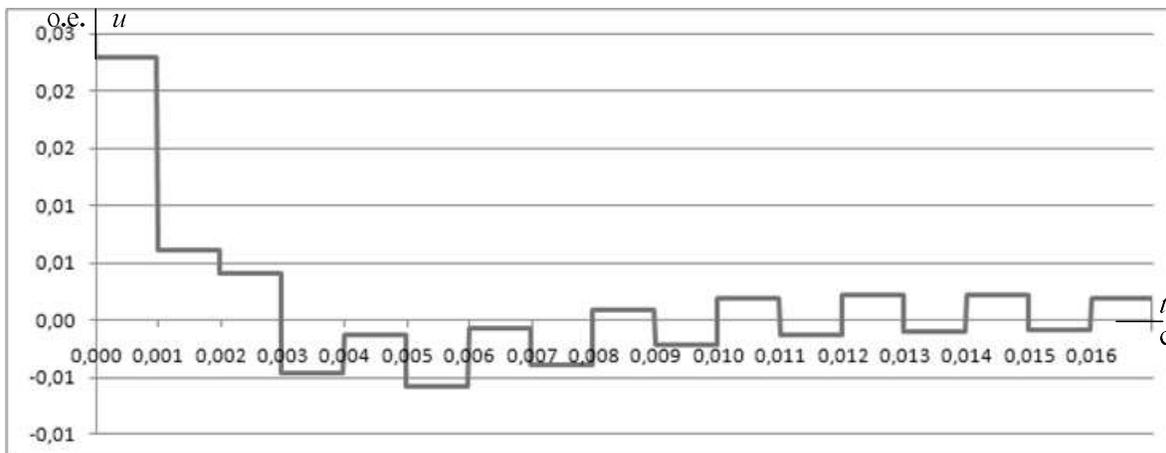


а)



б)

Рис. 1. Переходные процессы в контуре скорости МПСАР ШИП–ДПТ НВ (начало)



в)

**Рис. 1. Переходные процессы в контуре скорости  
МПСАР ШИП–ДПТ НВ (окончание):**

- a* – тока якоря в А от времени в с;
- б* – скорости в с<sup>-1</sup> от времени в с;
- в* – управляющего напряжения ШИП от времени в с

**Библиографический список**

1. **Слядзевская, К.П.** Синтез цифровых регуляторов для асинхронного частотного электропривода//Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики»: / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2015. – с. 83 – 87
2. **Бесекерский, В.А.** и др. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления /Под ред. В.А. Бесекерского. –М.: Наука, 1978. – 512 с.

---

**K.P. Slyadzevskaya, O.A. Motina**

**OPTIMIZATION OF THE SPEED CONTOUR ELECTRIC DRIVE  
ACCORDING TO THE SCHEME «PULSE-WIDTH CONVERTER-DC  
MOTOR OF INDEPENDENT EXCITATION» IN ACCORDANCE WITH  
THE NORMALIZED STANDARD TRANSFER FUNCTION OF AN OPEN  
SYSTEM**

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

**Abstract:** The article is devoted to the synthesis of the speed controller of the electric drive according to the scheme "pulse-width converter - DC motor of independent excitation" according to the normalized standard transfer function of an open system. The optimization of the internal current loop was performed according to the criterion of minimizing the total quadratic error, taking into account the internal feedback on the EMF of the motor.

**Keywords:** transfer function, controller.

**References**

- [1] K.P. Slyadzevskaya "Sintez cifrovih regulyatorov dlya asinhronnogo chastotnogo elektroprivoda"//Sbornik statey All-Russian Scientific and Technical Conference "Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]", 2015, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 83-87 (in Russian).
- [2] V.A. Besekerskiy Sbornik zadach po teorii avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya/Pod red. V.A. Besekerskogo. –M.: Nauka, 1978 (in Russian).

**В.В. Федотов, В.В. Рожков**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ВЕКТОРНОГО ЧАСТОТНО-ТОКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске

**Аннотация:** В статье рассмотрена реализация векторной системы управления следящим электроприводом. Предложен один из вариантов косвенного определения проекций вектора потокосцепления ротора на оси системы координат, вращающейся синхронно с полем ротора. Проверена эффективность предлагаемой методики в следящей системе с двумя каналами регулирования. Оптимизированная структура обеспечивает достаточную точность обработки заданной траектории и устойчивость при температурном изменении активных сопротивлений обмоток двигателя.

**Ключевые слова:** потокосцепление ротора, асинхронный электропривод, векторное управление, следящая система.

Следящие электроприводы получили широкое применение в современном промышленном производстве, например, для механизмов станков с ЧПУ или промышленных роботов (ПР) [1]. Большое разнообразие электрооборудования позволяет создавать следящие системы на основе электроприводов с различными типами двигателей. Чаще всего в настоящее время следящие электроприводы содержат в качестве объекта управления синхронную машину. Синхронный электродвигатель представляет собой сложный и дорогой электромеханический преобразователь, как правило, с возбуждением от постоянных магнитов из редкоземельных металлов. В качестве альтернативы несомненный интерес представляет создание следящих систем на базе относительно простых и дешевых асинхронных электродвигателей с обеспечением приводом необходимых требований по точности и устойчивости.

Для создания следящего электропривода на базе асинхронного двигателя, как правило, используется классическая векторная система управления [2] (по сути, представляющая собой систему последовательной коррекции координат электропривода) с добавленным внешним контуром регулирования положения. Такая система управления имеет два основных канала регулирования. Один из них – канал стабилизации потокосцепления, другой – канал регулирования электромагнитного момента, к которому и добавляется внешний 3-й контур регулирования положения. В системе используется замкнутая ШИМ (второго рода), работающая по рассогласованию задания токов в трехфазной системе координат  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и их реальных значений, снятых соответствующими датчиками. Разработанная компьютерная модель системы управления по описанной технологии с

силовой частью представлена на рис.1. Обработка трапецеидальной траектории задания, характерной для качательных степеней подвижности ПР, показана на рис.2.

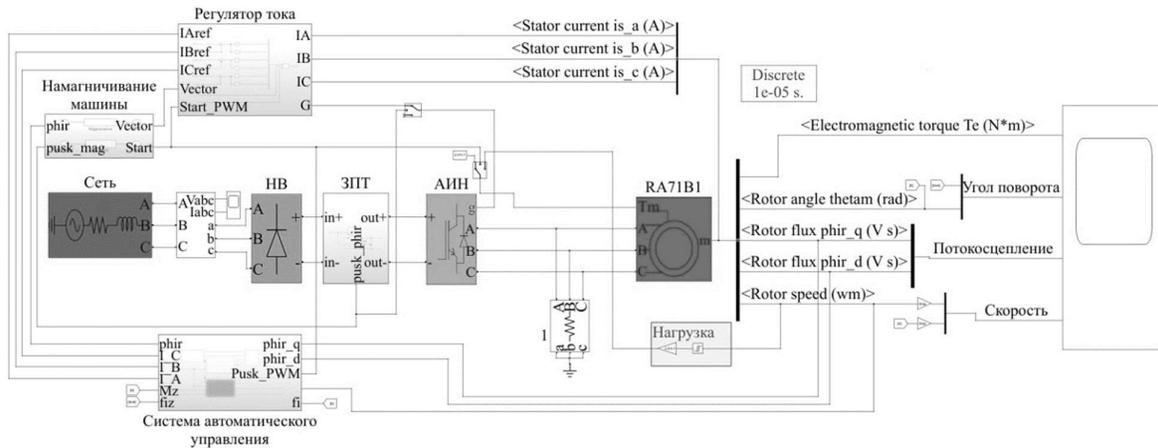


Рис. 1. Модель классического следящего электропривода с асинхронным двигателем

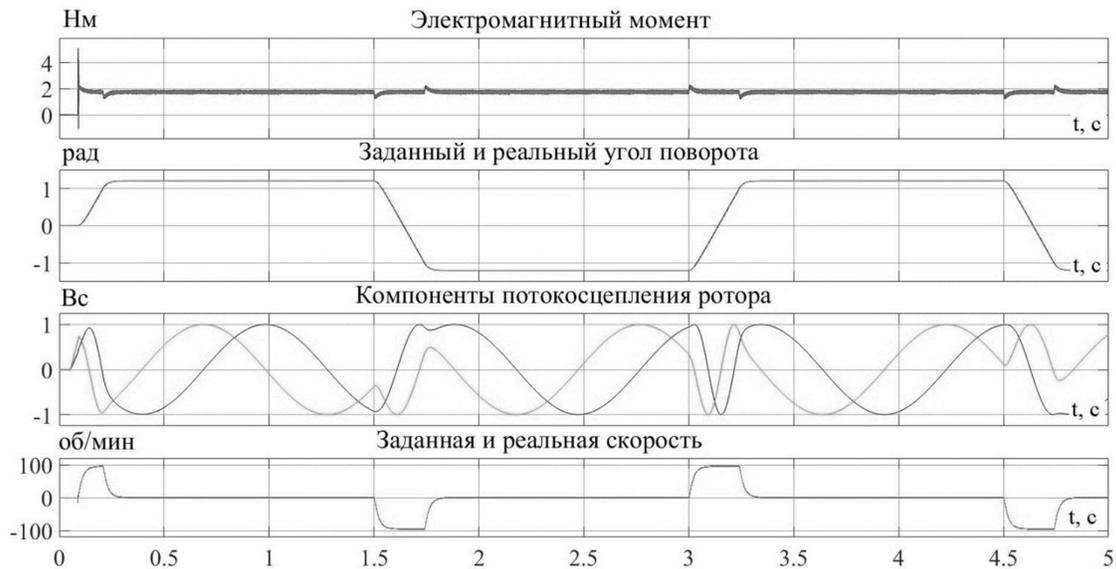


Рис. 2. Обработка траектории задания по модели рис. 1

В соответствии с теорией автоматического управления уменьшение контуров регулирования в системе подчиненного регулирования приводит к повышению быстродействия. Оптимальным считается наличие двух контуров регулирования. Исходя из этого, авторами предлагается вариант объединения контуров регулирования положения и скорости в единый регулятор, на который подается как сигнал задания положения, так и скорости. Для уменьшения ошибки регулирования в качестве обратной связи также используется не только значение по положению, но и его производная, взятая с рассчитанным коэффициентом. Результаты обработки траектории задания представлены на рис.3. Его анализ показывает, что пульсации электромагнитного момента несколько увеличились, но при этом ошибка по скорости и обработки угла уменьшилась.

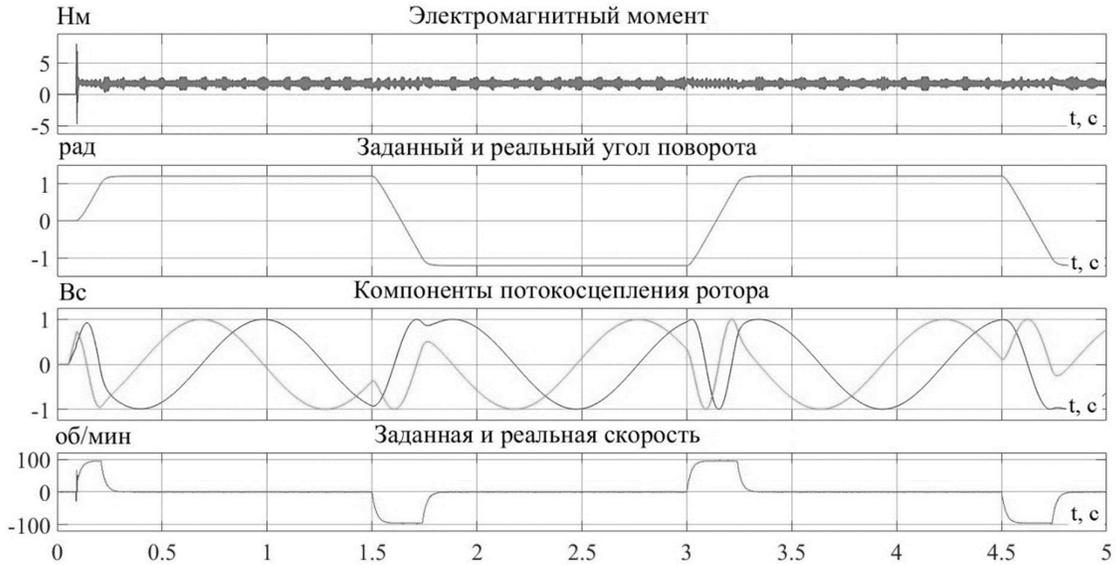


Рис. 3. Обработка траектории задания с единым контуром скорости и положения

Данная модель для вычисления синуса и косинуса угла поворота поля ротора использует заложенные в математическую модель электрической машины значения потокосцепления ротора, приведенные к осям  $d, q$ . Это соответствует на практике установке датчиков потокосцепления внутрь машины, что по конструктивным соображениям затруднительно.

В связи с этим авторы предлагают использовать методику расчета потокосцепления ротора с определением значения потокосцепления статора, которое вращается синхронно с полем ротора, но сдвинуто на некоторый угол. Вычисление данного угла осуществляется вычитанием из скорости вращения поля статора скорости вращения поля ротора в номинальном режиме и дальнейшем переводе полученного рассогласования вращения полей в радианы. В связи с тем, что составляющие потокосцепления на оси  $d, q$  как для статора, так и для ротора взаимно перпендикулярны, то угол отклонения между осью  $d$  статора и ротора, как и между осью  $q$  статора и ротора будет одинаковым, и равный ранее рассчитанному. Взаимное расположение составляющих потокосцепления ротора и статора представлено на рис.4. Расчет потокосцепления статора осуществляется с использованием дифференциальных уравнений, представленных далее:

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = U_{sd} - I_{sd} \cdot R_s; \quad \frac{d\psi_{sq}}{dt} = U_{sq} - I_{sq} \cdot R_s. \tag{1}$$

Сопротивления статора предварительно рассчитывается по одной из достоверных методик определения параметров схемы замещения без учета нагрева обмоток. Данный подход позволяет системе стабильно работать и при увеличении сопротивления обмоток статора из-за их нагрева в процессе длительной работы. Для проверки правильности вычисления потокосцепления ротора по модифицированной модели на рис.5 представлены осциллограммы потокосцепления ротора, вычисленного предлагаемым методом и снятого датчиком библиотечного блока машины.

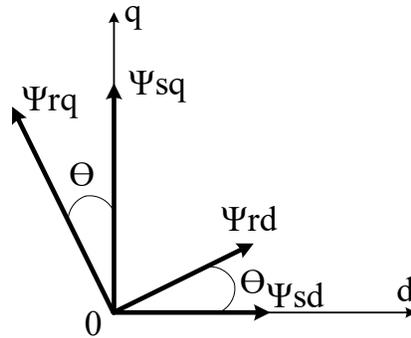


Рис. 4. Взаимное расположение составляющих потокоцепления статора и ротора

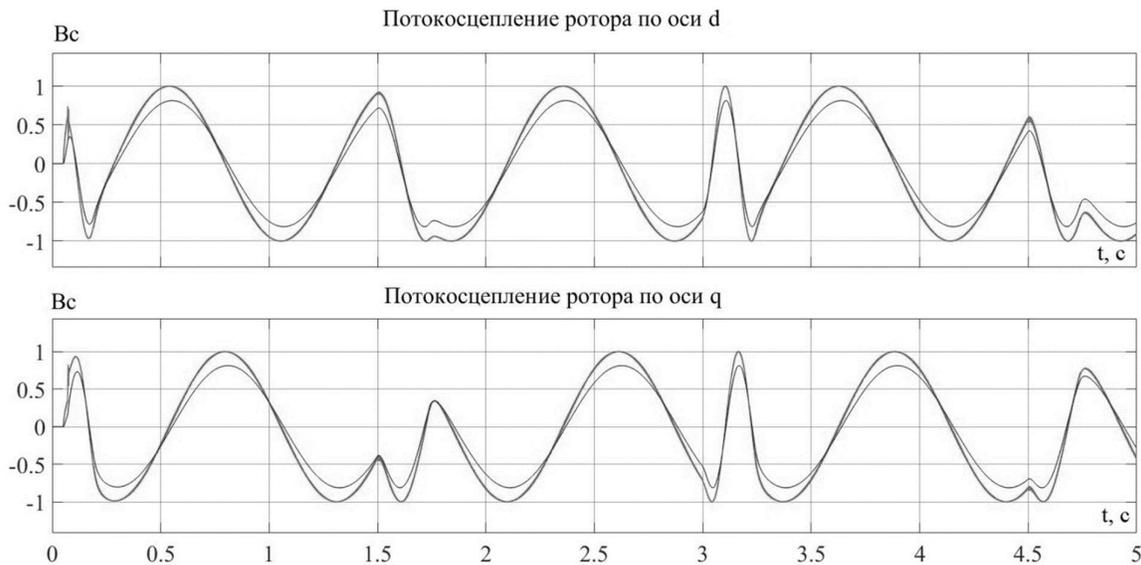


Рис. 5. Потокоцепления ротора (синий – полученный с виртуального датчика потокоцепления электрической машины, красный – полученный по (1))

Как видно из осциллограмм рис.5, потокоцепления ротора совпадают по фазам и незначительно отличаются по амплитуде. При расчете был уточнен поток рассеяния в контуре намагничивания. Результаты работы двигателя с потокоцеплением, рассчитанным по (1), представлены на рис.6. На рис.7 показаны результаты определения ошибки в обработке траектории задания для случая использования потокоцепления, извлеченного из модели электрической машины и для рассчитанного по (1).

Анализ осциллограмм рис.6 и рис.7 показывает, что предлагаемая методика определения потокоцепления ротора через потокоцепление статора увеличивает ошибку обработки задаваемой траектории по сравнению с вариантом потокоцепления ротора, снятого датчиком внутри электрической машины. Однако это увеличение (с  $7 \cdot 10^{-5}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$  рад) всё еще вполне соответствует самым высоким требованиям к следящим приводам ПР. При этом предлагаемый вариант на практике реализуем без дополнительных конструктивных доработок самой электрической машины.

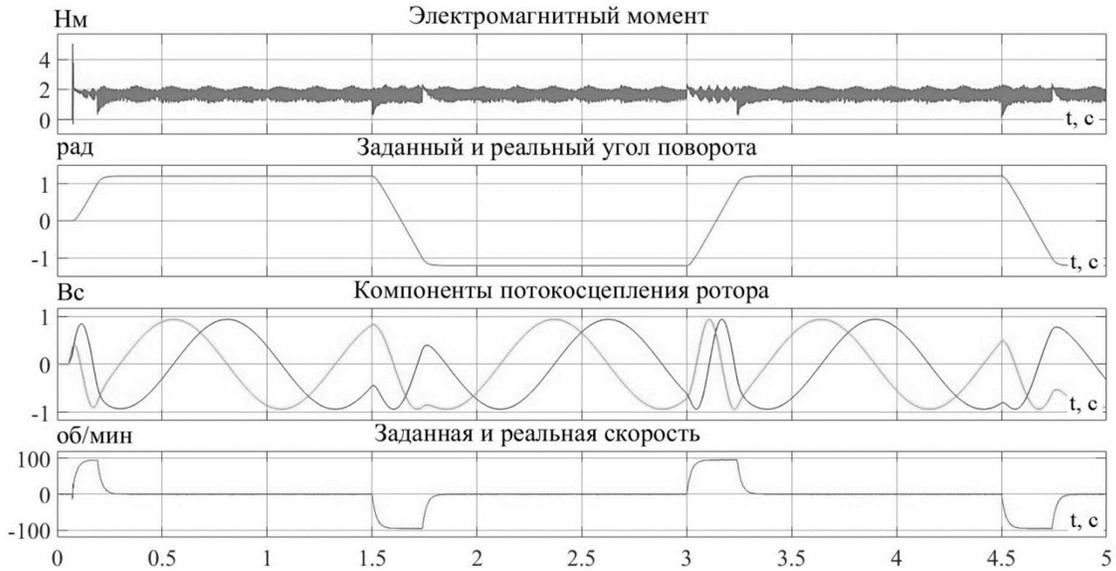


Рис. 6. Осциллограммы работы двигателя при потокоцеплении рассчитанном по (1)

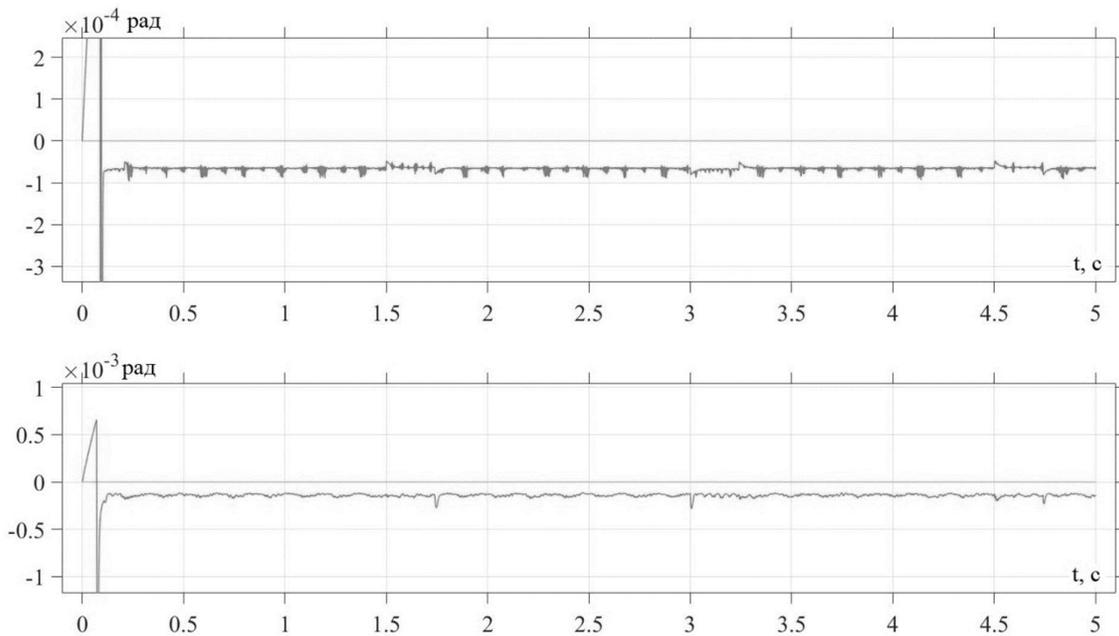
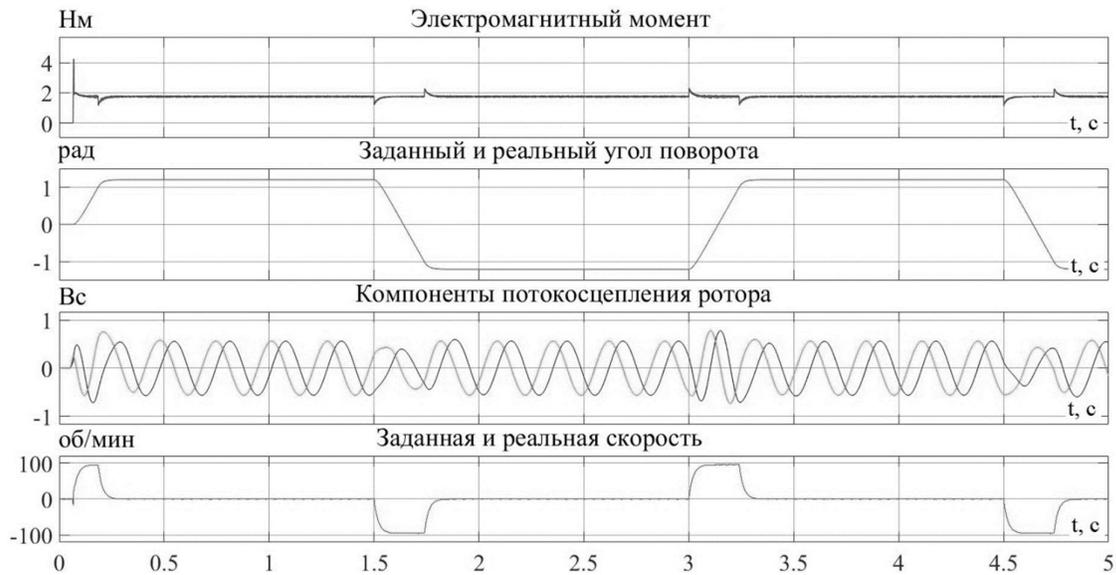


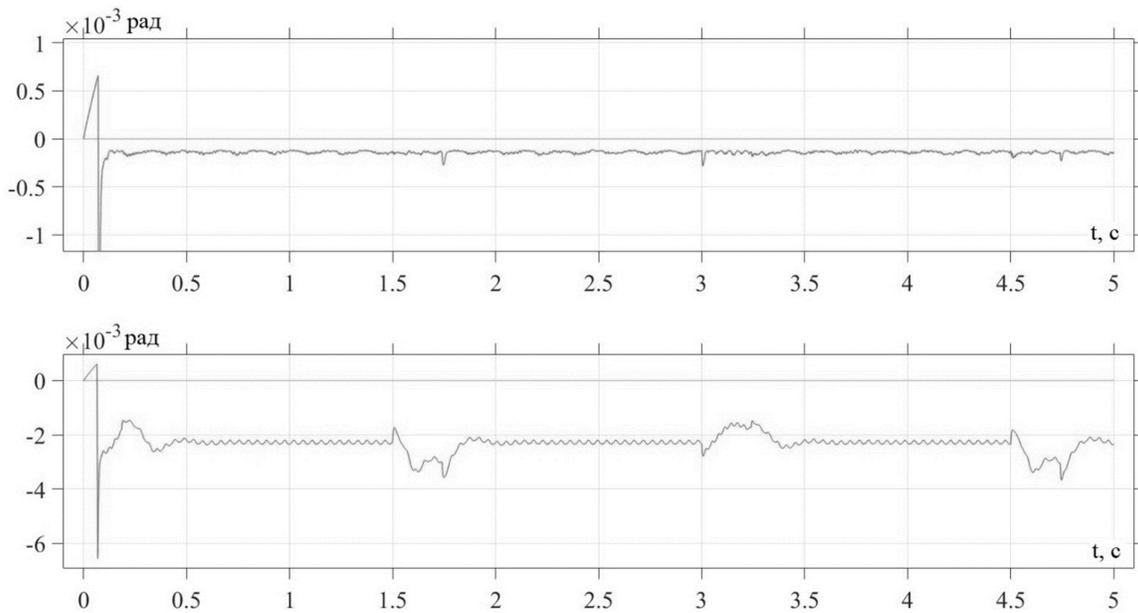
Рис. 7. Ошибка обработки траектории задания

Результаты пуска двигателя при нагретых обмотках статора и, как следствие, увеличении активных сопротивлений обмоток на 40%, показаны на рис. 8. На рис. 9 представлена ошибка обработки заданной траектории для холодных и нагретых обмоток двигателя.

Видно, что следящая система сохраняет устойчивость, ошибка обработки траектории увеличивается до 0,002 рад в установившемся режиме и, в целом, предложенный вариант оптимизации следящей системы асинхронного частотно-регулируемого электропривода доказывает свою работоспособность и перспективность для практической реализации.



**Рис.8. Работа двигателя при нагретой обмотке**



**Рис.9. Ошибка обработки заданной траектории для холодных (сверху) и нагретых (снизу) обмоток двигателя**

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2020-0019.

### Библиографический список

1. **Колюбин, С.А.** Динамика робототехнических систем. Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с.
2. **Анучин, А.С.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.:

- Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.: ил.
3. **Бесекерский, В.А.** Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. И доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2004. – 752 с. – (Серия: Специалист).
  4. Пашков Е.В., Крамарь В.А., Кабанов А.А. Следящие приводы промышленного технологического оборудования: Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2015. – 368 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
  5. **Калачёв, Ю. Н.** SimInTech: моделирование в электроприводе / Ю. Н. Калачёв. — Москва : ДМК Пресс, 2019. — 98 с.

---

V.V. Fedotov, V.V. Rozhkov

**OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF VECTOR FREQUENCY-CURRENT CONTROL OF A SERVO ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE**

Branch of the National Research University MPEI in Smolensk  
Smolensk, Russia

**Abstract:** The article considers the implementation of a vector control system for a servo drive. One of the variants of indirect determination of the projections of the rotor flux vector on the axis of the coordinate system, rotating synchronously with the rotor field, is proposed. The effectiveness of the proposed technique in a servo system with two control channels has been verified. The optimized structure provides sufficient accuracy of working out a given trajectory and stability with temperature changes in the active resistances of the motor windings.

**Key words:** rotor flux linkage, asynchronous electric drive, vector control, servo system.

**References**

- [1] Kolyubin S.A. Dinamika robototekhnicheskikh sistem [Dynamics of robotic systems.] Uchebnoye posobiye. [Tutorial] – SPb.: Universitet ITMO [ITMO University], 2017. – 117 s. (in Russian)
- [2] Anuchin A.S. Sistemy upravleniya elektroprivodov [Electric drive control systems]: uchebnik dlya vuzov [a textbook for universities]. – M.: Izdatel'skiy dom MEI [MPEI Publishing House], 2015. – 373 s.: il. (in Russian)
- [3] Besekerskiy V.A. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya / V.A. Besekerskiy, Ye.P. Popov. – Izd. 4-ye, pererab. I dop. – SPb, Izd-vo «Professiya», 2004. – 752 s. – (Seriya: Spetsialist).
- [4] Pashkov Ye.V., Kramar' V.A., Kabanov A.A. Sledyashchiye privody promyshlennogo tekhnologicheskogo oborudovaniya: Uchebnoye posobiye. – 2-ye izd., ster. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2015. – 368 s.: il. – (Uchebniki dlya vuzov. Spetsial'naya literatura).
- [5] Kalachev, YU. N. SimInTech: modelirovaniye v elektroprivode / YU. N. Kalachov. — Moskva : DMK Press, 2019. — 98 s.

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

УДК 621.311

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_141

А.М. Альшахери

#### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6-35 КВ МИКРОГРИД ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В данной статье предлагается повышение технического эффекта и технической эффективности релейной защиты распределительной сети 6-35 кВ посредством автоматизации расчёта параметров срабатывания релейной защиты. Автоматизация положительно влияет на улучшение технико-экономических показателей сетей за счет сокращения времени пересчета параметров срабатывания [1].

**Ключевые слова:** релейная защита, передача электроэнергии, электроснабжение, замыкания, уставка, селективность.

#### Традиционная концепция защиты сети от коротких замыканий

Известно, что мощность передается из точки А в точку В по линии передачи распределительной сети 6-35 кВ. Поскольку однофазные короткие замыкания менее опасны, линия отключается релейной защитой только. А в случае двухфазных или трехфазных коротких замыканий, Защита от двухфазных и трехфазных коротких замыканий обеспечивается установить реле релейной защиты в 2-фазах: фаза А и фаза С [3,4].

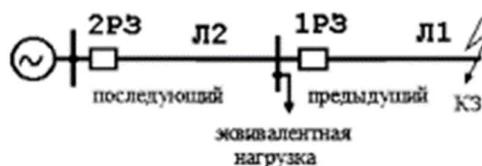


Рис. 1. Расчётная схема для выбора уставок релейной защиты (РЗ)

Защиты могут выполняться как на отдельных реле, так и в комплексе, как часть микропроцессорного терминала. Для защиты линии используется трехступенчатая токовая защита, где:

- 1 ступень (токовая отсечка (ТО) мгновенная);
- 2 ступень (ТО с выдержкой времени);
- 3 ступень (МТЗ).

ТО реализует грубую защиту, МТЗ более чувствительна и может выполнять функцию резервирования по отношению к другим защитами. Защита от максимального тока с временной задержкой служит 3-й ступенью защиты линии [4]. Рассмотрим данный случай на схеме (рис. 1).

Ток срабатывания МТЗ выбирается в амперах (первичных) по нескольким условиям:

- 1) отстройка от максимальных рабочих токов;
- 2) отстройка от тока срабатывания предыдущих защит;
- 3) несрабатывание защиты 2РЗ при сверхтоках послеаварийных перегрузок, т.е. после отключения короткого замыкания на предыдущем элементе.

Выражение для срабатывания МТЗ на Л выглядит следующим образом:

$$I_{с.з.} = \frac{k_n \cdot k_{сзп}}{k_b} \cdot I_{раб.мах} \quad (1)$$

где  $k_n$  – коэффициент надежности несрабатывания защиты;  $k_b$  – коэффициент возврата максимальных реле тока;  $k_{сзп}$  – коэффициент самозапуска нагрузки, отражающий увеличение рабочего тока;  $I_{раб.мах}$  за счет одновременного пуска всех тех электродвигателей, которые затормозились при снижении напряжения во время короткого замыкания. При отсутствии в составе нагрузки электродвигателей напряжением 6 кВ и 10 кВ и при времени срабатывания МТЗ более 0,3 с можно принимать значения  $k_{сзп} \geq 1,1 \div 1,3$  [4].

При этом общий уровень наблюдаемости и автоматизации электросетевых подстанций классов напряжений 6-35 кВ в настоящее время остается достаточно низким, вплоть до полного отсутствия на объектах оборудования информационно-управляющих систем. В таких условиях становится все труднее обеспечить требования по непрерывному и бесперебойному электроснабжению всех потребителей, а также оперативной ликвидации возникающих аварий [5,6].

**Описание проблемы:** Будущие микрогрид будут часто реконфигурироваться, менять топологию, состав нагрузок и генерации определяются изменяющимися потребностями общества и разнообразных условий территории (климатические, экологические, стесненность и др.).

Ручной пересчет параметров срабатывания (уставок) защиты не позволяет делать это оперативно. При этом общий уровень автоматизации электросетевых подстанций классов напряжений 6-35 кВ в настоящее время остается достаточно низким, вплоть до полного отсутствия на объектах оборудования информационно управляющих систем. Требуется разработка методов автоматизации расчёта параметров срабатывания релейной защиты [2].

**Метод решения проблемы:** Для решения этой проблемы разработана технология автоматического расчета параметров срабатывания релейных защит (РЗ) относительной селективности для распределительной сети 6-35 кВ (технология АРЗ) [7] (Рис.2). Системы АРЗ применяются для подстанций всех уровней напряжения и представляют совокупность микропроцессорных устройств релейной защиты и компьютерной системы управления, позволяющих воплотить в жизнь все преимущества информационной и компьютерной технологии. Технология применима к любым РЗ относительной селективности, любой топологии и

количеств источников питания. Цель технологии: полная автоматизация расчета уставок релейных защит (РЗ) распределительной сети, переход на безлюдную технологию расчета. Когда происходят изменения в распределительной сети, изменения передаются в устройство АРЗ и оно пересчитывает уставки защит сети, затем устройство АРЗ передает новые уставки защит в устройства защиты [8].

Все короткие замыкания в распределительной сети распознаются специальными устройствами релейной защиты (РЗ). Устройства РЗ устанавливаются почти на каждом выключателе, образуя систему релейной защиты всей распределительной сети. Все расчеты параметров срабатывания РЗ могут выполняться автоматически за счет устройства автоматического расчета уставок и согласования защит (АРЗ) [9,10].



Рис. 2. Вид устройство автоматического расчета уставок релейной защиты (АРЗ)

### Выводы

Релейная защита микрогрид 6-35 кВ не сможет правильно работать после реконфигурирования сети, изменения топологии, состава нагрузок и генерации в сети. Это проблема требует автоматизации расчёта параметров срабатывания релейной защиты оперативно, где предпочтительнее использовать автоматические устройства, например, интеллектуальное устройство (АРЗ), построенное на базе специального алгоритма, основанного на принципах обмена информацией и анализе значений контролируемых и рассчитанных режимных параметров распределительной сети. Это необходимо для экономии времени, усилий, затрат и уменьшения человеческих ошибок [11,12].

### Библиографический список

1. Terzija Y. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks / Y. Terzija, G. Valverde, D. Cai, P. Regulski, Y. Madani, J. Fitch, S. Skok, M. Begovic, A. Phadke // Proceedings of the IEEE. 2011, Vol. 99, № 1.
2. Куликов, А. Л. Принципы объединения пусковых и измерительных органов релейной защиты для повышения ее чувствительности / А. Л. Куликов, М.В. Шарьгин // Известия Академии наук. Энергетика. 2018, № 6.

3. **Дорохин, Е. Г.** Основы эксплуатации релейной защиты и автоматики. Книга 2. Оперативное обслуживание устройств РЗА и вторичных цепей / Е.Г. Дорохин. - М.: Советская Кубань, 2012. - 432 с.
4. **Захаров, Олег** Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки / Олег Захаров. - М.: Инфра-Инженерия, 2014. - 228 с.
5. Инструкция для оперативного персонала по обслуживанию устройств релейной защиты и электроавтоматики. СО 34.35.502-2005. - М.: Энергия, 2014. - 917 с.
6. Инструкция по организации и производству работ в устройствах релейной защиты и электроавтоматики электростанций и подстанций СО 34.35.302-2006. - М.: Альвис, 2013. - 212 с.
7. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. РД 153-34.0-35.301-2002. - М.: Альвис, 2014. - 136 с.
8. **Кузнецов, Ф. Д.** Векторные диаграммы в схемах релейной защиты и автоматики. Практическое пособие / Ф.Д. Кузнецов. - М.: НЦ ЭНАС, 2002. - 974 с.
9. Нормы времени на техническое обслуживание устройств релейной защиты и автоматики. - М.: Энергия, 2014. - 116 с.
10. Общие требования к системам противоаварийной и режимной автоматики, релейной защиты и автоматики, телеметрической информации и технологической связи в ЕЭС России. - М.: Энергия, 2014. - 657 с.
11. Anil Kumar P. Protection issues in microgrid / P. Anil Kumar, J. Shankar и Y. Nagaraju // International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE). 2013, Vol. 1, № 1.
12. **Нудельман Г. С.**, Релейная защита и автоматика в условиях развития малой распределённой энергетики / Г. С. Нудельман, О.А. Онисова // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014, № 4.

A.M. Alshaheri

## SOLVING THE PROBLEM OF PROTECTING THE DISTRIBUTION NETWORK OF 6-35 KV MICROGRIDS BY AUTOMATING THE CALCULATION OF OPERATING PARAMETERS

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

**Abstract:** This article proposes an increase in the technical effect and technical efficiency of the relay protection of a 6-35 kV distribution network by automating the calculation of the relay protection operation parameters. Automation has a positive effect on improving the technical and economic indicators of networks by reducing the time for recalculating the operation parameters [1].

**Key words:** Relay protection, power transmission, power supply, short circuits, setting, selectivity.

### References

- [1] Terzija Y. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks / Y. Terzija, G. Valverde, D. Cai, P. Regulski, Y. Madani, J. Fitch, S. Skok, M. Begovic, A. Phadke // Proceedings of the IEEE. 2011, Vol. 99, № 1.
- [2] Kulikov A.L., Sharygin M.V. “Printsipy ob'yedineniya puskovykh i izmeritel'nykh organov releynoy zashchity dlya povysheniya yeye chuvstvitel'nosti” [Principles of combining starting and measuring organs of relay protection to increase its sensitivity], *Izvestiya Akademii nauk. Energetika [Izvestiya Akademii Nauk. Energy]*, 2018, no.6.
- [3] Dorokhin, E. G. Fundamentals of operation of relay protection and automation. Book 2. Operational maintenance of relay protection and automation devices and secondary circuits / E.G. Dorokhin. - M.: Soviet Kuban, 2012. - 432 p.
- [4] Zakharov, Oleg Reliability of digital relay protection devices. Indicators. Requirements. Estimates / Oleg Zakharov. - M.: Infra-Engineering, 2014. - 228 p.
- [5] Instructions for operating personnel on maintenance of relay protection devices and electric automation. SO 34.35.502-2005. - M.: Energy, 2014. - 917 p.
- [6] Instructions for organizing and performing work in relay protection devices and electric automation of power plants and substations SO 34.35.302-2006. - M.: Alvis, 2013. - 212 p.
- [7] Instructions for testing current transformers used in relay protection and measurement circuits. RD 153-34.0-35.301-2002. - M.: Alvis, 2014. - 136 p.
- [8] Kuznetsov, F. D. Vector diagrams in relay protection and automation schemes. Practical guide / F.D. Kuznetsov. - M.: NTs ENAS, 2002. - 974 p.
- [9] Time limits for maintenance of relay protection and automation devices. - M.: Energy, 2014. - 116 p.
- [10] General requirements for systems of emergency and regime automation, relay protection and automation, telemetry information and technological communication in the UES of Russia. - M.: Energy, 2014. - 657 p.
- [11] Anil Kumar P. Protection issues in microgrid / P. Anil Kumar, J. Shankar и Y. Nagaraju // International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE). 2013, Vol. 1, № 1.
- [12] Nudelman G.S., Onisova O.A. “ Releynaya zashchita i avtomatika v usloviyakh razvitiya maloy raspredelonnoy energetiki” [Relay protection and automation in the conditions of development of small distributed power engineering], *Elektroenergiya [Electricity]*, 2014 no. 4.

**В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина**

## **РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКАХ**

Юго-Западный государственный университет

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы обеспечения надежной работы кабельных линий. Приведены результаты измерений показателей качества электроэнергии, показывающих возможность протекания по кабельным линиям значительных токов высших гармоник и интергармоник. Предложена расчетная модель, позволяющая оценить снижение срока службы изоляции кабельной линии при несинусоидальных токах.

**Ключевые слова:** изоляция, кабель, качество электроэнергии, высшие гармоники, интергармоники.

В электрических сетях различного назначения и класса напряжения во многих случаях передача электроэнергии осуществляется по кабельным линиям. Надежность электроснабжения потребителей электрической энергии в большой степени определяется электрической прочностью изоляции или же способностью изоляции работать без возникновения локальных или сквозных нарушений изоляционного слоя.

Длительная работа кабелей неизбежно приводит к постепенному снижению качества изоляции, в том числе и электрической прочности из-за воздействия различных негативных факторов, например, температуры. Повышенный нагрев изоляции во многом ускоряет развитие физико-химических процессов в материале изоляции, что приводит к постепенному снижению электрической прочности.

Диэлектрические материалы, используемые для создания изоляционных оболочек кабелей, довольно чувствительны к различным внешним воздействиям, снижающим срок службы изоляции по сравнению с паспортным значением. В число негативных факторов входит и температура нагрева изоляции. Увеличение температуры изоляции ускоряет протекание в материалах изоляции внутренних химических процессов. Возрастание скорости течения неблагоприятных процессов обеспечивает довольно быстрое понижение значения сопротивления изоляции, что при определенных условиях приводит к пробоям изоляции и повреждению кабеля.

Исследование вопросов, связанных с изменением свойств изоляционных материалов в процессе их службы, является актуальным, несмотря на большое количество работ, выполненных ранее. Так, Костяшиным Д.М. проведены исследования диэлектрических характеристик такого изоляционного материала как шелковая лавсановая ткань [1]. Также проводятся подобные исследования изоляционных материалов, выпуск которых начат относительно недавно, например, сшитого полиэтилена. Так, в работе Олексюка И.В. рассмотрены процессы старения изоляции кабельных линий, имеющих изоляцию из этого материала [2], а Поляковым Д. А. и его соавторами предложена математическая модель определения срока службы полимерной

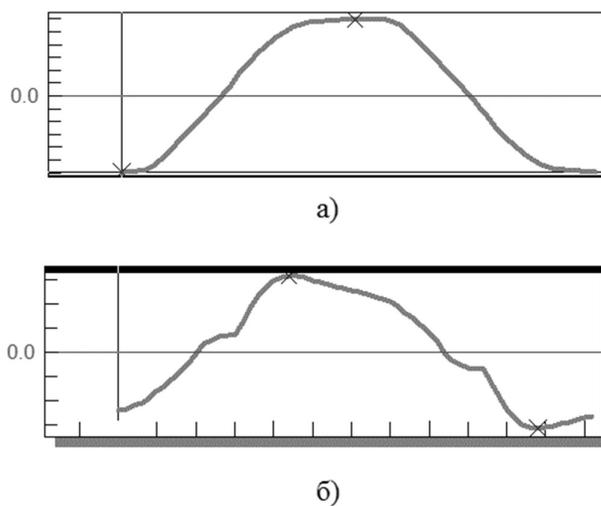
изоляции кабельных линий [3].

Известны работы по прогнозированию срока службы изоляции на основе значений определенных параметров, включая измерения характеристик частичных разрядов, возникающих в изоляции кабелей. Так, Комаровым И.В. и его соавторами проведены исследования частичных разрядов в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена и предложена математическая модель прогнозирования срока службы данной изоляции [4, 5].

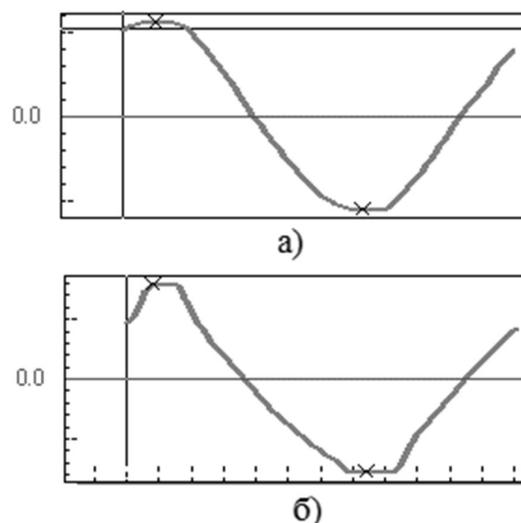
Нагрев изоляции кабелей, особенно фазной, создается токами, проходящими по токоведущим жилам. При проектировании кабельных линий нагрев кабелей оценивается по значению расчетного тока линии и сопротивления токоведущих жил. Данная величина находится при определении расчетных нагрузок. При определении электрических нагрузок расчетный ток принимается синусоидальным.

Но в современных условиях во многих электроприемниках, применяемых на промышленных предприятиях, в бытовой сфере и других местах, используются различные электронные блоки, в том числе преобразователи напряжения и разнообразные регулирующие устройства, например, для изменения освещенности. Все эти устройства являются нелинейными, и они характерны потреблением тока, имеющего форму отличную от классической синусоиды [6].

Далее приведены результаты, полученные авторами статьи при выполнении исследовательских работ в области качества электроэнергии. Они представлены графиками форм полупериодов напряжения и тока. Эти экспериментальные данные получены для светодиодных светильников, относящихся к электроприемникам, искажающим напряжение электрической сети. Данные графики созданы при обработке результатов измерений, проведенных прибором, предназначенным для замеров количественных и качественных показателей работы электрических сетей и электроприемников.

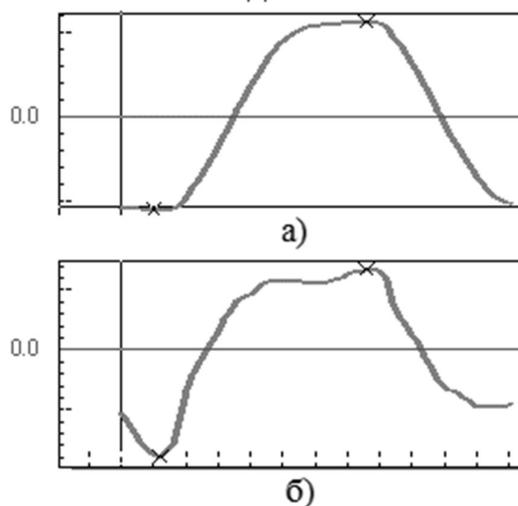


**Рис. 1. Графики форм полупериодов:**  
 а) полупериод кривой напряжения; б) полупериод кривой тока



**Рис. 2. Графики форм полупериодов:**

а) полупериод кривой напряжения; б) полупериод кривой тока



**Рис. 3. Графики форм полупериодов:**

а) полупериод кривой напряжения; б) полупериод кривой тока

В случаях возникновения искажений формы синусоид как напряжения, так и тока в общем случае в электрической сети возникают напряжения и токи с частотами, значения которых отличаются от величины номинальной частоты – 50 Гц. Действующий в настоящее время ГОСТ 32144-2013 рассматривает как высшие гармоники (имеющие частоты выше 50 Гц и кратные в целых числах этому значению) и интергармоники (имеющие частоты выше 50 Гц и не кратные в целых числах этому значению) [7].

В настоящее время ГОСТ 32144-2013 не нормирует значения интергармоник в электрической сети. Научная и техническая литература также не уделяет большого внимания интергармоникам и последствиям их появления в электрической сети. Рассмотрим далее вопросы работы электрических сетей при появлении интергармоник на примере силовых кабелей.

На рис.4 приведен суточный график изменения значений напряжений трех

фаз электрической сети, полученный авторами статьи в ходе выполнения мониторинга качества электроэнергии. Измерения производились на секции шин 0,4 кВ комплектной трансформаторной подстанции. На приведенном графике видно, что фазы А и В имеют спокойную нагрузку, а среди потребителей электроэнергии, подключенных к фазе С, имеется нагрузка, создающая значительные колебания напряжения и являющаяся потенциальным источником интергармоник.



**Рис. 4. График изменения фазных напряжений за сутки**

Анализ полученных результатов измерений показал, что в напряжении фазы С кроме колебаний напряжения имеются большие искажения синусоидальной формы напряжения. Такой вывод подтверждается численными оценками гармоник и интергармоник – значениями коэффициентов гармонических составляющих и интергармонических составляющих напряжения фазы С. Так, коэффициент третьей гармонической составляющей достигал значения 10,71%, а среди интергармонических составляющих наибольшее значение коэффициента этих составляющих составило 15,61%.

Как видно из результатов измерений, напряжение фазы С содержит большое количество высших гармоник и интергармоник. Поэтому токи, протекающие в данной фазе электрической сети, также должны иметь значительные искажения синусоидальной формы (ГОСТ 32144-2013 не нормирует значения гармоник тока). Таким образом, в кабельных линиях, питающих нагрузки, создающие значительные высшие гармоники и интергармоники тока, возникают условия для увеличения нагрева изоляции по сравнению с режимом, при котором по этим линиям протекают только синусоидальные токи.

Рассмотрим создание расчетной модели определения нагрева изоляции

кабельных линий при протекании по ним несинусоидальных токов. Этот нагрев создается за счет общих потерь активной мощности, возникающих в токоведущих элементах силовых кабелей. Данная мощность в случае наличия в токе фазы основной частоты, высших гармоник и интергармоник, может быть определена следующим образом:

$$\Delta p_{л. \Sigma} = \sum_1^m i_j^2 \cdot R_{л. j}, \quad (1)$$

где  $m$  – количество токоведущих элементов рассматриваемого силового кабеля (фазные жилы, экран и т.д.);  $i_j$  – значение  $j$ -ой составной части тока, протекающего по токоведущему элементу силового кабеля, А;  $R_{л. j}$  – величина активного сопротивления токоведущего элемента  $j$ -ой составной части проходящей по нему тока, Ом.

Для большей наглядности в случае возникновения режима с несинусоидальным током потери активной мощности, предварительно без учета токов интергармоник, определяются как:

$$P_{\Sigma}^{фазн} = I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \cdot R_n, \quad (2)$$

где  $I_1$   $I_n$  – токи первой гармоники (частота 50 Гц) и высших гармоник (частоты выше 50 Гц),  $R_1$  и  $R_n$  – активные сопротивления токоведущих элементов рассматриваемого силового кабеля с учетом разницы этих сопротивлений на частоте 50 Гц и частоте конкретной гармоники.

В отличие от токоведущих жил, по нулевому проводнику силового кабеля (либо совмещенный рабочий и защитный проводник, либо отдельный рабочий проводник) силового кабеля при искажениях тока начинают протекать токи высших гармоник, с номерами кратными трем, так как для таких гармоник отсутствует сдвиг по фазе. Это явление приводит к возникновению дополнительных потерь активной мощности, рассчитываемых как:

$$P_{\Sigma}^{нул} = 3 \cdot \sum_{n=3,9,15\dots} I_n^2 \cdot R_n, \quad (3)$$

где  $I_n$  – значения токов высших гармоник в нулевом проводнике рассматриваемого силового кабеля, кратных трем и совпадающих по фазе.

При наличии интергармоник в формулы (2) и (3) добавляются суммы, аналогичные суммам, учитывающим потери активной мощности от токов гармоник.

Для определения степени нагрева изоляции или её температуры используем метод тепловых схем. Этот метод основан на использовании процессов передачи теплоты от одних физических тел к другим, законов электротехники и эквивалентности тепловых и электрических процессов. В частности, метод тепловых схем основан на применении закона Ома в тепловом выражении:

$$\Delta T = P \cdot S, \quad (4)$$

где  $\Delta T$  – разность температур между поверхностями конструктивных элементов рассматриваемого силового кабеля (передача теплоты от ) или кабеля и

окружающей среды,  $K$ ;  $P$  – значение теплового потока, передаваемого через конструктивный элемент силового кабеля, Вт;  $S$  – величина теплового сопротивления конструктивного элемента силового кабеля, через который происходит теплопередача, К/Вт.

Процесс расчета температуры конструктивных элементов силового кабеля, включая и изоляционные слои, в методе тепловых схем выполняется с использованием предварительно составленных тепловых схем замещения, включающих источник тепла или токоведущие жилы кабеля и тепловые сопротивления. При рассмотрении силового кабеля с тремя фазными токоведущими жилами и нулевым проводником тепловая схема замещения будет иметь следующий вид (рис.5).

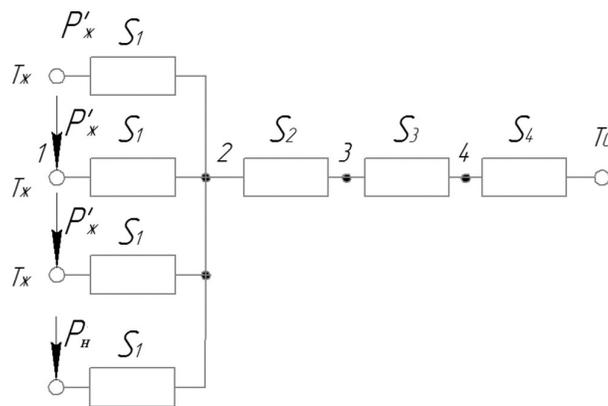


Рис. 5. Тепловая схема силового кабеля с тремя фазными токоведущими жилами и нулевым проводником

Исходя из приведенной тепловой схемы температура изоляционного слоя токоведущей жилы для силового кабеля с тремя фазными токоведущими жилами и нулевым проводником находится по следующей формуле:

$$\tau_{ж} = P'_{ж} \cdot S_1 + 3 \cdot P'_{ж} (S_2 + S_3 + S_4) + \tau_{окр.ср}, \quad (5)$$

Для оценки опасности нагрева изоляции кабеля применяем уравнение Аррениуса. Это уравнение используется для нахождения расчетного значения уменьшения ( $V_{нс}$ ) срока службы рассматриваемого силового кабеля ( $V_{ном}$ ) из-за теплового старения изоляции:

$$V_{нс} = V_{ном} \cdot \exp\left(-K_a \left(\frac{1}{\theta_{ном}} - \frac{1}{\theta_{нс}}\right)\right), \quad (6)$$

где  $\theta_{ном}$  – величина температуры изоляции рассматриваемого силового кабеля для режима с отсутствием токов как высших гармоник, так и интергармоник,  $K$ ;  $\theta_{нс}$  – полученное в результате расчетов с использованием метода тепловых схем величины температуры изоляции в случае протекания по элементам рассматриваемого силового кабеля токов высших гармоник и интергармоник;  $K_a$  –

коэффициент, учитывающий энергию активации для материалов изоляционных слоев рассматриваемого силового кабеля,  $K$ .

Авторами статьи предложена расчетная модель для оценки срока службы изоляции, позволяющая определять снижение данного срока при появлении в электрических сетях несинусоидальных токов, приводящих к протеканию по токоведущим жилам кабелей токов высших гармоник и интергармоник. Применение расчетной модели осуществляется в два этапа.

На первом этапе находится значение потерь активной мощности, возникающих в кабельных линиях при протекании несинусоидальных токов. На втором этапе, используя тепловые схемы, определяется температура нагрева элементов кабельной линии, в том числе и изоляции. При этом учитываются различные факторы, включая и конкретные условия прокладки, а также, включая протекание процессов теплоотдачи от кабельной линии в окружающий ее грунт. Это является отличительной особенностью предлагаемой модели.

### Библиографический список

1. **Костяшин, Н.Д.** Расчет диэлектрических характеристик неоднородного изоляционного материала – лакоткань шелковая ЛШМ// Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №10. С. 583–585.
2. **Олексюк, И. В.** Старение изоляции из сшитого полиэтилена кабельных линий / И. В. Олексюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 121–129. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-2-121-129
3. **Поляков Д. А.,** Математическое моделирование срока службы полимерной изоляции кабелей /Д.А. Поляков [и др.] // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 69–73. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-69-73.
4. **Комаров И. В.,** Математическая модель прогнозирования пробоя изоляции на основе характеристик частичных разрядов / И.В. Комаров [и др.] // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). - С. 46–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-46-49.
5. **Поляков Д. А.,** Исследование зависимости мощности частичных разрядов от напряжения в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена / Д.А. Поляков [и др.] // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 39–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-39-44.
6. **Руди Д. Ю.,** Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения / Д.Ю. Руди // Омский научный вестник. 2018. №6 (162). С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125.
7. **Горовой С. А.,** Скороходов В. И., Плотников Д. И. Идентификация интергармоник на основе пакетного вейвлет-преобразования / С. А. Горовой, В. И. Скороходов, Д. И. Плотников // Актуальные вопросы энергетики. Издательство ОмГТУ. Том 3, №1. 2021. С.31–37. DOI: 10.25206/2686-6935-2021-3-1-31-36

V.I. Biryulin, D.V. Kudelina

## CALCULATION MODEL FOR DETERMINING THE SERVICE LIFE OF INSULATION AT NON-SINUSOIDAL CURRENTS

Southwest State University, Russia

**Abstract:** The article deals with the issues of ensuring the reliable operation of cable lines. The results of power quality indicators measurements are given, showing the possibility of significant currents of higher harmonics and interharmonics flowing through cable lines. A calculation model which allows to estimate the reduction in the service life of cable line insulation at non-sinusoidal currents is proposed.

**Key words:** insulation, cable, power quality, higher harmonics, interharmonics.

### References

- [1] A.I. Tadzhibaev, V.A. Kaniskin, A.A. Pugachev. Assessment of the technical condition of cables and cable networks. St. Petersburg: PEIPC, 2007. 173 p (in Russian).
- [2] A.I. Balashov, M.A. Boev, A.S. Vorontsov. Cables and wires. Fundamentals of cable technology. Moscow: Energoatomizdat, 2009. 470 p. (in Russian)
- [3] A.V. Levanov, E.E. Antipenko. Introduction to chemical kinetics. Moscow: MGU, 2006. 51 p. (in Russian)
- [4] Jean Philibert One and a Half Century of Diffusion: Fick, Einstein, before and beyond. Journal for the Basic Principles of Diffusion Theory, Experiment and Application. 2005. No. 2. - 10 p.
- [5] M.V. Sapunov, “Voprosy kachestva elektroenergii [Questions of the quality of electricity]”, *Novosti elektrotekhniki [News of electrical engineering]*, no. 4, pp. 8–10, 2001 (in Russian).
- [6] I.V. Zhezhelenko, Yu.L. Saenko, T.K. Baranenko, “Istochniki intergarmonik v sistemakh elektrosnabzheniya i metody ikh raschota [Sources of interharmonics in power supply systems and methods for their calculation]”, *Promelektro [Promelectro]*, no. 3, pp. 3–18, 2003 (in Russian).
- [7] S.N. Chizhma, “Metod spektral'nogo analiza intergarmonik v elektroenergeticheskikh sistemakh [Method of spectral analysis of interharmonics in electric power systems]”, *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*, no. 4, pp. 43-47, 2014 (in Russian).
- [8] K.I. Chernichko, A.G. Veselova, “Normirovaniye intergarmonik kak pokazatelya kachestva elektroenergii v rossii i za rubezhom [Rationing of interharmonics as an indicator of the electricity quality in Russia and abroad]”, *Scientific community of students of the XXI century. Technical sciences: Materials XXVII international student scientific and practical conference. No. 12(26). Novosibirsk: Sibak, 2014, 289 p. URL: [http://sibac.info/archive/technic/12\(26\).pdf](http://sibac.info/archive/technic/12(26).pdf) (Accessed: May 05, 2022).*

И.С. Заславский, В.А. Воронин

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОРЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

**Аннотация:** В статье рассматривались различные статистические модели прогнозирования одномерных и многомерных временных рядов. На языке программирования python была построена и описана сезонная модель прогнозирования потребления электрической энергией шахты, с целью оптимальной ее загрузки. Приведены результаты построения сезонной модели прогнозирования. Обученная модель дает возможность актуализировать прогноз на основании вновь поступивших данных.

**Ключевые слова:** прогнозирование, sarima, var, сезонная авторегрессионная интегрированная модель скользящего среднего, угольная шахта.

**Введение.** Одной из самых востребованных задач на сегодня является анализ данных, дающий возможность точнее прогнозировать будущие изменения. Динамически изменяющиеся данные, упорядоченно записанные относительно времени, называются временными рядами. Исходя из анализа этих данных можно прогнозировать поведение объекта при влиянии на него каких-либо параметров. Одной из наиболее распространенных моделей прогнозирования являются статистические модели. Такие модели обучаются на выборке данных и формируют будущие значения с зависимостью от настоящих и прошлых.

Большое распространение получили авторегрессионные модели (AR) со скользящим средним (MA) и интегрированная модель скользящего среднего (Autoregressive Integrated Moving Average — ARIMA [1]). Параметр AR(p) показывает насколько сильно данные коррелируют между собой, коэффициент MA(q) учитывает внезапные сбои в текущем периоде данных. Модель ARMA (p,q) объединяет оба этих параметра. Она учитывает влияние прошлых и настоящих значений, а также прошлых и настоящих ошибок. Такая модель подходит для стационарных временных рядов, т.е. не имеющих тренда и сезонности [2]. Модель ARIMA (p,d,q) приводит нестационарный ряд к стационарному, показывая разность между значениями данных, позволяющую сделать временной ряд стационарным. Параметр I(d), показывает, сколько раз ряд должен быть дифференцирован, чтобы стать стационарным.

Такая модель может использоваться для прогнозирования нестационарного временного ряда мощности и цены на электричество для оптимизации умных микросетей [3]. ARIMA на основании прошлых данных, с учетом ошибок, каждый час предсказывает значения нагрузки и цены на неделю вперед. Это дает основу для оптимизации затрат на энергопотребление микросети, помогает корректно управлять мощностью, регулировать загрузку турбины или степень

заряженности аккумуляторной батареи. Важным параметром работы накопителя электрической энергии является нагрузка. Она важна для определения заряда и разряда батареи. Неправильное прогнозирование нагрузки может привести к аварийному состоянию сети, использованию резервных мощностей. Модели ARMA и ARIMA прогнозируют только один ряд, не учитывая зависимость данных от других рядов, что ограничивает их точность.

Похожей моделью является авторегрессионная модель условной гетероскедастичности (ARCH). Модель прогнозирует ряды с изменчивой дисперсией по прошлым значениям выборки. Значение прогностической модели будет зависеть не только от изменения входных переменных, но и от того, относительно каких данных происходит изменение. ARCH в основном используется для анализа рисков и изменений финансовых временных рядов с изменяющимся доверительным интервалом. Например, когда с течением времени изменяются цены на актив, увеличивается волатильность на фондовом рынке. ARCH(p) моделирует авторегрессию дисперсии, а не основных данных. Продолжением этой модели является обобщенная авторегрессионная гетероскедастичность (GARCH). Эта модель отличается тем, что учитывает ошибки дисперсии, т.е. добавляет скользящее среднее MA(q). Модель используется для прогноза цен на оптовых рынках, из-за высокой волатильности ценовых рядов, изменяющейся во времени. ARCH кластеризует волатильность данных  $s$  и может решать задачу прогнозирования цен на сутки вперед. ARCH и GARCH применимы для прогнозирования будущих цен на нефть, уголь [4]. Недостаток модели в том, что если ценовой ряд зависит от разных факторов, то они моделью не учитываются.

Для описания какого-либо процесса часто мало одного изменяющегося параметра, обычно записываются несколько переменных, зависящих друг от друга. Данные, зависящие не только от прошлых значений, но и от других показателей, называются многомерными. Записанные в одно и то же время, они представляют многомерный временный ряд. Для прогнозирования связанных между собой временных данных используется модель векторной авторегрессии (vector autoregression – VAR). Где каждое значение прогнозируемых данных сравнивается с прошлыми значениями и прошлыми значениями другого ряда. Модель применяется для прогнозирования потребления электроэнергии, где в качестве переменных используется цена на электроэнергию и ее производство [5]. Зависимость между рядами определяется посредством теста Гренджера, где измеряется зависимость изменения величины одного временного ряда на изменения другого временного ряда. Также может применяться тест на взаимосвязь данных Йохансена, для переменных с первым порядком интегрирования. Модель возможно использовать для прогнозирования скорости ветра [6], где в качестве исходных параметров представлены параллельно записанные изменения скорости ветра, температура воздуха, направление ветра, солнечная радиация в разных регионах. VAR-модель позволяет точно прогнозировать изменение скорости ветра в конкретном месте относительно одномерных моделей. На основе этой модели можно прогнозировать работу ветроэлектростанций, что поможет мобильней управлять режимами работы ветроэнергетических установок.

**Постановка проблемы.** Обеспечение гибкой работы предприятий минерально-сырьевого комплекса, управления спросом могут осуществляться с использованием систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), распределенной генерации (РГ), регулированием производства и потребления электроэнергии за счет систем интеллектуального управления. Для повышения точности управления объектом в реальном времени необходимо прогнозировать электрическую нагрузку. Работа угольной шахты характеризуется частыми изменениями режимов работы, частыми остановками и простоями некоторого оборудования, неравномерностью энергопотребления очистных участков.

**Методология.** В качестве объекта исследования выбрана одна из угольных шахт Кемеровской области. Модель прогнозирования подготовлена на основе временных рядов потребляемой мощности в целом по всей угольной шахте. Для прогнозирования использовалась сезонная авторегрессионная интегрированная модель скользящего среднего (SARMA), в связи с тем, что в данных ярко выражена сезонная закономерность нагрузки. Задача решалась в среде программирования python. Для нахождения оптимальных значений параметров SARIMA( $p, d, q$ ) и сезонных ( $P, D, Q, M$ ) использовался поиск гиперпараметров, выполняющий пошаговую проверку минимального значения AIC.

После выбора гиперпараметров модели прогноз строился с помощью компонента SARIMAX библиотеки statsmodel. Библиотека позволяет вывести результат прогнозирования в удобную таблицу оценки правдоподобия. Тренировочные и тестовые данные для модели записаны в порядке 90 к 10 соответственно. Критерий Акаике (AIC), сводящий выбор модели к меньшему числу параметров, оказался равен 1814.

**Результаты и обсуждение.** Результаты прогнозирования электрической нагрузки угольной шахты приведены на рис. 1. Метрики точности результатов прогнозирования показаны в табл. 1.

Таблица 1

Оценка точности модели

Критерий	Оценка
MSE	1,74
MAE	1,02
RMSE	1,32
MAPE	0,16

Наиболее простой в интерпретации оценкой положительных данных, отличных от нуля является оценка средней абсолютной ошибкой (MAPE), так как единицы измерения этого коэффициента удобно переводятся в проценты. Ошибка модели в 16% является допустимой ошибкой для регрессионных моделей прогнозирования.

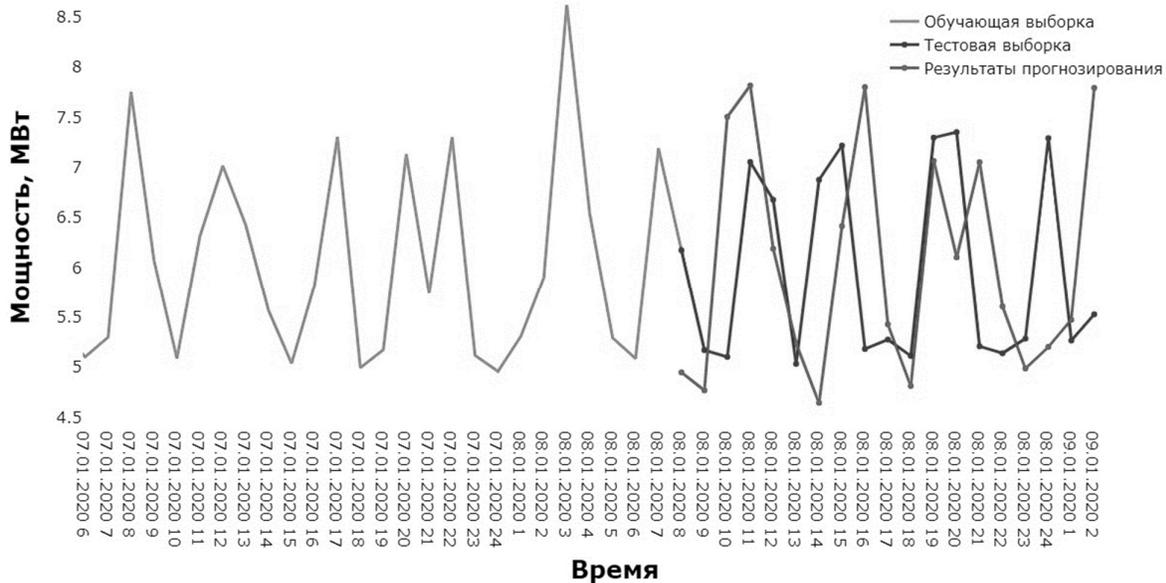


Рис. 1. Визуальная картина прогноза

**Заключение.** В данной работе рассмотрено прогнозирование электрической нагрузки угольной шахты с использованием интегрированной модели авторегрессии – скользящего среднего типа SARIMA.

Результаты расчетов показали, что используемая модель позволяет получить приемлемую точность прогнозирования.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке мероприятий по управлению спросом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021 138/3).

#### Биографический список

1. Практический анализ временных рядов: прогнозирование со статистикой и машинное обучение. : Пер. с англ. — СПб. : ООО “Диалектика”, 2021. — 544 с. : ил. — Парал. тит. англ.
2. **Артамонов, Н. В.** Введение в анализ временных рядов : учебное пособие для вузов / Н. В. Артамонов, Е. А. Ивин, А. Н. Курбацкий, Д. Фантаццини ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Московская школа экономики, Кафедра эконометрики и математических методов экономики. – Вологда : ВолНЦ РАН, 2021. – 134 с.: ил., 1
3. Моделирование и оптимизация в реальном времени умной микросети электропитания района с распределенными источниками энергии, П.М. Ведель, Н.Ю. Овчинникова. НГТУ, Новосибирск, Россия [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-optimizatsiya-v-realnom-vremeni-umnoy-mikroseti-elektropitaniya-rayona-s-raspredeleennymi-istochnikami-energii> (дата обращения: 03.05.2022)
4. Применение моделей arch и garch для анализа объема добычи сырой нефти в ставропольском крае, Димурина Н.Е., аспирант, Северо-Кавказский федеральный

- 
- университет [Электронный ресурс]. – URL: <https://dgpu-journals.ru/wp-content/uploads/2020/01/dimurina.pdf> (дата обращения: 04.05.2022)
5. Применение модели векторной авторегрессии для анализа потребления электроэнергии, Нургуль Маматова, НИУ ВШЭ, Москва, Россия [Электронный ресурс]. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1197/paper21.pdf> (дата обращения: 06.05.2022)
  6. Wind Forecasting Using Kriging and Vector AutoRegressive Models for Dynamic Line Rating Studies, Fulin Fan, Keith Bell, David Hill and David Infield, Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde Glasgow, United Kingdom [Электронный ресурс]. – URL: [https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/44379751/Fan\\_etal\\_PowerTech2015\\_wind\\_forecasting\\_using\\_kriging\\_and\\_vector\\_auto\\_regressive\\_models.pdf](https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/44379751/Fan_etal_PowerTech2015_wind_forecasting_using_kriging_and_vector_auto_regressive_models.pdf) (дата обращения: 06.05.2022)

I.S. Zaslavsky, V.A. Voronin

## USING AUTOREGRESSIVE MODELS TO PREDICT ELECTRIC LOADS OF COAL MINES

Kuzbass State Technical University n. a. T.F. Gorbachev, Russia

**Abstract:** The article considers various statistical models for predicting one-dimensional and multidimensional time series. In the python programming language, a seasonal model for predicting the mine's electrical energy consumption was built and described in order to optimally load it. The results of constructing a seasonal forecasting model are presented. The trained model makes it possible to update the forecast based on newly received data.

**Key words:** forecasting, arima, var, seasonal autoregressive integrated moving average model, coal mine.

**Acknowledgements:** The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 075-03-2021-138/3).

### References

- [1] Practical time series analysis: forecasting with statistics and machine learning. : Translated from English — St. Petersburg : Dialectics LLC, 2021. — 544 p. Il. - Paral. Titus. English.
- [2] Introduction to time series analysis: Textbook for Universities / N. V. Artamonov, E. A. Ivin, A. N. Kurbatsky, D. Fantazzini ; Lomonosov Moscow State University, Moscow School of Economics, Department of Econometrics and Mathematical Methods of Economics. – Vologda : VolSC RAS, 2021. – 134 p.: ill., table
- [3] Real-time modeling and optimization of a smart micro-grid of district power supply with distributed energy sources, P.M. Vedel, N.Yu. Ovchinnikova. NSTU, Novosibirsk, Russia [Electronic resource]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-optimizatsiya-v-realnom-vremeni-umnoy-mikroseti-elektropitaniya-rayona-s-raspredelemnymi-istochnikami-energii> (date of request: [03.05.2022](#))
- [4] Application of the arch and garch model models for analyzing the volume of crude oil production in the Stavropol Territory, N.E. Dimurina, PhD student, North Caucasus Federal University [Electronic resource]. – URL: <https://dgpu-journals.ru/wp-content/uploads/2020/01/dimurina.pdf> (accessed: 04.05.2022)
- [5] Application of the vector autoregression model for the analysis of electricity consumption, Nurgul Mamatova, HSE, Moscow, Russia [Electronic resource]. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1197/paper21.pdf> (accessed: 06.05.2022)
- [6] Wind forecasting using Kriging and vector autoregression models for dynamic linear estimation studies, Fulin Fan, Keith Bell, David Hill and David Infield, Faculty of Electronics and Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK [Electronic resource]. – URL: [https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/44379751/Fan\\_etal\\_PowerTech2015\\_wind\\_forecasting\\_using\\_kriging\\_and\\_vector\\_auto\\_regressive\\_models.pdf](https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/44379751/Fan_etal_PowerTech2015_wind_forecasting_using_kriging_and_vector_auto_regressive_models.pdf) (accessed: 06.05.2022)

А. В. Крюков<sup>1,2</sup>, Д. А. Середкин<sup>1</sup>, И. А. Фесак<sup>1</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТРЕХФАЗНЫХ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Иркутский государственный университет путей сообщения<sup>1</sup>  
Иркутский национальный исследовательский технический университет<sup>2</sup>

**Аннотация:** Электрифицированные железные дороги являются источником электромагнитных полей (ЭМП). Напряженности ЭМП применяемых систем тягового электроснабжения обычно не превышают допустимые для электротехнического персонала значения. Однако, переход к новым системам тяги может вызвать ухудшение электромагнитной обстановки вблизи железных дорог. В статье рассмотрены условия электромагнитной безопасности на трассах электрифицированных железных дорог с перспективными тяговыми сетями трехфазного исполнения. Моделирование осуществлялось с учетом высших гармоник, генерируемых электровозами.

**Ключевые слова:** электромагнитная безопасность, трехфазная система тягового электроснабжения, электромагнитные поля, моделирование.

**Введение.** Важным фактором, ограничивающим пропускную способность железнодорожных магистралей, является применяемая система тягового электроснабжения (СТЭ) [1]. В качестве одного из перспективных направлений развития тяговых сетей (ТС) можно рассматривать переход от однофазных систем к трехфазным [2, 3]. Для реализации трехфазной СТЭ требуется анализ различных факторов, в том числе и условий электромагнитной безопасности [4, 5].

**Методика и результаты моделирования.** Для определения электромагнитных полей можно использовать методы моделирования, реализованные в программном комплексе Fazonord, разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения [6, 7]. Данные методы позволяют определить напряженности ЭМП с учетом гармонических искажений [8]. Для расчета ЭМП с учетом высших гармоник (ВГ) необходима информация о применяемых на подвижном составе схемах выпрямления. Ввиду ограниченности полезного объема локомотива можно ожидать, что для трехфазной ТС будет применяться шестипульсовая мостовая схема выпрямительно-инверторного блока, обладающая хорошим коэффициентом использования трансформаторной мощности при сравнительно низком уровне генерируемых в тяговую сеть гармоник [3].

Моделирование проводилось для межподстанционной зоны (МПЗ), разбитой на два участка по 25 км. Участки приняты двухпутными, а расположение токоведущих частей показано на рис. 1. Питание МПЗ осуществлялось от двух тяговых подстанций. Часть схемы расчетной модели показана на рис. 2.

По участкам осуществлялся пропуск двух поездов массой 6150 т в каждом направлении с межпоездным интервалом в 30 минут. График движения показан на рис. 3. а, а токовые профили представлены на рис. 3. б, в.

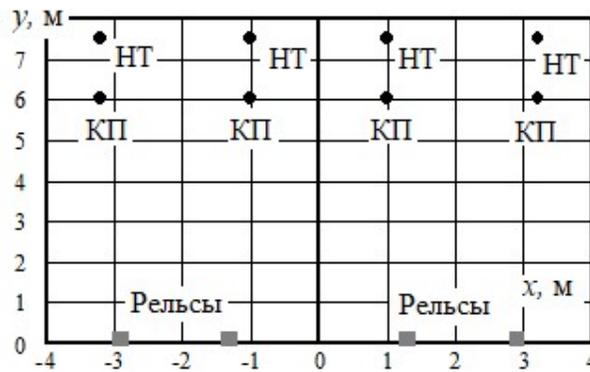


Рис. 1. Расположение токоведущих частей трехфазной тяговой сети

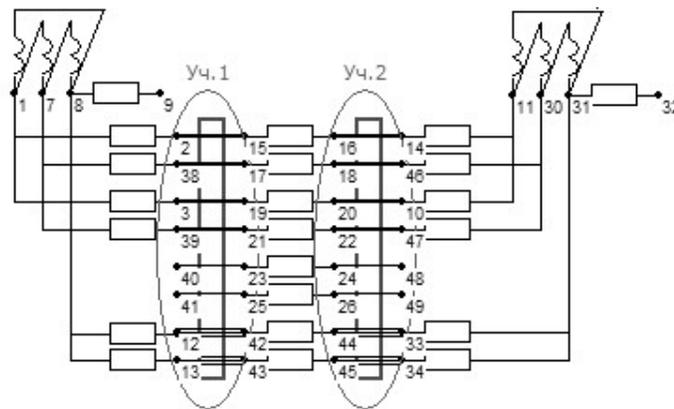
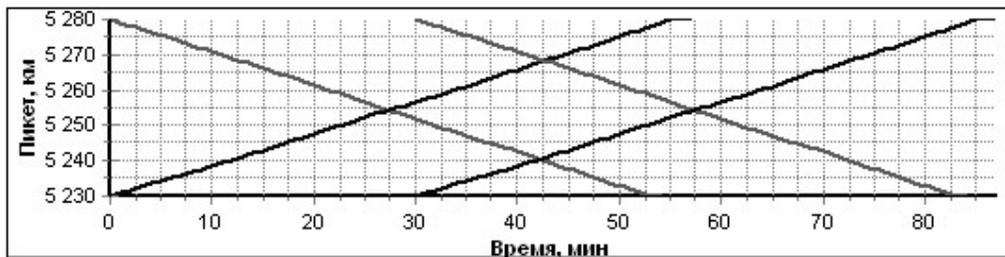
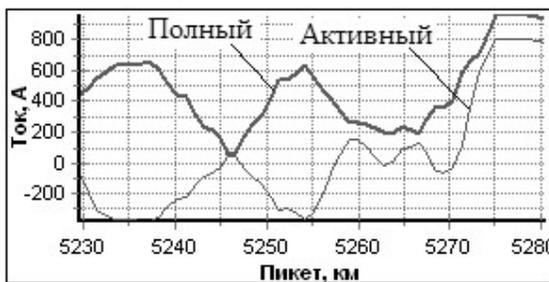


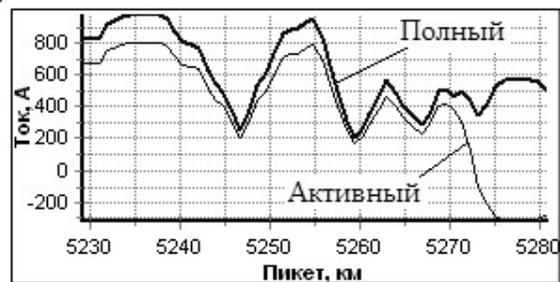
Рис. 2. Фрагмент схемы расчетной модели трехфазной СТЭ



а)



б)



в)

Рис. 3. График движения и токовые профили поездов массой 6150 т:

а – график движения; б – токовый профиль для нечетного пути; в – то же для четного пути

Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 4–8. Для проведения сравнительного анализа проведены расчеты на основной частоте, а также выполнено моделирование для традиционной системы тягового электроснабжения 25 кВ. Напряженности ЭМП

определялись на нормативной высоте 1,8 м.

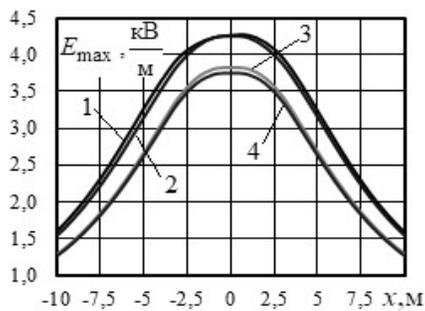
Таблица 1

Результаты моделирования ЭМП при движении поездов

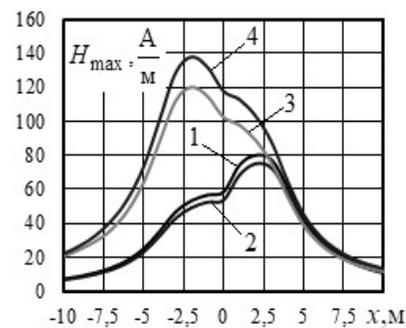
Параметр	без ВГ		с ВГ		Различие, %			
	25 кВ	Трех- фаз- ная	25 кВ	Трех- фазная	Межд у 2 и 3	Межд у 4 и 5	Межд у 2 и 4	Между 3 и 5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\max(E_{\max})$ , кВ/м	3,75	4,25	3,82	4,27	-13,3	-11,8	-1,9	-0,5
$\max(H_{\max})$ , А/м	138,0	75,0	120,1	80,0	45,7	33,4	12,9	-6,7
$\text{mid}(E_{\max})$ , кВ/м	3,53	4,15	3,71	4,17	-17,6	-12,4	-5,1	-0,5
$\text{mid}(H_{\max})$ , А/м	66,9	25,3	66,2	26,6	62,2	59,8	1,1	-5,1

Примечание: ВГ – высшие гармоники

На рис. 4, 5 представлены зависимости максимальных и средних значений напряженностей электрического (ЭП) и магнитного полей (МП) от координаты  $x$  оси, направленной перпендикулярно трассе дороги.

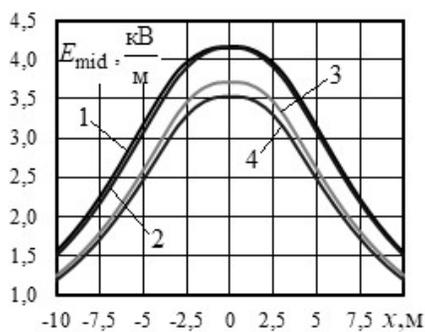


а)

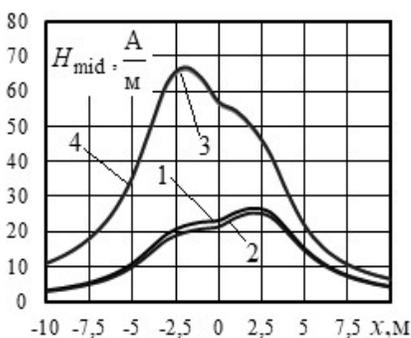


б)

Рис. 4. Максимумы амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей поля: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте



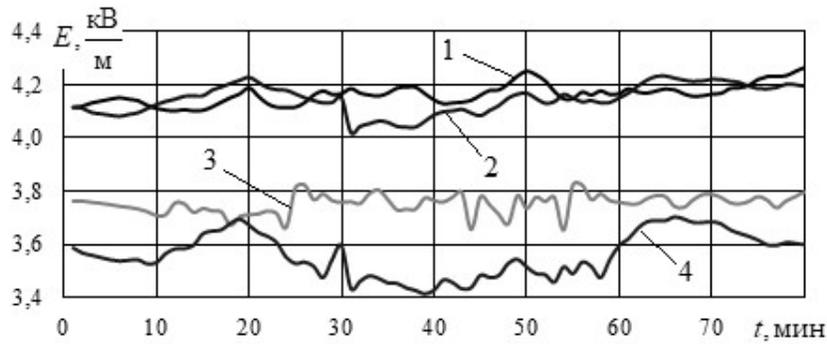
а)



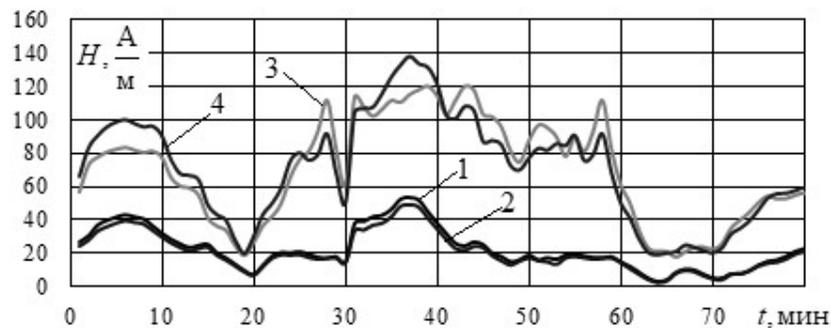
б)

Рис. 5. Средние значения амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте

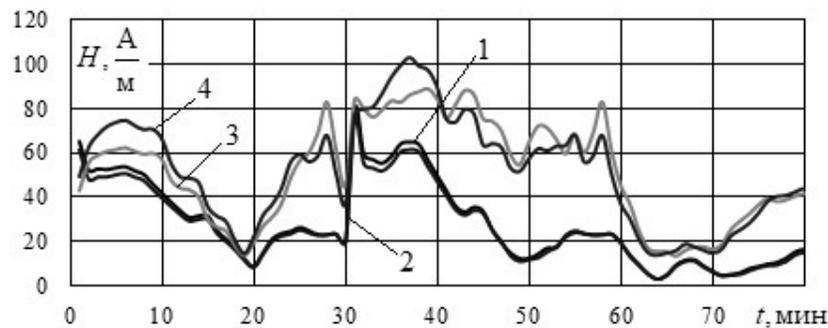
По рис. 4 и 5 определены точки с наибольшими величинами напряженностей. Для этих точек построены временные зависимости, представленные на рис. 6 – 8.



**Рис. 6.** Временные зависимости амплитуд напряженностей ЭП в точке с координатой  $x = 0$  м: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте



**Рис. 7.** Временные зависимости амплитуд напряженностей МП в точке с координатой  $x = -2$  м: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте



**Рис. 8.** Временные зависимости амплитуд напряженностей МП в точке с координатой  $x = 2$  м: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте

На основе результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. По сравнению с типовой СТЭ 25 кВ трехфазная ТС создает повышенные напряженности электрического поля (рис. 4, а, 5, а). Однако уровни МП в трехфазной сети заметно снижаются (рис. 4, б, 5, б).

2. Так как трехфазная ТС по сравнению с однофазной отличается пониженными уровнями гармонических искажений, то при учете ВГ напряженности

электрического поля изменяется незначительно. Максимальные и средние значения напряженности магнитного поля увеличиваются, соответственно, на 7 и 5 %. Изменение аналогичных параметров для электрического поля однофазной тяговой сети 25 кВ составило 11,8 и 12,4 %, а для магнитного – 33 и 60 %.

3. Генерируемые электровозами гармоники не вызывают изменений характера распределения максимальных и средних значений напряженностей в сечениях тяговых сетей, однако могут приводить к заметным вариациям временных зависимостей (рис. 7–8).

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железнодорожного транспорта, оснащённых устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат», проект № АААА-А20-120111690029-4 от 16.11.2020.

#### Библиографический список

1. **Котельников, А. В.** Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А. В. Котельников. - М.: Интекст, 2002. – 104 с.
2. **Аржанников, Б. А.** Трёхфазная система электрической тяги переменного тока: Монография / Б. А. Аржанников. - Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 90 с.
3. **Закарюкин, В. П.** Моделирование режимов трёхфазных систем тягового электроснабжения / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск, 2021. С. 136-142.
4. **Сидоров А. И.,** Украинская И. С. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения / А. И. Сидоров, И. С. Украинская. - Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – 204 с.
5. **Аполлонский, С. М.** Электромагнитная совместимость и функциональная безопасность в электроэнергетике / С. М. Аполлонский. - М.: РУСАЙНС, 2016. – 326 с.
6. **Закарюкин, В. П.** Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. – 273 с.
7. **Буякова, Н. В.,** Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление: монография / Бу Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков.- Ангарск: РИО АНГТУ, 2018. – 382 с.
8. Natalya V. Buyakova, Vasily P. Zakaryukin, Andrey V. Kryukov, Dmitriy A. Sereдкиn. Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks. *Energy Systems Research*, Vol. 4, No. 2, 2021. pp. 70-88.

A. V. Kryukov<sup>1,2</sup>, D. A. Seredkin<sup>1</sup>, I. A. Fesak<sup>1</sup>

## SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF THREE-PHASE TRACTION NETWORKS WITH HARMONIC DISTORTIONS INCLUDED

Irkutsk State Transport University <sup>1</sup>  
Irkutsk National Research Technical University <sup>2</sup>

**Abstract:** Electrified railways are a source of electromagnetic fields (EMF). The EMF strengths of the applied traction power supply systems usually do not exceed the values allowed for electrical personnel. However, the transition to new traction systems may cause deterioration of the electromagnetic environment in the vicinity of railways. The article considers the conditions of electromagnetic safety on electrified iron routes with promising three-phase traction networks. Modeling was carried out taking into account higher harmonics generated by electric locomotives.

**Key words:** electromagnetic safety, three-phase traction power supply system, electromagnetic fields, modeling.

### References

- [1] A.V. Kotelnikov, *E`lektrifikaciya zhelezny`x dorog. Mirovy`e tendencii i perspektivy` [Electrification of railways. Global trends and prospects]*. Moscow., 2002 (in Russian).
- [2] B. A. Arzhannikov, *Trexfaznaya sistema e`lektricheskoy tyagi peremennogo toka: Monografiya [Three-phase AC electric traction system: Monograph]*. Ekaterinburg, 2019. (in Russian).
- [3] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, "Modelirovanie rezhimov trexfazny`x sistem tyagovogo e`lektrosnabzheniya [Modeling of modes of three-phase traction power supply systems]", *Povy`shenie e`ffektivnosti proizvodstva i ispol`zovaniya e`nergii v usloviyax sibiri [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia]*, 2021, Irkutsk, pp. 136-142 (in Russian).
- [4] A. I. Sidorov and I. S. Okrainskaya, *E`lektromagnitny`e polya vblizi e`lektroustanovok sverxy`sokogo napryazheniya [Electromagnetic fields near ultra-high voltage electrical installations.]*. Chelyabinsk, 2008 (in Russian).
- [5] S. M. Apollonskij, *E`lektromagnitnaya sovmestimost` i funkcional`naya bezopasnost` v e`lektroenergetike [Electromagnetic compatibility and functional safety in the electric power industry]*. Moscow, 2016 (in Russian).
- [6] V. P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Slozhnonesimmetrichny`e rezhimy` e`lektricheskix sistem [Complex-symmetric modes of electrical systems]*. Irkutsk: Irkutsk University. 2005 (in Russian).
- [7] N. V. Buyakova, V. P. Zakaryukin and A. V. Kryukov, *E`lektromagnitnaya bezopasnost` v sistemax e`lektrosnabzheniya zhelezny`x dorog: modelirovanie i upravlenie: monografiya [Electromagnetic Safety in Railway Power Supply Systems: Modeling and Control]*. Angarsk, 2018 (in Russian).
- [8] Natalya V. Buyakova, Vasiliy P. Zakaryukin, Andrey V. Kryukov, Dmitriy A. Seredkin. *Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks*. Energy Systems Research, Vol. 4, No. 2, 2021. pp. 70-88.

Р.Ю. Кузьменко, И.И. Таболин, Данилов А.Д.

## ПРОБЛЕМЫ МАЖОРИТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОМ МОДУЛЕ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Воронежский государственный технический университет

**Аннотация:** В статье рассматривается микроконтроллерный модуль, выполняющий функции управления зарядно-разрядным устройством, входящим в состав системы энергообеспечения космического аппарата. Показаны проблемы резервирования сигналов в микроконтроллерном блоке управления и формирования основных команд управления зарядно-разрядным устройством при тестировании аккумуляторной батареи. Разработан метод повышения эффективности мажоритирования сигналов управления при работе с тремя микроконтроллерами.

**Ключевые слова:** система энергообеспечения, микроконтроллерный модуль управления, зарядно-разрядное устройство, резервирование сигналов.

### Введение

На современном этапе развития технологий для накопления энергии в системах энергообеспечения космических аппаратах (СЭС КА) продолжают использовать различные виды аккумуляторных батарей (АБ), такие как никель-водородные, литий-ионные, литий-полимерные и т.п. [1]. Вклад надёжности данных химических накопителей энергии в общую надёжность всей СЭС КА имеет большое значение. Для обеспечения надёжной работы СЭС КА на околоземной орбите (5 и более лет) необходимо в процессе работы АБ выдерживать заданный техническими условиями режим её эксплуатации, а также проводить специальные тестово-восстановительные циклы заряда и разряда [2]. Поэтому точность и надёжность формирования команд управления зарядно-разрядным устройством (ЗРУ) в СЭС КА имеет важное значение. Это особенно актуально при работе СЭС КА в условиях открытого космоса и повышенной вероятности воздействия тяжёлых заряженных частиц.

### Постановка задачи исследования

Целью данного исследования является разработка функциональной схемы микроконтроллерного модуля формирователя команд (МФК), позволяющий выполнять мажоритирование сигналов управления ЗРУ СЭС КА не только по уровням сигналов, но и по временным характеристикам.

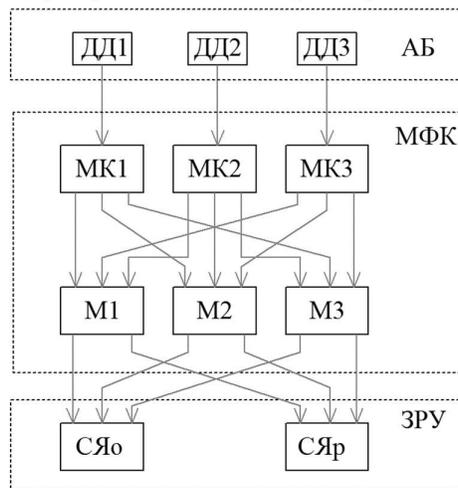
Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- описать основные проблемы формирования микроконтроллерами мажоритированных команд управления на примерах работы АБ в штатном режиме работы и в тестов-восстановительном режиме;
- разработать метод формирования сигналов резервирования команд управления в модуле МФК;
- синтезировать функциональную схему модуля и показать алгоритм работы метода.

**Проблемы формирования мажоритированных команд управления в микроконтроллерном модуле управления**

Аппаратные методы мажоритирования (троирования) для повышения надёжности широко применяются для резервирования различных логических устройств и цифровых микросхем [3]. Подключение микроконтроллеров (МК) по схеме мажоритара может вызвать ряд специфических проблем. Рассмотрим их более подробно.

На рис.1 показана упрощенная функциональная схема аппаратного мажоритирования одного из проводных сигналов управления ЗРУ (например, формирование команды запрета разряда) поступающих с трёх микроконтроллеров модуля МФК на специальные устройства мажоритирования М1-М3.



**Рис.1. Упрощенная функциональная схема мажоритирования сигналов датчиков напряжения модулем МФК**

Расшифровка обозначений на рис.1:

- ДД1, ДД2, ДД3 – датчики, установленные на АБ, в нашем случае датчики напряжения;
- МК1-МК3 – три микроконтроллера, входящие в состав модуля МФК;
- М1-М3 – специализированные аппаратные модули, выполняющие функции мажоритирования сигналов управления и дублирования их;

– ЗРУ – блок зарядно-разрядного устройства, в который входят силовые ячейки основного и резервного каналов (СЯо и СЯр), которыми осуществляет управление модуль МФК с помощью проводных команд.

Логические элементы формируют мажоритированный сигнал (2 из 3) для управления основной и резервной силовой ячейкой (СЯ) ЗРУ СЭС. В силовых ячейках происходит дополнительное мажоритирование сигналов.

Для повышения степени резервирования каждый микроконтроллер получает цифровой сигнал со своей группы датчиков, не связанный с другими. При достижении установленного уровня срабатывания (например, температуры, давления, напряжения и т.п.) хотя бы на двух из трех микроконтроллерах вырабатывается необходимая команда для управления ЗРУ. В случае штатной работы АБ в СЭС КА данное построение резервирования полностью удовлетворяет условиям надёжности работы модуля МФК до одного отказа.

Рассмотрим частный случай работы АБ, а именно, в тесто-восстановительном режиме. В данном режиме тестируемая АБ переходит на специальный алгоритм работы, при этом отключаясь от общей системы управления энергопитанием (недостающая энергия перераспределяется и поступает с других АБ СЭС КА).

На рис. 2 показан фрагмент начала алгоритма тесто-восстановительного цикла на примере никель-водородной АБ [1]. При этом каждый микроконтроллер (МК1, МК2 и МК3) запрограммирован одинаковой программой, то есть уровни срабатывания по датчикам и время задержки у них одинаковы.

Как известно, степень точности измеряемых параметров любых датчиков (напряжения, давления, температуры и т.п.) имеет конечные границы. Например, допуск погрешности измерения напряжения на АБ может составлять до 1 В при диапазоне измерения от 1 до 120 В [4]. Поэтому реальное срабатывание МК1-МК3 по уровню сигнала  $U_{аб}$  мин будет осуществляться не одновременно, а последовательно из-за разбросов параметров датчиков напряжения.

Допустим, в режиме разряда произошло срабатывание по сигналу  $U_{аб}$  мин вначале МК1 (разряд в ЗРУ еще не отключился), а затем МК2 (команда «Запрет разряда» из-за мажоритирования подаётся на ЗРУ). В связи с тем, что в режиме «Запрет разряда» нагрузка от АБ отключается, напряжение на АБ возрастает, что не позволяет МК3 перейти, как и МК1, МК2 в режим заряда через паузу (5 секунд) согласно алгоритму, изображенному на рис. 2.

Несмотря на то, что алгоритм тестирования продолжает нормально работать за счет МК1 и МК2, неотработка команды «Запрет разряда» в МК3 лишает резерва всего модуля МФК (не выполняется условие отработки модулем первого отказа). Помимо этого, происходит рассинхронизация внутреннего счётчика времени выполнения алгоритма каждого из МК1-МК3 от общего времени программы, что может негативно сказаться при отработке какой-либо команды по заданному в программе времени. Для решения полученных проблем была разработана функциональная схема модуля МФК и синтезирован специальный алгоритм, позволяющий работать всем трём контроллерам вместе, не утрачивая при этом эффект резервирования.

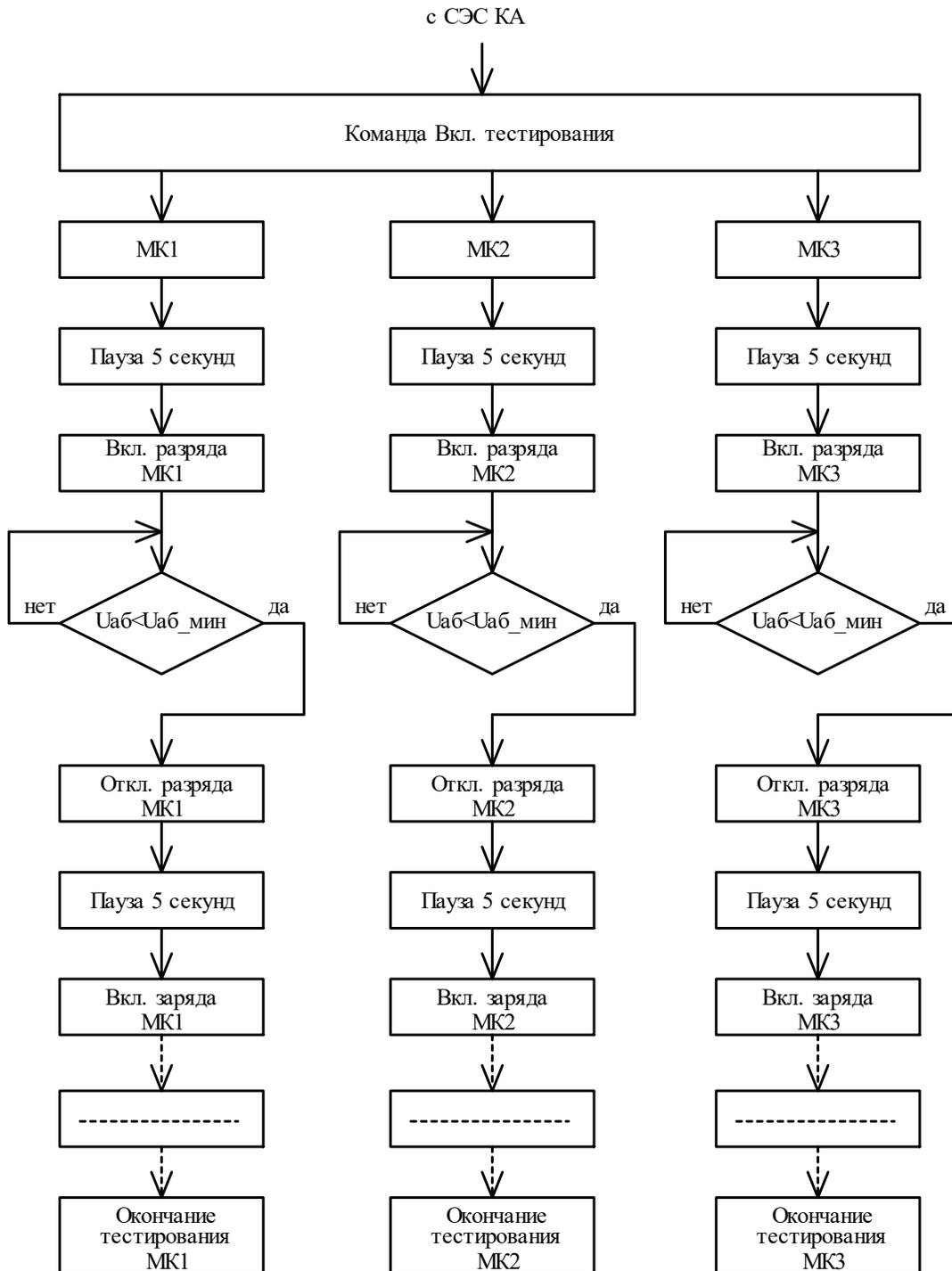


Рис. 2. Фрагмент алгоритма тестирования АБ

### Метод формирования сигналов резервирования команд управления в модуле МФК

Использование микроконтроллеров в автоматизированных системах управления и диагностики позволяет более оптимально подойти к разработке

алгоритмов и аппаратной составляющей, обеспечивающих эффективную работу данных комплексов. На рис. 3 показана обновлённая функциональная схема модуля МФК, обеспечивающая резервирование сигналов управления ЗРУ как при работе АБ в штатном, так и в тесто-восстановительном режиме.

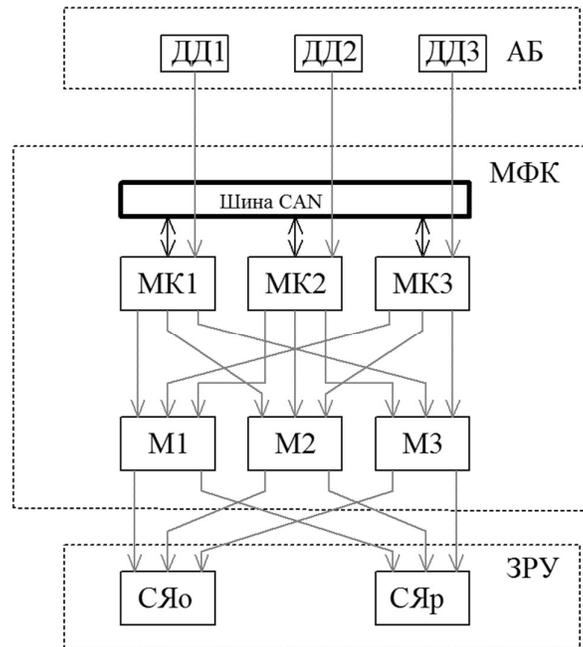


Рис. 3. Схема модуля МФК с шиной CAN

Как видно в сравнении со схемой на рис. 2, добавлена шина интерфейса CAN, позволяющая контроллерам МК1-МК3 обмениваться между собой данными [5]. В нашем случае контроллеры обмениваются друг с другом информацией о наличии специального флага, который появляется при достижении порога  $U_{аб}$  мин.

Алгоритм, показанный на рис. 4, объясняет принцип работы метода на примере работы одного контроллера из трёх.

После прихода с СЭС КА команды «Включение тестирования» (синхронно на МК1-МК3) и отработки паузы (5 секунд) происходит подача команды «Включить разряд». Через некоторое время АБ разрядится и сигнал датчика напряжения АБ  $U_{аб}$  мин поступит, например, сначала на МК1. При этом контроллер МК1 не выработает команду «Запрет разряда» для ЗРУ мгновенно, а перейдёт в режим ожидания и выставит флаг 1.

Как видно из алгоритма (рис. 4), для выполнения следующего шага программы необходимо, чтобы МК1 инициализировал от МК2 или МК3 либо флаг 2, либо флаг 3. В случае, если МК1 сильно «отстал», но получил флаги как от МК2, так и от МК3, то МК1 не ждет сигнала  $U_{аб}$  мин и переходит непосредственно, к выполнению следующего шага алгоритма тестирования (подаёт команду «Заряд»).

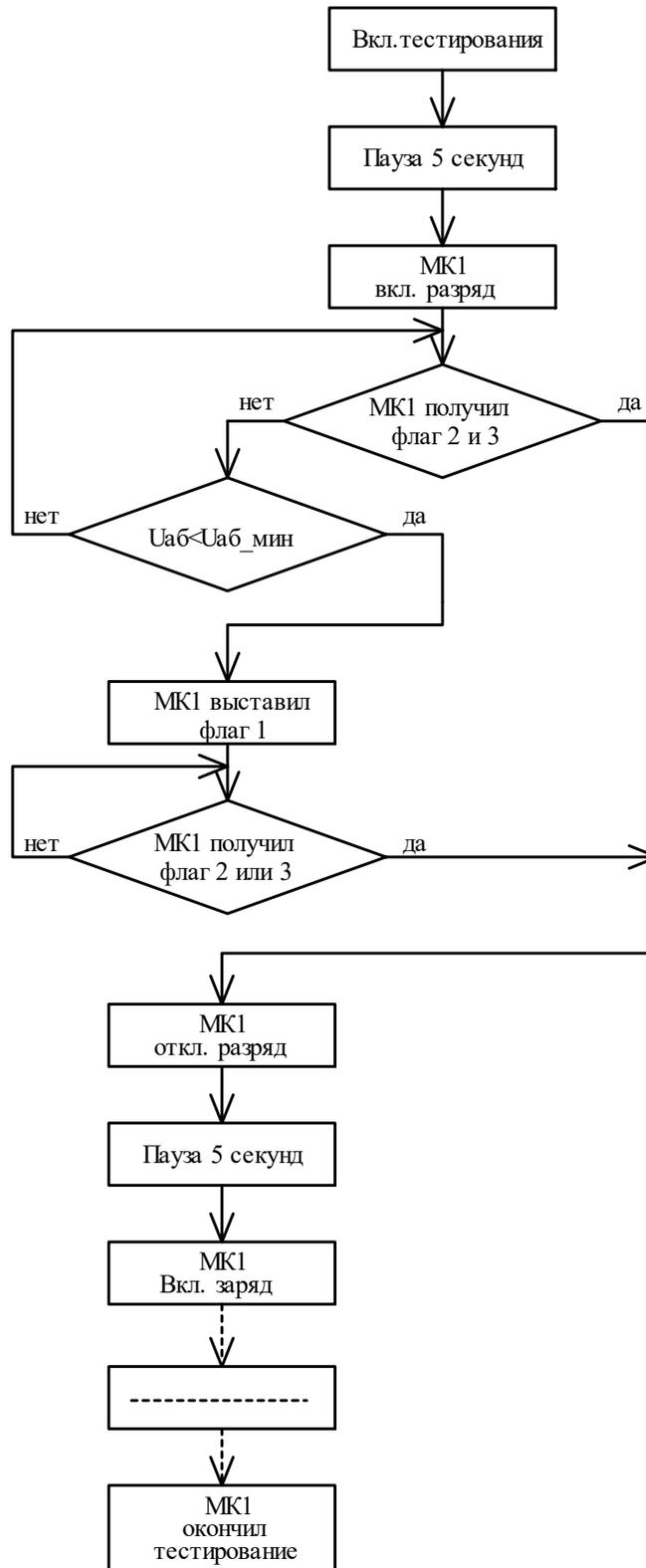


Рис. 4. Алгоритм работы модуля МФК с использованием дополнительных информационных флагов

Следует иметь в виду, что перед выполнением следующего шага программы необходимо сбросить все флаги у МК1-МК3.

### Заключение

Разработанный метод резервирования сигналов на примере использования трёх контроллеров в модуле МФК, позволяет:

- устранить проблему рассинхронизации контроллеров при мажоритировании как по приходящим сигналам с внешних датчиков, так и по общему времени выполнения программы;
- применять данный метод резервирования в других микроконтроллерных системах не только при мажоритировании сигналов 2 из 3, но и 3 из 5.

### Библиографический список

1. **Хромов, А.В.** Литий-ионные аккумуляторные батареи низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики. – Москва, 2016. – Т.152, №3. – С. 20-28.
2. **Данилов, А.Д.** Алгоритмы управления специализированными исполнительными устройствами систем электрообеспечения МКС / А.Д. Данилов, А.О. Тищенко // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. – 2017. – С.126-128.
3. **Тюриу, С.Ф.** Обеспечение радиационной стойкости цифровых микросхем путём резервирования / С.Ф. Тюрин, А.С. Прохоров // Вестник Воронежского государственного университета. - 2017. - №3. - С. 42-54.
4. **Кузьменко, Р.Ю.** Метод повышения точности измерения входных сигналов в микроконтроллерном блоке управления / Р.Ю. Кузьменко, И.И Таболин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2021. - Т.17, №2. - С. 82-86.
5. **Данилов, А.Д.** Автоматизированная система диагностики и контроля для наземной обработки энергоузлов МКС / А.Д. Данилов, Р.Ю. Кузьменко // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. – 2019. – С.147-150.

**R. Y. Kuzmenko, I. I. Tabolin, A.D. Danilov**

**PROBLEMS OF SIGNAL MAJORING IN THE MICROCONTROLLER  
CONTROL MODULE OF THE CHARGER-DISCHARGE DEVICE**

Voronezh State Technical University  
Voronezh, Russia

**Abstract:** The article considers a microcontroller module that performs the functions of controlling a charging and discharging device that is part of the power supply system of the spacecraft. The problems of signal redundancy in the microcontroller control unit and the formation of basic commands for controlling the charging and discharging device when testing the battery are shown. A method has been developed to increase the efficiency of majoring control signals when working with three microcontrollers.

**Key words:** power supply system, microcontroller control module, charging and discharging device, signal redundancy.

**References**

- [1] Khromov A.V. Lithium-ion accumulator batteries for low-orbit spacecraft / A.V. Khromov // Questions of electromechanics. – Moscow, 2016. – V.152, №3. – P. 20-28.
- [2] Danilov A.D. Algorithms for controlling specialized Executive devices of ISS electrical supply systems / A.D. Danilov, A.O. Tichenko // New technologies in research, design, management, and production. – 2017. – P. 126-128.
- [3] Tyurin S.F., Ensuring radiation resistance of digital microchips with redundancy / S.F. Tyurin, A.S. Prokhorov // Bulletin of the Voronezh State University. – 2017. - №3. – P. 42-54.
- [4] Kuzmenko R.U. Method for improving the accuracy of measuring input signals in a microcontroller control unit / R.U. Kuzmenko, I.I. Tabolin, A.O. Tishchenko, A.D. Danilov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2021. – V.17, №2. – P. 82-86.
- [5] Danilov A.D. Automated diagnostic and control system for ground-based testing of ISS power nodes/ A.D. Danilov, R.Y. Kuzmenko // New technologies in research, design, management, and production.- 2019 – P. 147-150.

М.Х. Лахлах, Г.Ч. Чо

## РАСЧЕТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СИНХРОНИЗИРОВАННОМ ВКЛЮЧЕНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

НИУ «МЭИ»

**Аннотация:** В статье рассматриваются переходные процессы при включении высоковольтных кабельных линий, сопровождающиеся возникновением коммутационных перенапряжений. Моделирование переходных процессов выполнено с использованием программного комплекса *EMTP-RV*. Верификация произведена по зарядному току линии. Результаты расчета коммутационных перенапряжений при включении линии на модели сопоставлены с решением системы дифференциальных уравнений. Рассмотрен переходный процесс при синхронизированном включении линии и дана оценка степени ограничения перенапряжений.

**Ключевые слова:** высоковольтные кабели, коммутационные перенапряжения, старение изоляции.

В исследованиях изоляции силовых кабелей и кабельных муфт установлено, что возникновение и развитие электрических дефектов является основной причиной отказов [1]. Результаты показали [2], что развитие электрических дефектов происходит из-за перенапряжений и низкого качества монтажа кабельных соединений. Включение и отключение оборудования приводят к возникновению импульсов перенапряжений, воздействующих на изоляцию кабелей. Как правило, эти импульсы опасны не только для коммутируемых кабелей, но и для подключенного к ним оборудования [3].

Наиболее часто используемые типы при исследованиях моделей кабелей делятся на две категории: модели сосредоточенных параметров, такие как номинальные и точные *pi*-модели, и модели распределенных параметров, такие как постоянные параметры и модели частотно-зависимых параметров. Поскольку модели с заданными параметрами рассчитывают параметры кабелей на сингулярной частоте, их применение достаточно только для стационарных целей [4]. Напротив, вторая группа моделей учитывает частотный эффект. Тем не менее, модель постоянного параметра (*CP-constant parameter*) требует небольшой вычислительной нагрузки, режимы распространения бегущих волн не могут быть представлены на высоких частотах, поэтому модель *CP* рекомендуется только для моделирования линий при анализе задач с ограниченной полосой частот. За последние десятилетия было разработано несколько частотно-зависимых (*FD-frequency dependent*) моделей, которые способны обеспечить точные результаты для всего частотного диапазона [4]. Историческая эволюция различных моделей *FD* приводит к универсальной линейной модели, которая позволяет не только представлять вариации параметров кабеля в фазовой области, но и вписывать параметры непосредственно в фазовую область [5].

В этой статье рассматривается проблема коммутационного перенапряжения при подключении кабельной линии к электрической сети. Приводится расчет и оценка максимального значения перенапряжения и частоты свободных колебаний. Затем определяются факторы, влияющие на перенапряжение. Расчёты показали, что максимальное значение перенапряжения может быть уменьшено путем регулирования фазы включения выключателя. Для ограничения амплитуды переходной составляющей перенапряжения использовалось управляемое пофазное включение линии.

Расчёты проводились для кабельной линии 400 кВ, работающей на холостом ходу. Расчетная электрическая схема приведена на рис. 1.

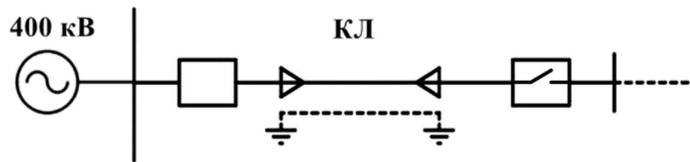


Рис. 1. Однолинейная схема сети 400 кВ с кабельной линией

Для исследования переходных процессов была разработана расчётная модель в программном комплексе *EMTP-RV*: система была представлена в виде источника синусоидального напряжения (400 кВ, 50 Гц) с сопротивлением  $Z_s$ , которое состоит из  $R_s=0,44$  Ом, и  $L_s=0,02$  Гн. Выключатель моделировался идеальным ключом. Электрической дугой в выключателе пренебрегали.

Для моделирования кабельной линии использовалась широкополосная модель, *Wideband (WB)*. В таблице представлены параметры кабельной линии длиной 28 км, а на рис. 2 показана схема ее прокладки [6].

Таблица 1

Параметры кабельной линии

Наименование параметра	Значение
Внутренний, внешний радиус токоведущей жилы, мм	0; 26
Площадь поперечного сечения токоведущей жилы, мм <sup>2</sup>	1600
Внутренний, внешний радиус экрана, мм	58; 59,2
Радиус наружной изоляции, мм	63,5
Удельное сопротивление жилы, Ом·м	$2,84 \times 10^{-8}$
Удельное сопротивление экрана, Ом·м	$2,84 \times 10^{-8}$
Относительная диэлектрическая проницаемость основной изоляции (СПЭ)	2,4
Относительная диэлектрическая проницаемость покровной изоляции (ПЭ)	2,4
Коэффициент потерь изоляции (СПЭ), (ПЭ)	0,0004; 0,0002
Удельное сопротивление грунта, Ом·м	250

Предполагалось, что кабельная линия была непосредственно заглублена на 1,3 м. Использовалась горизонтальная прокладка с просветом 0,3 м, рис. 2. Экраны кабелей заземлены с двух сторон через сопротивления заземляющих устройств подстанций, принятое равными 1 Ом.

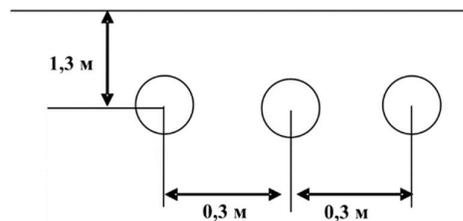


Рис. 2. Схема прокладки кабеля

Модель была верифицирована путем расчета значения зарядного тока линии с использованием *pi*-модели *EMTP* и ручного расчета по параметрам кабельной линии. *pi*-модель линии является частью эквивалентной схемы замещения электроустановки, представленной на рис. 3. На рис. 4 показано хорошее соответствие зарядного тока между *pi* и *WB* моделями. Амплитуда зарядного тока линии при использовании *pi*-модели составила 576,8 А по сравнению с 578,2 А при использовании модели *WB* модели и 573,6 А при ручном расчете. Наибольшее расхождение составило 0,7 %

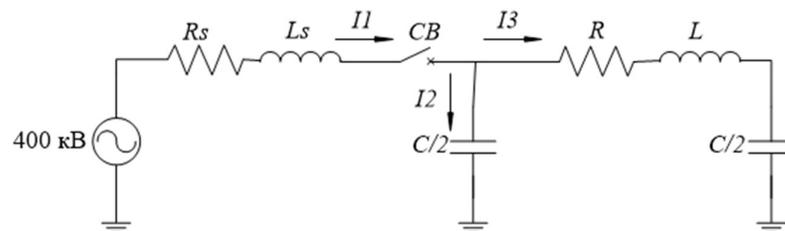


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения электроустановки

В схеме замещения использованы следующие элементы в расчете на длину линии 28 км: сопротивление  $R=0,024$  Ом/км, последовательная индуктивность  $L=1$  мГн/км, шунтирующий конденсатор  $C=0,1977$  мкФ/км.

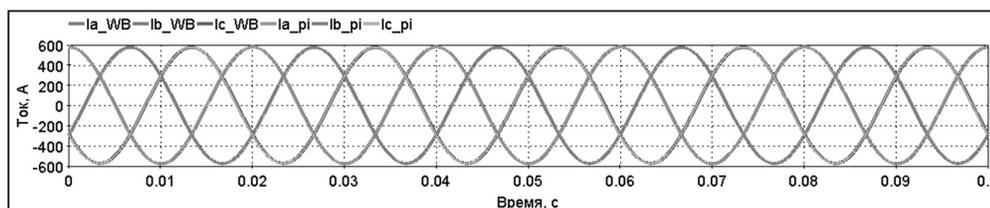


Рис. 4. Зарядный ток линии с использованием *pi*-модели и *WB* модели

Кабельная линия состоит из распределенной емкости, индуктивности и сопротивления. При включении линии изменение тока носит затухающий колебательный характер из-за наличия контура *L-C* и активного сопротивления [3]. С использованием *pi*-модели линии проведен анализ переходного процесса при

включении. Переходный процесс включения линии описывается системой дифференциальных уравнений:

$$V \cdot \sin(\omega t + \theta) = R_s I_2 + L_s \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{C'} \int I_2 dt, \quad (1)$$

$$V \cdot \sin(\omega t + \theta) = R' I_3 + L' \frac{dI_3}{dt} + \frac{1}{C'} \int I_3 dt, \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол включения;  $R' = (R_s + R)$ ;  $L' = (L_s + L)$ ;  $C' = C/2$ .

Решение дифференциальных уравнений показано в (3) и (4), а зарядный ток – в (5).

$$I_2(t) = \frac{V}{\sqrt{R_s^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C'}\right)^2}} \cdot \sin\left(\omega t + \theta - \arctan\left(\frac{\omega L_s - \frac{1}{\omega C'}}{R_s}\right)\right) + C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}, \quad (3)$$

$$I_3(t) = \frac{V}{\sqrt{R'^2 + \left(\omega L' - \frac{1}{\omega C'}\right)^2}} \cdot \sin\left(\omega t + \theta - \arctan\left(\frac{\omega L' - \frac{1}{\omega C'}}{R'}\right)\right) + C_3 e^{-\lambda_3 t} + C_4 e^{-\lambda_4 t}, \quad (4)$$

$$I_1(t) = I_2(t) + I_3(t), \quad (5)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – корни уравнения, а  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – константы, которые связаны с моментом включения и начальными условиями.

Напряжение на передающем конце может быть рассчитано от (6).

$$V_{send}(t) = I_3(t) \cdot \sqrt{R'^2 + \left(\omega L' - \frac{1}{\omega C'}\right)^2} \cdot e^{j\varphi}, \quad (6)$$

где  $\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L' - \frac{1}{\omega C'}}{R'}\right)$ .

Каждый ток в (5) и напряжение в (6) представляют собой сумму принужденной и свободной составляющих. Свободные составляющие в (3) и (4) зависят, в основном, от корней решения и констант. Поскольку корни уравнения определяются параметрами кабеля, амплитуда свободной составляющей зависит от угла включения. Поэтому, если угол включения  $\theta$  можно контролировать, то амплитуда свободной составляющей может быть ограничена. В первый момент, когда происходит включение цепи  $R$ - $L$ - $C$ , происходит заряд емкостей. Резкое увеличение тока приводит к образованию свободной составляющей тока. Амплитуда свободной составляющей будет пропорциональна напряжению фазы в момент включения.

Были рассмотрены два варианта коммутации линии – обычное включение линии и включение путем управляемой коммутации в момент прохождения напряжения фазы через ноль [7]. На рис. 5 показан пример включения выключателя, работающего в режиме управляемой коммутации. Время закрытия устанавливается в соответствии с углом  $\theta$ , обеспечивающим момент прохождения

напряжения фазы через ноль, т.е. фаза *C* закрывается при 0 мс, фаза *B* в 3,3 мс, и фаза *A* в 6,7 мс.

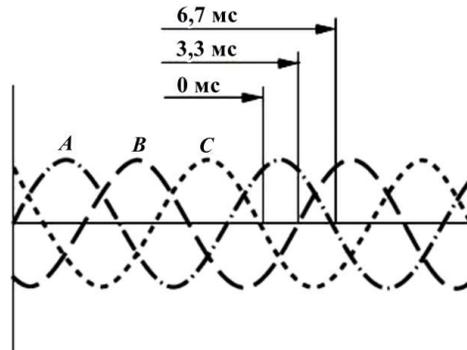


Рис. 5. Моменты включения фаз в режиме управляемой коммутации [7]

Поскольку  $R' < 2\sqrt{L'/C'}$  корни уравнения (4) являются комплексными сопряженными числами и свободные составляющие будут иметь колебательный характер с собственной частотой  $f_n$ , которая является вторым параметром переходного процесса, и его можно вычислить по (7):

$$f_n = \sqrt{\omega_d^2 - \alpha^2}/2\pi, \quad (7)$$

где  $\omega_d$  – резонансная частота;  $\alpha$  – экспоненциальный коэффициент демпфирования, которые задаются (8), (9) соответственно.

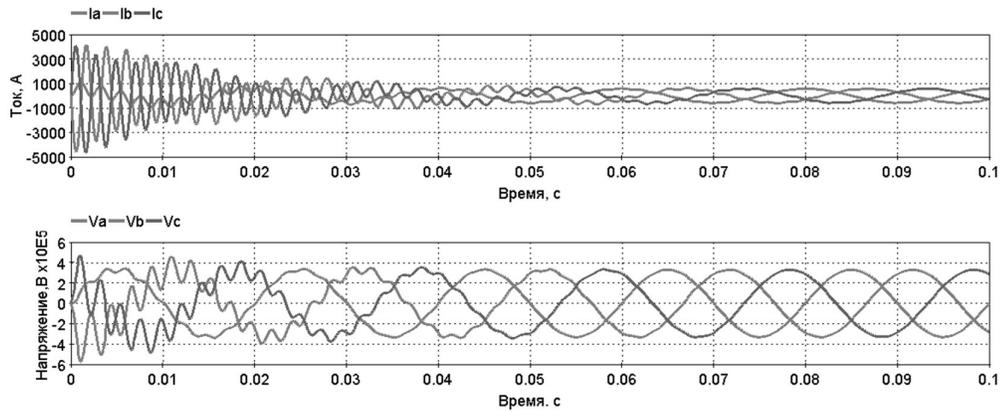
$$\omega_d = 1/\sqrt{L'C'}. \quad (8)$$

$$\alpha = R'/2L'. \quad (9)$$

Теоретические выражения обеспечивают быстрый способ оценки амплитуды свободной составляющей, а также высокочастотных составляющих. Неясно, как эти значения изменяются во времени. Максимальные значения параметров переходного процесса могут быть получены приблизительно.

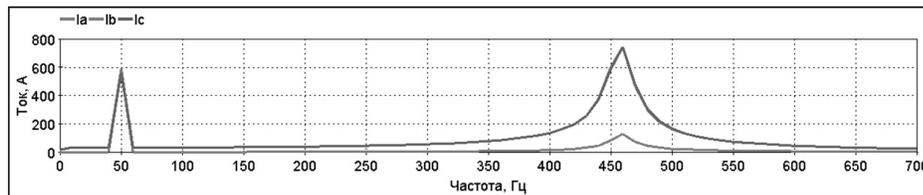
В случае неуправляемой коммутации происходит включение всех трех фаз кабельной линии одновременно. На рис. 6 показаны зарядные токи линии и напряжения, приложенные к основной изоляции, на передающем конце в месте установки выключателя.

Из рис. 6 видно, что формы сигналов токов состоят из принужденной и свободной составляющих с максимальным значением 4687 А для фазы *C*. На рис. 7 приведено разложение кривых токов фаз на составляющие. Из рисунка видно, что принужденная составляющая имеет частоту 50 Гц, а свободная – частоту 460 Гц, рис. 7. Собственная частота свободных колебаний  $f_n$  близка к значению 427 Гц, полученному по формуле (7). Затухание свободной составляющей происходит экспоненциально в течение 90 мс. Это соответствует значению 91 мс, полученному из уравнения (9) как  $1/\alpha$ .



**Рис. 6. Токи и напряжения на передающем конце кабельной линии в режиме неуправляемой коммутации**

Максимальное перенапряжение зарегистрировано на фазе *B* и составляет 579 кВ или 1,77 о.е. Асимметричные перенапряжения приведут к асимметричному старению кабельных клемм и изоляции.

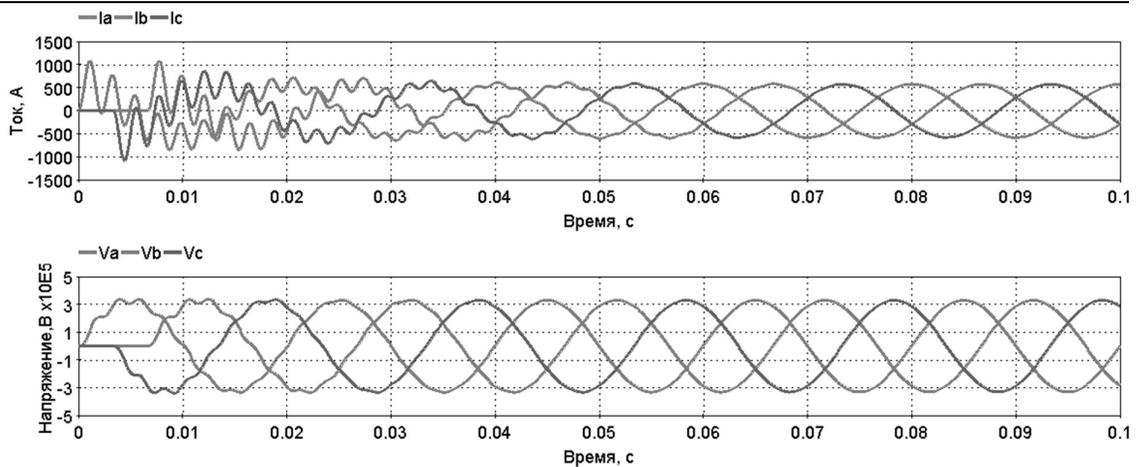


**Рис. 7. Анализ Фурье осциллограмм тока в линии Times NR**

В случае управляемой коммутации определяются углы включения каждой фазы будут отличаться. На рис. 8 приведены осциллограммы мгновенных токов и напряжений на передающем конце кабельной линии.

На рис. 8, моменты включения фаз установлены в соответствии с рис. 5 в 6,7 мс, 3,3 мс, и 0 мс, для фаз *A*, *B* и *C* соответственно. Появляются свободная и принужденная составляющие токов и напряжений. Однако их амплитуда меньше, чем в случае неуправляемой коммутации. Как видно, максимальное амплитудное значение напряжения на всех трех фазах составляет 399,5 кВ или 1,04 о.е. и максимальное значение тока на всех трех фазах составляет 1088 А. Зарегистрированное перенапряжение существенно меньше значения, полученного при неуправляемой коммутации линии.

Это подтверждает влияние мгновенного значения фазного напряжения в момент включения на начальное значение свободной составляющей. Таким образом, одновременное включение всех фаз приводит к большим значениям перенапряжений, приложенных к изоляции кабелей и кабельных муфт.



**Рис. 8. Токи и напряжения на передающем конце кабельной линии в режиме управляемой коммутации**

### Выводы

Произведен анализ переходных процессов при включении кабельной линии на основе системы дифференциальных уравнений. Выполнено моделирование переходного процесса включения линии путем неуправляемой и управляемой коммутации. Проведено сопоставление результатов моделирования с ручными расчетами и оценка наибольших перенапряжений на передающем конце кабельной линии. Подтверждены теоретические предпосылки возникновения перенапряжений определенных параметров и произведена оценка эффективности управляемой коммутации для их ограничения.

Сравнение результатов моделирования двух способов коммутации позволило установить, что синхронизированное включение линии помогает снизить перенапряжения на 180 кВ или 55% по отношению к случаю неуправляемой коммутации линии.

### Библиографический список

1. Zhou, Yuanxiang, et al. "Electrical tree initiation of silicone rubber after thermal aging." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 23.2 (2016): 748-756.
2. Y. Liao et al., "Breakdown failure analysis of 220 kV cable joint with large expanding rate under closing overvoltage," *Engineering Failure Analysis*, vol. 120, November 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.105086.
3. Da Silva, Filipe Faria, and Claus Leth Bak. *Electromagnetic transients in power cables*. London, UK: Springer, 2013.
4. Martinez, Miguel Cervantes. "Accurate and Efficient Simulation of Electromagnetic Transients Using Frequency Dependant Line and Cable Models." PhD diss., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2019.
5. A. Morched, B. Gustavsen and M. Tartibi, "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1032-1038, July 1999, doi: 10.1109/61.772350.
6. T. Ohno, C. L. Bak, A. Akihiro, W. Wiechowski and T. K. Sorensen, "Derivation of Theoretical

- Formulas of the Frequency Component Contained in the Overvoltage Related to Long EHV Cables," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 866-876, April 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2179948.
7. ABB, "Live Tank Circuit Breakers — Buyer's Guide," 4th edition, May 2008.

G. Ch. Cho, M. Kh. Lahlah

## CALCULATION OF SWITCHING OVERVOLTAGES WITH SYNCHRONIZED SWITCHING ON OF A HIGH-VOLTAGE CABLE LINE

National Research University «MPEI», Russia

**Abstract:** This article discusses transients when switching on high-voltage cable lines accompanied by the occurrence of switching overvoltages. Simulation of transient processes was performed using the EMTP-RV software package. Verification was carried out by the charging current of the line. The results of the calculation of switching overvoltages when the line is switched on using the model are compared with the solution of a system of differential equations. The transient process with synchronized line switching is considered and the degree of overvoltage limitation is estimated.

**Key words:** high-voltage cables, switching overvoltages, aging of insulation.

### References

- [1] Zhou, Yuanxiang, et al. "Electrical tree initiation of silicone rubber after thermal aging." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 23.2 (2016): 748-756.
- [2] Y. Liao *et al.*, "Breakdown failure analysis of 220 kV cable joint with large expanding rate under closing overvoltage," *Engineering Failure Analysis*, vol. 120, November, 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.105086.
- [3] Da Silva, Filipe Faria, and Claus Leth Bak. *Electromagnetic transients in power cables*. London, UK: Springer, 2013.
- [4] Martinez, Miguel Cervantes. "Accurate and Efficient Simulation of Electromagnetic Transients Using Frequency Dependant Line and Cable Models." PhD diss., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2019.
- [5] A. Morched, B. Gustavsen and M. Tartibi, "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1032-1038, July 1999, doi: 10.1109/61.772350.
- [6] T. Ohno, C. L. Bak, A. Akihiro, W. Wiechowski and T. K. Sorensen, "Derivation of Theoretical Formulas of the Frequency Component Contained in the Overvoltage Related to Long EHV Cables," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 866-876, April 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2179948.
- [7] ABB, "Live Tank Circuit Breakers — Buyer's Guide," 4th edition, May 2008.

А.А. Лоскутов, И.А. Петров

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕРМИНАЛА ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ SPAC 801 С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА RTDS NOVACOR

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы соответствия вновь создаваемых микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики 6-35 кВ единым требованиям и нормам, представленным в СТО 56947007-29.120.70.241-2017 «Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА». При этом рассматриваются методики и программы проведения функциональных испытаний терминала токовой защиты SPAC 801 с применением программно-аппаратного комплекса RTDS NovaCor.

**Ключевые слова:** микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), испытания, технические требования, программно-аппаратный комплекс RTDS NovaCor.

### Введение

В настоящее время находятся в эксплуатации и разрабатываются различные интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) и микропроцессорные терминалы релейной защиты и автоматики (РЗА). Все вновь создаваемые устройства должны подвергаться тщательной проверке на соответствие единым нормам и требованиям, предъявляемым в СТО 56947007-29.120.70.241-2017 [1]. Объектами регулирования данного стандарта являются совокупность устройств релейной защиты электрических сетей 6 – 750 кВ, а также связанные с ними на уровне управляющих сигналов устройства автоматики.

Однако в действующем стандарте указаны методики и программы проведения испытаний для микропроцессорных устройств релейной защиты сетей 110 кВ и выше. Типовые программы и методики испытаний для устройств РЗА 6-35 кВ отсутствуют.

Следует отметить, что указанный стандарт подразумевает использование симулятора RTDS для проведения испытаний вновь создаваемых устройств РЗА. Данный комплекс позволяет производить полунатурные испытания, объединяя имитационную модель и реальный физический объект посредством обратной связи.

### Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка аппаратно-программной испытательной базы для разрабатываемых устройств релейной защиты и автоматики сетей 6-35 кВ.

Задачами исследования являются разработка имитационной модели, формирование методики и программы проведения испытаний микропроцессорных

устройств релейной защиты и автоматики сетей 6-35 кВ с применением программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor*. Также поставленной задачей является апробирование сформированной методики и программы проведения функциональных испытаний на примере терминала токовой защиты *SPAC 801 (ABB)*.

### **Описанием программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor***

Симулятор *RTDS* – это программно-аппаратный комплекс, предназначенный для имитации в реальном времени электрических, электромагнитных и электромеханических процессов в заданной виртуальной модели энергосистемы [2-6].

Симулятор позволяет осуществлять взаимодействие между виртуальной моделью и внешним физическим устройством с помощью аналоговых и дискретных сигналов, а также цифровых интерфейсов.

*RTDS NovaCor* может использоваться для осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, инженерных расчетов и для применения в образовательном процессе высшей школы. Симулятор предназначен для исследований процессов в традиционных и инновационных электроэнергетических системах постоянного и переменного тока и для проектирования и испытаний устройств, предназначенных для эксплуатации в указанных системах.

Области применения программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor* [2]:

- испытание систем управления и защиты;
- испытания устройств релейной защиты;
- исследование установок силовой электроники;
- интеллектуальные сети и возобновляемые источники;
- исследование энергосистем в целом;
- образовательная деятельность;
- исследования судовых энергосистем;
- программно-аппаратное моделирование с использованием силового оборудования *PHIL*.

### **Методика проведения испытаний с помощью системы моделирования реального времени**

Основные положения методики приведения испытаний с помощью системы моделирования реального времени заключаются в следующем:

- Предварительно, произвести моделирование электрической сети на системе моделирования реального времени (*RTDS NovaCor*) в соответствии со схемой и испытываемой функцией;
- По методике выбора параметров срабатывания (уставок) разработанной предприятием изготовителем испытываемого терминала защиты, произвести расчет и выставление уставок на терминале;
- Подключить каналы токов и напряжений устройства к усилителям;

- Подать с усилителей симметричные токи и напряжения. Проконтролировать соответствие значений подаваемых токов и напряжений на устройстве РЗА;
- Проверить дискретный выход отключения устройства РЗА путем подачи токов или напряжений, превышающих уставку терминала;
- Выполнить программу испытаний;
- Работа испытуемого устройства контролируется по контактам его выходных реле, а также промежуточных сигналов органов защиты, регистрируемых осциллографом терминала или другим осциллографом, позволяющим обеспечить необходимую точность регистрации сигналов.

### Создание имитационной модели

Создание имитационной модели осуществлялось с помощью новейшего программного обеспечения *RSCAD FX*, позволяющего реализовать самые передовые и эффективные методы проверки устройств РЗА [5].

При создании имитационной модели одной из самых важных задач является поиск исходных данных. Исходные данные (табл. 1-3) к исследуемой системе электроснабжения (рис. 1) были использованы из [7].

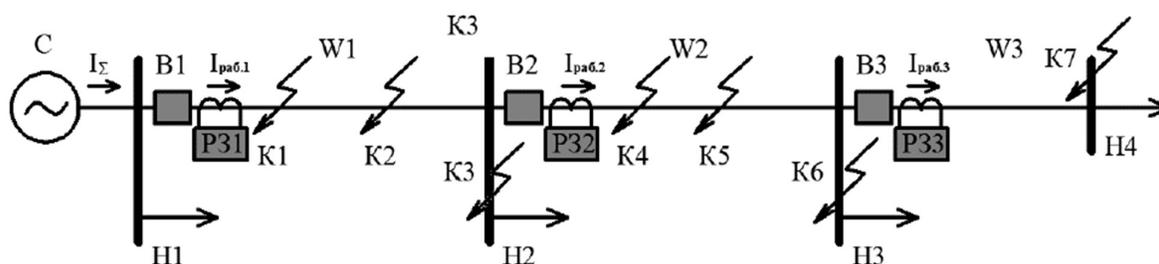


Рис. 1. Исследуемая система электроснабжения

Таблица 1

#### Параметры энергосистемы-источника

Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение
Номинальное напряжение	$U_{ном.}$ , кВ	10,5
Импеданс	$Z_s$ , Ом	$0,4 \angle 86^\circ$

Таблица 2

#### Параметры воздушной линии электропередач

Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение параметра		
		W1	W2	W3
Длина линии	$L$ , км	5	4	3
Марка, сечение	-	АС-120/19	АС-95/16	АС-95/16
Расположение проводом, расстояние между фазами	ф-ф, мм	горизонтальное, 500		
Активное сопротивление постоянному току	$r_o$ , Ом/км	0,244	0,3	0,3

Длительно допустимый ток	$I_{од}, A$	390	330	330
--------------------------	-------------	-----	-----	-----

Таблица 3

Параметры электрической нагрузки

Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение параметра				
		H1	H2	H3	H4	H5
Мощность нагрузки	MBA	1,5	1,7	2	1,4	0,23
cosφ	-	0,94	0,92	0,93	0,91	0,92
Коэффициент самозапуска	$k_{с.з.ап.}(H)$	1,7	1,5	2,2	2,3	1,8
Время срабатывания защиты	$t_{с3}(H)$	1,5	0,8	0,7	0,6	0,4

Разработанная имитационная модель представлена на рис. 2.

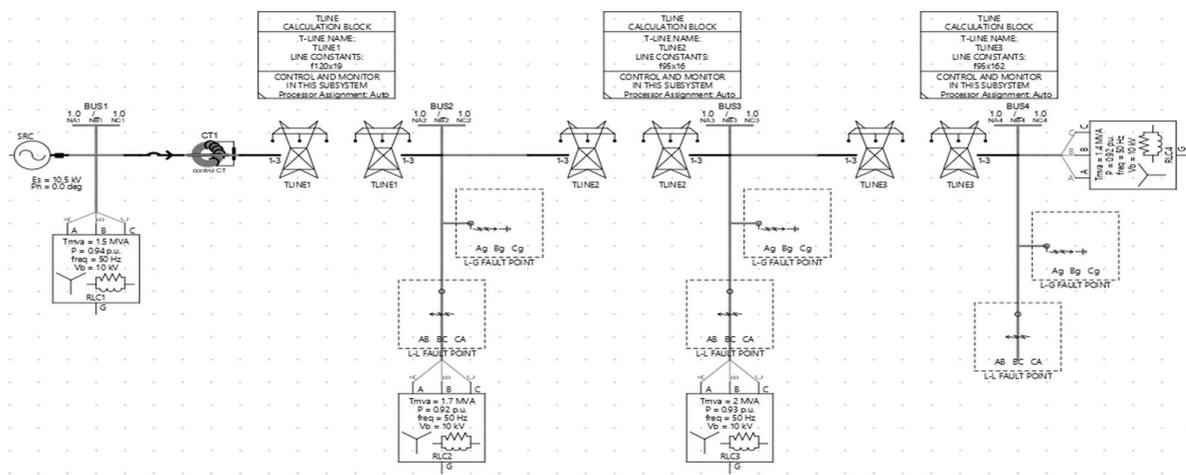


Рис. 2. Имитационная модель сети 10 кВ

Основными элементами имитационной модели (рис. 3) являются трехфазный источник напряжения (*3P Voltage Source*), шины (*Bus*), выключатель (*3P Breaker*), трансформатор тока (*3P CT (Control)*), воздушные ЛЭП (*Transmission Line*), нагрузка (*RLC Load*), короткозамыкатели (*3P Fault*).

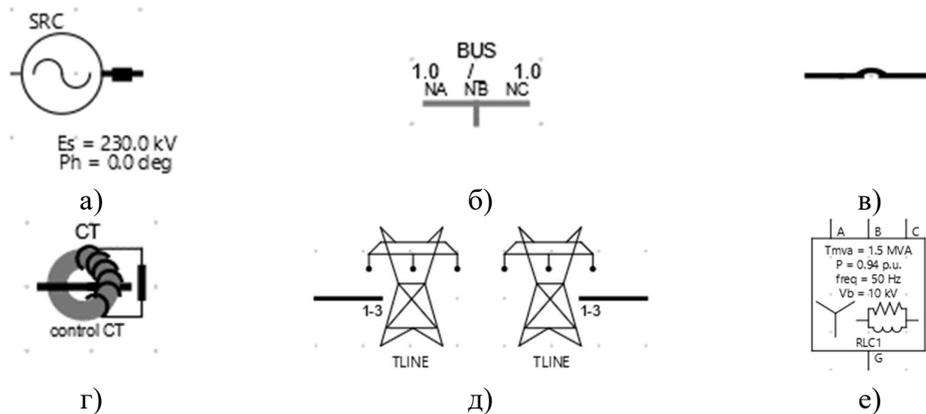


Рис. 3. Основные элементы имитационной модели(начало)

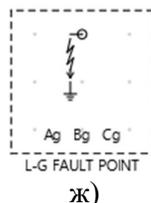


Рис. 3. Основные элементы имитационной модели(окончание):

- а) 3P Voltage Source; б) Bus; в) 3P Breaker; г) 3P CT (Control); д) Transmission Line;  
е) RLC Load; ж) 3P Fault

Элементы *3P Fault* позволяют реализовывать все возможные виды коротких замыканий. Для выбора места и типа короткого замыкания используется схема управления, представленная на рис. 4

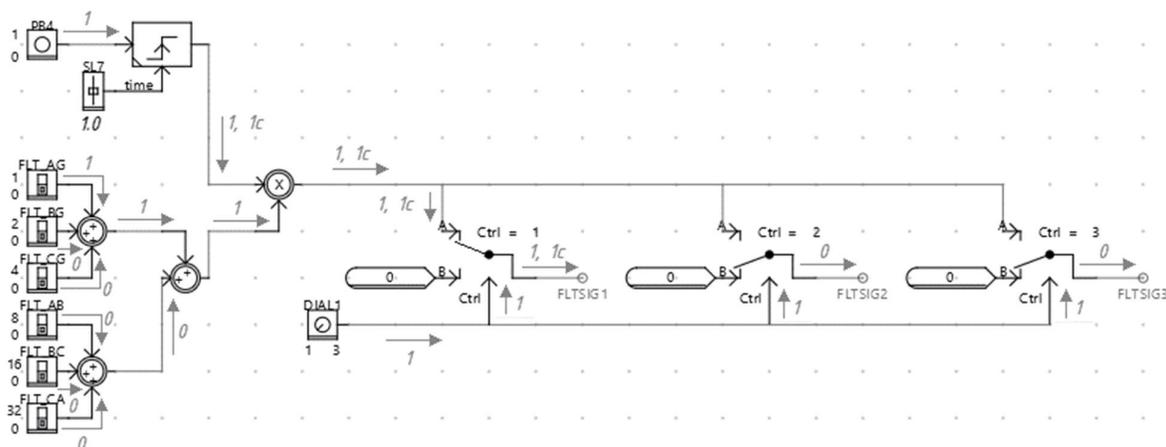


Рис. 4. Схема управления местом и типом повреждения

Рассмотрим принцип работы схемы на примере однофазного КЗ фазы *A* на землю в точке *K1*. При нажатии на *Push Button* на *Pulse Generator* поступает сигнал «1». Длительность сигнала определяется значением, указанным в элементе *Slider* (например, 1 с). Далее сигнал поступает на *Multiplication Block*. Сигнал от элементов *Switch* формируется следующим образом. От элемента *Switch*, отвечающего за однофазное замыкание фазы *A*, на землю поступает целочисленное значение «1». От остальных же поступают целочисленные значения равные «0» (они находятся в положении *OFF*). Далее сигналы поступают в *Summation Block*, где происходит их суммирование. Выходной сигнал первого *Summation Block* равен «1», второго – «0». Далее полученные сигналы поступают в 3-й *Summation Block*. Выходным сигналом этого блока является «1». Сигналы, поступившие в *Multiplication Block*, перемножаются. Полученный сигнал – «1» длительностью 1 с. Выбор места повреждения происходит по следующему принципу. При положении *Dial* №1 на входы «*Ctrl*» всех *Signal Switch* приходит сигнал «1». Положение с *B* на *A* меняет только

первый *Signal Switch*. Сигнал от *Summation Block* поступает на вход *A* и далее подается на *Wire Label*. Итоговый сигнал, подаваемый в блок *3P Fault*, равен «1» и имеет продолжительность 1 с.

Немаловажными являются элемент *GTAO* (рис. 5). Элемент *GTAO* предназначен для записи входных сигналов в плату аналогового выхода высокой точности *GTAO*. Данная плата необходима для передачи вторичных токов, полученных с помощью трансформатора тока, на токовые входы микропроцессорного терминала РЗА.

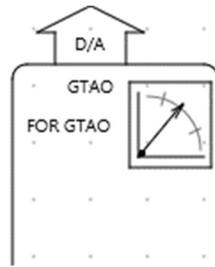


Рис. 5. Пиктограмма элементов *GTAO*

Логика управления выключателем предназначена для управления физическим устройством – микропроцессорным терминалом релейной защиты. За счет платы *GTFPI* осуществляется постоянная обратная связь между *RTDS* и устройством РЗА. Общий вид схемы логики управления представлен на рис. 6.

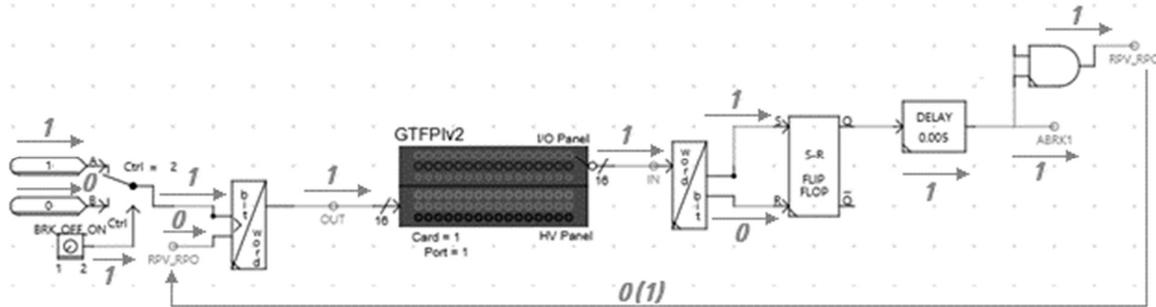


Рис. 6. Логика управления выключателем

Кратко рассмотрим принцип работы схемы. Начальные условия: положение *Dial* - 2. При положении *Dial*, равном 2, от элемента *Signal Switch* на *Bit-to-Word Converter* поступает «1». От *Wire Label* «*RPV\_RPO*» поступает сигнал, равный «0», что соответствует положению выключателя «отключен». Далее элемент *Bit-to-Word Converter* преобразует полученные логические сигналы в целочисленное слово. Происходит преобразование следующим образом (табл. 4).

Таблица 4

Преобразование логических сигналов в целочисленное слово элементом *Bit-to-Word Converter*

Номер входа элемента <i>Bit-to-Word Converter</i>	Вес		Положение		Величина
1	1	·	1	=	1
2	2	·	0	=	0
Контрольная сумма					1

Далее полученный в результате преобразования сигнал поступает в элемент *GTFPI*. Так как полученное элементом *GTFPI* целочисленное значение равно 1, то на плате *GTFPI RTDS* становится активным первый дискретный выход. С первого дискретного выхода сигнал поступает на входы микропроцессорного терминала РЗА «от ключа ВКЛЮЧИТЬ/ОТКЛЮЧИТЬ». После обработки терминалом полученным сигналом, он выдает соответствующие сигналы на отключение/включение выключателя и отправляет их на низковольтную панель платы *GTFPI*. Плата *GTFPI* выдает целочисленное слово в моделируемую схему управления выключателем (в нашем случае «1»). Далее сигнал поступает в *Word-to-Bit Converter*, который преобразует полученный сигнал в несколько логических сигналов. Преобразование происходит следующим образом (табл. 5):

Таблица 5

Преобразование логических сигналов в целочисленное слово элементом *Word-to-Bit Converter*

Вес		Положение		Величина	Номер входа элемента <i>Bit-to-Word Converter</i>
1	·	1	=	1	1
2	·	0	=	0	2
Контрольная сумма				1	

После преобразования на входы элемента *SR Flip Flop* подаются следующие логические сигналы: вход  $S - 1$ ;  $Q - 0$ . Далее происходит формирование сигнала для отключения выключателя в моделируемой схеме, а также формирование сигналов реле положения «включено» (РПВ) и реле положения «отключено» (РПО).

Так как высоковольтная панель платы *GTFPI* имеет на одном выходе как нормально разомкнутый контакт, так и нормально замкнутый, то сигналы РПО и РПВ объединены. Их формирование происходит следующим образом. Если после всех преобразований после элемента *Delay* приходит сигнал 1, то с помощью логического элемента «И» происходит сложение сигналов, поступающих на вход данного элемента (в нашем случае две логические «1»). Далее это значение отправляется в 1-ю часть схемы, где снова отправляется в терминал. Таким образом постоянно осуществляется постоянная обратная связь между терминалом микропроцессорной релейной защиты и симулятором *RTDS NovaCor*. Принцип формирования сигналов логикой управления выключателем представлен на рис. 8.

### Структура испытательной установки

Конфигурация испытательной установки включает в себя ЭВМ с программным обеспечением *RSCAD FX*, *GTAO* модуль вывода аналоговых сигналов, усилитель мощности электрических сигналов *PA460Bi*, вычислительный модуль *RTDS NovaCor*, *GTFPI* модуль интерфейса панелей ввода/вывода, микропроцессорный терминал релейной защиты (рис. 7).

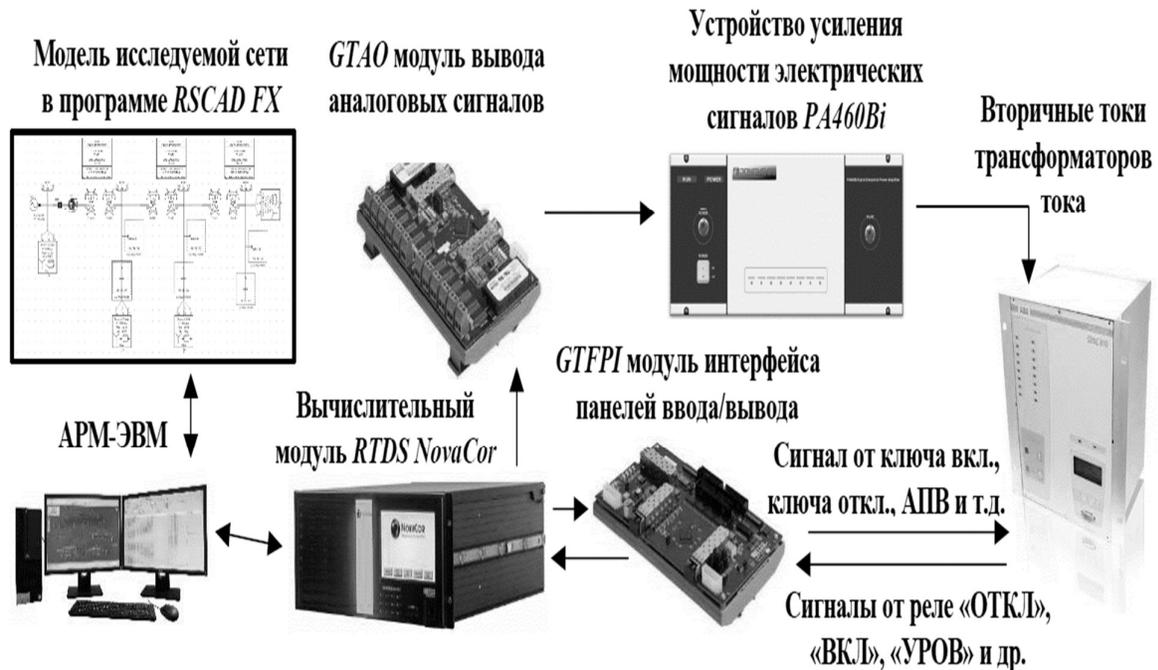


Рис. 7. Структура испытательной установки

Кратко рассмотрим принцип ее работы. ЭВМ с программным обеспечением *RSCAD FX* передает параметры моделируемой сети в вычислительный модуль *RTDS*. Он в свою очередь осуществляет нужные вычисления и выдает необходимые выходные сигналы на модули *GTAO* и *GTFPI*. Далее сигналы подаются на токовые входы и цепи управления микропроцессорного терминала релейной защиты и автоматики.

Микропроцессорное устройство релейной защиты и автоматики реагирует на внешнее воздействие и выдает соответствующие выходные сигналы. Посредством модуля *GTFPI* и панели ввода сигналы передаются в вычислительный модуль *RTDS*, где происходит их обработка и дальнейшая передача на ЭВМ. Таким образом осуществляется постоянная обратная связь между устройством РЗА и имитационной моделью, что позволяет наблюдать полную картину взаимодействий системы и релейной защиты электроэнергетической сетью.

### Программа проведения испытаний

Программа выполнения испытаний нацелена на проверку работоспособности основных и необходимых функций микропроцессорного устройства релейной защиты и автоматики сетей 6-35 кВ: токовая отсечка, токовая отсечка с выдержкой времени, максимальная токовая защита, автоматическое повторное включение и т.д. Пример программы проведения испытаний для некоторых функций терминал РЗА представлен в табл. 6.

Таблица 6

#### Пример программы проведения испытаний

Проверяемая функция	Условия проверки	Ожидаемый результат
ТО	Место установки защиты – подстанция <i>B1</i> ; КЗ <i>ABC</i> и <i>AB</i> на расстоянии, равном 95% первой зоны	Срабатывание первой ступени РЗ - ТО
ТО с выдержкой времени	Место установки защиты – подстанция <i>B1</i> ; КЗ <i>ABC</i> и <i>AB</i> на расстоянии, равном 95% второй зоны	Срабатывание второй ступени РЗ – ТО с выдержкой времени
МТЗ	Место установки защиты – подстанция <i>B1</i> ; КЗ <i>ABC</i> и <i>AB</i> на расстоянии, равном 95% третьей зоны	Срабатывание третьей ступени РЗ - МТЗ
АПВ	Место установки защиты – подстанция <i>B1</i> ; КЗ <i>ABC</i> ( <i>AB</i> ) на расстоянии, равном 95% первой зоны; $t_{кз} = 0,7$ с и 10 с	Срабатывание РЗ при КЗ, срабатывание АПВ

Выполнение функциональных испытаний осуществляется по методике и программе проведения испытаний с нанесением необходимых повреждений в заданных точках.

### Выводы

1. В рамках статьи были рассмотрены основные требования, предъявляемые к микропроцессорным терминалам релейной защиты и автоматике сетей 6-35 кВ, а также представлены методика и программа проведения функциональных испытаний данных устройств; приведено краткое описание программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor* и области его применения; произведено описание имитационной модели.

2. Проведено апробирование описанной методики и программы проведения функциональных испытаний на примере терминала токовой защиты *SPAC 801*. Имитационная модель была смоделирована так, чтобы подвергнуть испытываемый терминал практически всем видам воздействий, характерных для условий его эксплуатации.

3. Применение программно-аппаратного комплекса *RTDS NovaCor* дает возможность реализовывать самые передовые и эффективные методы проверки микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики и преждевременно их устранить. Также симулятор позволяет осуществлять постоянную обратную связь имитационной модели с реальным физическим объектом, что позволяет наблюдать полную картину взаимодействий между ними в полунатурном виде.

4. Применение программно-аппаратного комплекса *RTDS* значительно повышает эффективность проведения функциональных проверок терминалов РЗА, что позволяет преждевременно определять недочеты в логике работы устройства и устранять их.

### Библиографический список

1. СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. – Введ. 28.02.2017. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. – 223 с.
2. **Шамис, М.А.** Novacor – новая аппаратная платформа симуляторов RTDS / М.А. Шамис, Ф. А. Иванов // Энергоэксперт. 2017. №4. – С. 16-17.
3. **Шамис, М.А.** Использование современных симуляторов энергосистем для изучения электротехники и энергетики / ЭнергоStyle. 2017. №3(39) – С. 34-35.
4. Программно-аппаратный комплекс симулятор RTDS на платформе NovaCor. Техническое описание / EnLAB. 2017. – С. 3-13.
5. RSCAD FX. Инструкция по началу работы / EnLAB. 2021. – 33 с.
6. **Лоскутов А. А.** Проведение функциональных испытаний терминала токовой защиты SPAC 801 с применением программно-аппаратного комплекса RTDS Novacor / А.А. Лоскутов, И. А. Петров // В книге: Будущее технической науки. сборник материалов XXI Всероссийской молодежной научно-технической конференции. 2022.
7. **Куликов, А.Л.** Моделирование электроэнергетических систем и алгоритмов РЗ и А в программном комплексе PSCAD/ А.А. Лоскутов, А.Л. Куликов. – НГТУ им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, 2021.

A.A. Loskutov, I.A. Petrov

## FUNCTIONAL TESTS OF THE SPAC 801 CURRENT PROTECTION TERMINAL USING THE RTDS NOVACOR SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX

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

**Abstract:** The issues of compliance of newly created microprocessor relay protection and automation devices 6-35 kV with the uniform requirements and standards presented in STO 56947007-29.120.70.241-2017 "Technical requirements for microprocessor relay protection and automation devices" are considered. At the same time, methods and programs for conducting functional tests of the SPAC 801 current protection terminal using the RTDS NovaCor software and hardware complex are considered.

**Key words:** microprocessor relay protection and automation devices (RPA), tests, technical requirements, hardware and software complex RTDS NovaCor.

### References

- [1] Technical requirements for microprocessor relay protection devices. Introduced Feb 28, 2017. Moscow: PAO «FSK EES» STO 56947007-29.120.70.241-2017., pp. 223, 2017 (in Russia)
- [2] M.A. Shamis, F.A. Ivanov "Novacor – novaya apparatnaya platforma simulyatorov RTDS [Novacor - new hardware platform for RTDS simulators]", *Energoekspert*, pp. 16-17, 2017 (in Russia)
- [3] M.A. Shamis "Ispolzovanie sovremennyh simulyatorov energosistem dlya izucheniya elektrotekhniki i energetiki [Using modern power system simulators to study electrical engineering and energy]", *EnergoStyle*, pp. 34-35, 2017 (in Russia)
- [4] "Programmno-apparatny kompleks simulyator RTDS na platforme NovaCor [Hardware-software complex RTDS simulator on the NovaCor platform]". *EnLAB*, pp. 3- 13, 2017 (in Russia)
- [5] "RSCAD FX. Instrukciya po nachalu raboty [RSCAD FX. Getting Started Guide]". *EnLAB*, pp. 33, 2017 (in Russia)
- [6] A.A.Loskutov, I.A. Petrov, "Provedenie funktsionalnyh ispytani terminala tokovoj zashchity SPAC 801 s primeneniem programmno-apparatnogo kompleksa RTDS Novacor [Conducting functional tests of the SPAC 801 current protection terminal using the RTDS Novacor software and hardware complex]", *Materials "Budushchee tekhnicheskoy nauki. sbornik materialov XXI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [The future of technical science. collection of materials of the XXI All-Russian Youth Scientific and Technical Conference]"*. 2022 (in Russia)
- [7] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov "Modelirovaniye elektroenergeticheskikh sistem i algoritmov RZ i A v programmnom komplekse PSCAD [Modeling of electric power systems and algorithms of RP and A in the PSCAD software package]". 2021 (in Russia)

УДК 621.317.7.785

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_194

**И. В. Малофеев****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ УЧЕТА  
В СЕТЯХ 0,4 КВ МКД**ФГБОУ ВО «Ижевский Государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова»

**Анотация:** В статье затрагивается одна из ключевых проблем современной электроэнергетики, это борьба с нехваткой мощности в сетях и потерями в них. Излагается мысль о применении в многоквартирных домах интеллектуальных приборов учета, для контроля потребляемой максимальной мощности потребителем, а так же контроля потерь в сетях многоквартирных домах (далее МКД). Дается сравнение интеллектуального прибора учета с обычным цифровым прибором. Выделены и описаны характерные особенности применения ИПУ.

**Ключевые слова:** интеллектуальный прибор учета, контроль потребляемой максимальной мощности, контроль потерь в сетях МКД.

Одной из ключевых проблем современной электроэнергетики является борьба с нехваткой мощности и потерями в сетях 0,4 кВ МКД. Нехватка мощности в МКД основана на домах старого образца, которые были разработаны еще в 70-х годах (типовые проекты 464 серия, 468 серия, 85 серия и т. п.), где стояковые провода изготовлены из алюминия, не произведена реконструкция электрической сети подобных домов. В таких домах обусловлены большие потери: из-за ветхости проводки, заниженных сечений (по сравнению с действующим ГОСТ Р 50571.5.52-2011), использования в качестве соединения в распределительных коробках квартир скруток (все соединения проводов должны быть выполнены согласно ГОСТ 10434-82). Данные проблемы можно контролировать за счет интеллектуальных ПУ, так как они могут отслеживать множество параметров сети потребителя.

Отечественные приборостроительные и электротехнические предприятия в непростых экономических условиях смогли освоить и выпускать достаточно широкий спектр современной аппаратуры. К такой аппаратуре относятся отечественные интеллектуальные приборы учета таких фирм как «Миртек групп» и Концерн «Энергомера», Incotex Electronics Group. На сегодняшний день производители интеллектуальных приборов учета могут укомплектовать прибор учета (далее по тексту ПУ) многим функционалом:

- датчик магнитного поля;
- реле управления нагрузкой в цепи тока;
- измерение параметров качества электрической цепи;
- защита от выкручивания винтов кожуха;
- защита целостности корпуса;

- электронная пломба;
- защита от замены деталей корпуса;
- измерение электроэнергии в двух направлениях.

Оснащение встроенным контактором что дополнительно позволяет:

- организовывать отпуск потребителю предварительно оплаченного количества электроэнергии;
- отключать нагрузку при превышении потребляемой мощности выше установленных лимитов.

Данные введения в ПУ позволяют контролировать потребителя на всех этапах потребления электроэнергии (мощности).

Интеллектуальные приборы учета позволяют дополнительно обеспечивать измерение следующих параметров:

- фазного напряжения;
- положительного и отрицательного отклонения напряжения (по ГОСТ 32144-2013);
- фазного тока;
- тока нейтрали
- частоты сети;
- отклонения частоты;
- активной мгновенной мощности;
- реактивной мгновенной мощности;
- полной мгновенной мощности;
- коэффициента мощности.

Приборы учета одного МКД можно объединить в одну структуру. Для этого используются:

- интерфейс CAN (Control Area Network);
- интерфейс RS485;
- радиointерфейс 433 МГц;
- радиointерфейс 868 МГц;
- радиointерфейс 2400 МГц;
- PLC-модем с FSK-модуляцией;
- PLC-модем с OFDM-модуляцией;
- радиointерфейс GSM/GPRS;
- интерфейс Ethernet;
- радиointерфейс WiFi;
- радиointерфейс LTE.

Такой набор интерфейсов позволяет комбинировать их между собой, выбирая наиболее оптимальный вариант для опроса ПУ.

Установка интеллектуальных приборов учета позволит контролировать множество параметров электрической сети МКД, в том числе потребления электроэнергии.

**Библиографический список**

1. ГОСТ Р 50571.5.52-2011/МЭК 60364-5-52:2009. Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки. – Введ. 01.01.2013.
2. ГОСТ 10434-82/МКС 29.120.20. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. – Введ. 01.01.1983.
3. ГОСТ 32144-2013/МКС 29.02033.100. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014.
4. Руководство по эксплуатации РИТМ.411152.010РЭ. Регистрационный номер декларации о соответствии ЕАЭС № RU.АД61.В.01889/19. Государственный реестр средств измерений №61891-15.
5. Руководство по эксплуатации САНТ.41152.107-03 РЭ.

I. V. Malofeev

## THE USE OF SMART METERING DEVICES IN NETWORKS OF 0.4 KV APARTMENT BUILDING

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov"

**Annotation:** The article touches upon one of the key problems of modern electrical energy, it is the fight against the lack of power in the networks and losses in them. The idea of using intelligent metering devices in apartment buildings to control the maximum power consumed by the consumer, as well as control losses in the apartment building networks, is presented. A comparison of an intelligent metering device with a conventional digital instrument is given. The characteristic features of the use of IPU are highlighted and described.

**Keywords:** Intelligent metering device, control of maximum power consumption, control of losses in apartment building networks.

### References

1. GOST R 50571.5.52-2011/IEC 60364-5-52:2009. Low voltage electrical installations. Part 5-52. Selection and installation of electrical equipment. Wiring. - Input. 01/01/2013. (in Russian)
2. GOST 10434-82/MKS 29.120.20. Electrical contact connections. Classification. General technical requirements. - Input. 01/01/1983. (in Russian)
3. GOST 32144-2013/MKS 29.02033.100. Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. - Input. 07/01/2014. (in Russian)
4. Operating manual RITM.411152.010RE. Registration number of the declaration of conformity of the EAEU No. RU.AD61.V.01889/19. State register of measurement tools No. 61891-15.
5. Operation manual SANT.41152.107-03 RE.(in Russian)

С.А. Ситников<sup>1</sup>, Н.М. Шайтор<sup>2</sup>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ОРГАНА СОПРОТИВЛЕНИЯ

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»<sup>1,2</sup>  
Филиал АО «СО ЕЭС» Черноморское РДУ<sup>1</sup>

**Аннотация.** Усложнение и рост электроэнергетических систем приводит к неизбежным проблемам с транспортировкой электрической энергии при выводе оборудования в ремонт, а также к аварийным ситуациям. Решение этих проблем в условиях экономии средств, при строительстве и модернизации электросетевого комплекса, требует разработки новых подходов. Последние тенденции современной энергетики указывают на необходимость развития быстродействующих устройств автоматизации для системного управления режимами. В настоящее время все существующие системы и комплексы автоматики работают по результатам анализа входящих данных в онлайн режиме, так как в их логику уже заложены решения, основанные на предварительной аналитической работе по расчету динамических режимов энергетической системы.

Исходя из анализа расчетов установившихся режимов, выполненных на математической модели энергосистемы Республики Крым и г. Севастополя, сформулированы проблемы работы автоматики, предназначенной для ограничения перегрузки оборудования энергосистемы, и предложены пути её решения. Несовершенство устройств автоматики состоит в их ограниченных способностях к анализу текущей схемно-режимной ситуации в прилегающей сети, подвергающейся перегрузке.

Предложен новый метод решения данной проблемы, основанный на определении сопротивления за сетевым элементом, и расширяющий возможности анализа текущей схемно-режимной ситуации в электрической сети. Использование такого органа позволяет различать причины перегрузки защищаемого электросетевого элемента и сформировать необходимые для разгрузки управляющие воздействия.

**Ключевые слова:** автоматика ограничения перегрузки оборудования, активная мощность, электроэнергетический режим, электрическая сеть, линия электропередач, энергосистема.

В условиях интенсивного развития экономики страны, требующих качественно нового подхода к созданию интеллектуальных электроэнергетических систем, возникает вопрос совершенствования и модернизации существующих энергетических систем и комплексов. В настоящее время, с ростом цифровизации, растет запрос на повышение автоматизации и оперативности существующих устройств и комплексов за счёт разработки активно-адаптивных систем, внедрения новых логических связей и алгоритмов [1].

Развитие мировой энергетики в сторону альтернативных источников энергии, ввиду их нестабильного режима работы, требует дополнительных решений по увеличению пропускных способностей электрических сетей. Эту цель можно достичь путем модернизации и строительства электросетевого и генерирующего

комплекса, а также за счет наращивания устройств и систем режимной и противоаварийной автоматики [2].

### **Постановка проблемы**

С ростом доли генерирующих комплексов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), входящих в состав энергообъединений, в настоящее время возникает ряд проблем, связанных с возможным появлением новых аварийных электроэнергетических режимов. Большую часть задач по предотвращению таких режимов призваны решать локальные комплексы противоаварийной автоматики (ПА), которые по своему назначению и принципу построения являются простыми и надежными устройствами [3].

Однако существующая автоматика не в состоянии полно и правильно оценивать схемно-режимную ситуацию в энергосистеме. Сложности при выборе правильного алгоритма настройки объектового устройства автоматики возникают из-за непостоянства генерации объектов ВИЭ, изменения топологии электрической сети вследствие аварийных отключений и вывода в ремонт оборудования, а также неравномерности графика нагрузок. Вследствие этих факторов, ПА требует большого числа заложенных в нее алгоритмов работы, что приводит к усложнению ее построения и оперативного обслуживания, а также к возможности неправильного срабатывания. Считается, что устройство ПА сработало неправильно, если реализованные управляющие воздействия (УВ) не привели к разгрузке защищаемого элемента сети. Зачастую такие воздействия приводят к утяжелению режима и развитию аварии [4,5].

### **Анализ работы устройства ПА при изменении схемы прилегающей сети**

Озвученная проблема ярко выражена в существующих устройствах автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО). Как известно, устройство АОПО, являясь объектовым, не может решать комплексных задач, требующих анализа режима электрической сети. Зачастую в таких устройствах реализовано несколько алгоритмов работы с большим количеством наборов УВ, выбираемых оперативно при изменении схемы сети и состава генерирующего оборудования [6]. Такая реализация автоматики требует от диспетчерского персонала, руководящего ликвидацией аварии, непрерывного анализа сложившейся схемы сети и скорости принятия решений.

На рисунке 1 приведена схема подстанции (ПС А) автотрансформатор (АТ-1 330/110 кВ) которой защищается устройством АОПО. Данная автоматика по своему назначению и принципу построения является простым и надежным устройством. Терминал автоматики получает замер электрического тока по защищаемому сетевому элементу, напряжение и температуру наружного воздуха (ТНВ) с датчиков, установленных на открытом распределительном устройстве (ОРУ). С помощью полученных данных устройство автоматики рассчитывает направление перетока мощности по защищаемому элементу сети. При превышении уставки по току с учетом направления мощности и достижении заданной выдержки АОПО выдает управляющие воздействия, направленные на разгрузку



может возникнуть режим, при котором АОПО, установленная на ПС А для разгрузки защищаемого сетевого элемента (АТ-1 330/110 кВ), должна будет воздействовать на ДРТ и ОГ ТЭС 1 вследствие наброса мощности с отключенного сетевого элемента ЛЭП 330 кВ ТЭС 1 – ПС 3. Такой послеаварийный режим характеризуется избыточной мощностью ТЭС 1.

На рис. 3 ЛЭП 330 кВ ТЭС 1 – ПС А выведена в ремонт. В случае аварийного размыкания транзита 110 кВ ПС А – ПС Б – ПС В – ТЭС 2 возникает режим, при котором АОПО ПС А для разгрузки защищаемого сетевого элемента должна будет воздействовать на отключение нагрузки потребления узла ПС А. Такой наброс мощности на сетевой элемент АТ-1 330/110 кВ ПС А обусловлен возникшей тупиковой нагрузкой из-за отключения ЛЭП 110 кВ ТЭС 2 – ПС В.

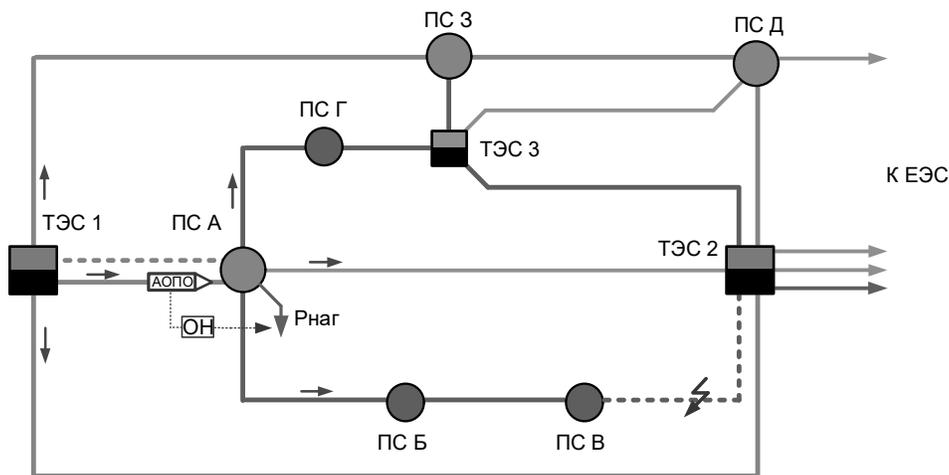


Рис. 3. Схема сети при аварийном размыкании транзита 110 кВ

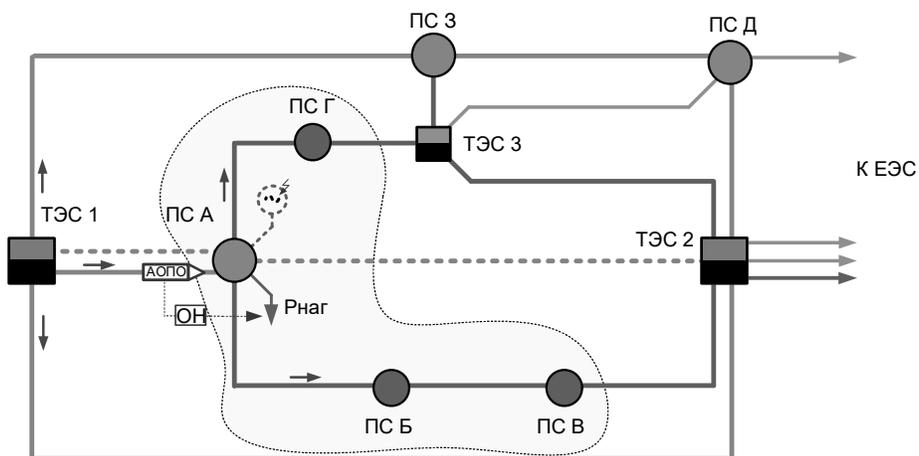


Рис. 4. Аварийное отключение генератора, работающего на шины ПС А

На рис. 4 в ремонте: ЛЭП 330 кВ ТЭС 1 – ПС А, ЛЭП 220 кВ ТЭС 2 – ПС А. В случае аварийного отключения генерирующей мощности в дефицитном районе (сеть 110 кВ, выделенная на рис. 4) возникает режим, при котором АОПО

ПС А для разгрузки защищаемого сетевого элемента АТ-1 330/110 кВ должна будет воздействовать на ОН потребления узла ПС А. Такой послеаварийный режим характеризуется дефицитом мощности в сети 110 кВ (выделенная область).

На рис. 5 ЛЭП 220 кВ ТЭС 2 – ПС А выведена в ремонт, отсутствует генерация на шинах ПС А. В случае аварийного отключения сетевого элемента (АТ-2 330/110 кВ на ПС А), шунтирующего защищаемый элемент, возникает режим, при котором АОПО для разгрузки защищаемого сетевого элемента должна будет воздействовать на ОН. Наброс мощности в рассматриваемом режиме обусловлен изначально высоким уровнем нагрузки в сети 110 кВ и, как следствие, перебором мощности с отключаемого элемента сети на защищаемый, то есть с одного автотрансформатора на другой.

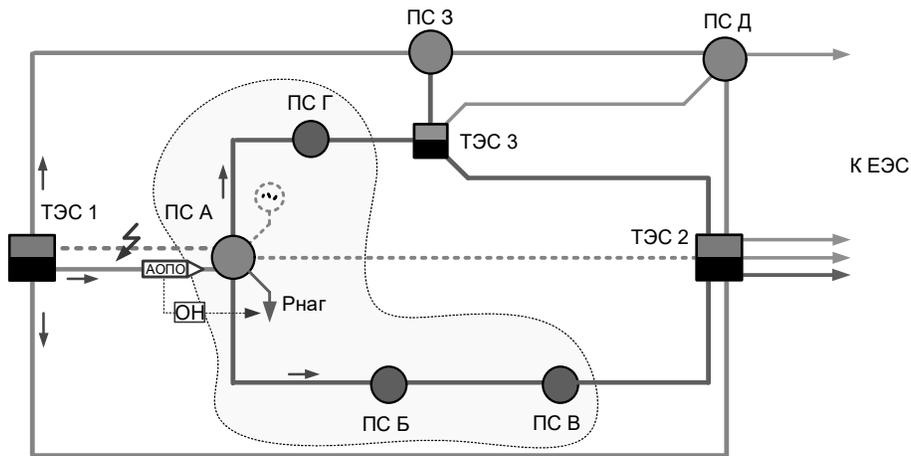


Рис. 5. Схема сети с дефицитом мощности в сети 110 кВ

На рисунке 5 ЛЭП 220 кВ ТЭС 1 – ТЭС 2 и ЛЭП 330 кВ ПС Д – ПС 3 выведены в ремонт.

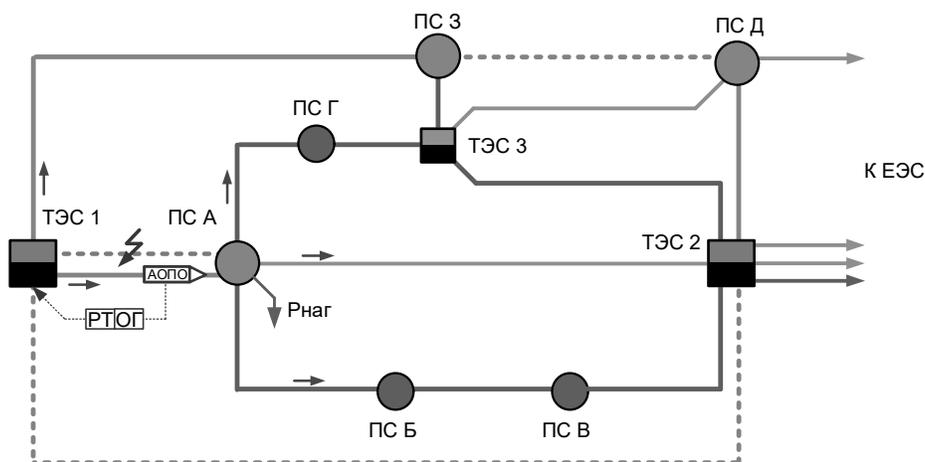


Рис. 6. Схема сети со сниженной пропускной способностью схемы выдачи мощности ТЭС 1

В случае аварийного отключения сетевого элемента, шунтирующего защищаемый элемент, возникает режим, при котором АОПО ПС А для разгрузки

защищаемого сетевого элемента должна будет воздействовать на ДРТ и ОГ ТЭС 1. Наброс мощности на автотрансформатор ПС А в рассматриваемом режиме обусловлен сниженной пропускной способностью схемы выдачи мощности ТЭС 1.

Отметим, что в двух последних вариантах (рисунки 5 и 6) помимо направления перетока активной мощности по АТ-1 ПС А, также совпадает рассматриваемое аварийное отключение. Это говорит о нецелесообразности привязки управляющих воздействий в данном устройстве к фиксации факта отключения сетевого элемента.

Таким образом, комплект АОПО при одинаковом направлении перетока активной мощности, а также при одинаковых уставках по току и времени, должен реализовывать разные УВ в различных ремонтных схемах одной и той же сети, при различных аварийных отключениях. Однако озвученную проблему современные устройства АОПО не решают.

Обеспечить правильную работу автоматики при требуемом алгоритме работы возможно двумя способами. Первый способ состоит в оперативном изменении набора УВ, в зависимости от схемно-режимной ситуации.

Второй способ – получение аварийных сигналов с сетевых элементов, влияющих на режим сети, с одновременной фиксацией ремонтных схем в комплектах автоматики. Такая реализация устройства затрудняет ход ликвидации аварии, приводит к ошибочным действиям оперативного персонала, что влечет за собой неправильную реализацию УВ с последующим утяжелением электроэнергетического режима, а также удорожает автоматику.

Для правильного выбора управляющих воздействий необходимо, чтобы автоматика оценивала режим прилегающей сети и изменение схемы за счет использования других параметров электроэнергетического режима для выбора УВ, помимо величины электрического тока и направления перетока активной мощности. Под режимом работы прилегающей сети в данной работе рассматривается эксплуатационное состояние оборудования линий электропередачи, электрических станций и подстанций, влияющих на загрузку электрическим током рассматриваемого сетевого элемента (автотрансформатор АТ-1 330/110 кВ ПС А).

### **Разработка органа сопротивления**

Озвученные пути решения поставленной проблемы являются громоздкими и дорогими в своей реализации. Во втором случае и вовсе автоматика перестает быть объектовой. Требуется решение задачи, позволяющее однозначно определять причину перегрузки защищаемого сетевого элемента, используя измерения параметров электроэнергетического режима с объекта установки устройства противоаварийной автоматики.

Для начала представим исходную схему, показанную на рис. 2-6 схемой замещения (рис.7). Здесь показаны сопротивления ЛЭП (Z1-Z18), узлы сети (шины подстанций и электростанций) и источники мощности.

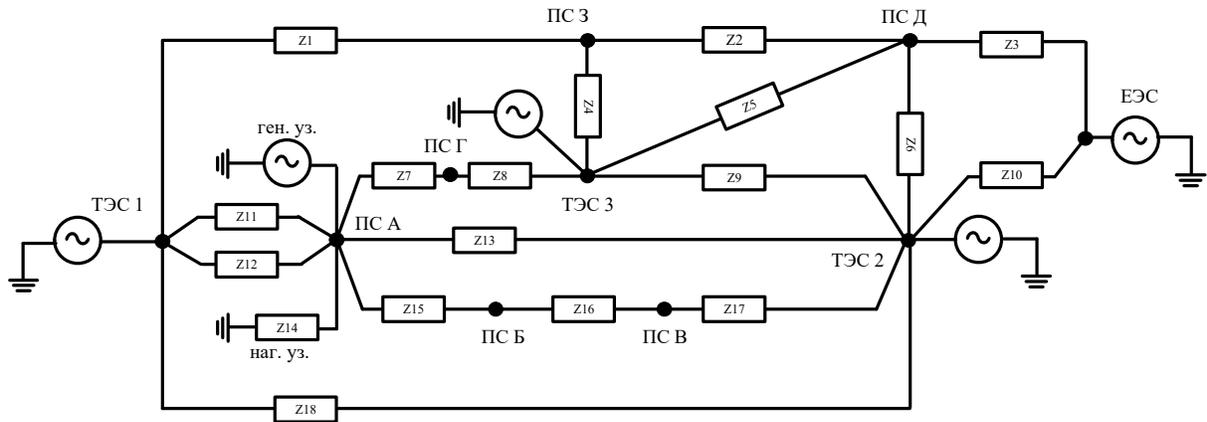


Рис. 7. Схема замещения рассматриваемой сети

С помощью эквивалентирования упростим приведенную выше схему к необходимому виду (рис. 8). На указанном далее рис. 8 представлены сопротивления связей ТЭС 1 и ПС А с энергосистемой ( $Z_b, Z_c$ ), а также связь между объектами ( $Z_a$ ), которая является защищаемым сетевым элементом. Также важным элементом схемы является потребление активной мощности нагрузки узла ПС А ( $Z_d$ ).

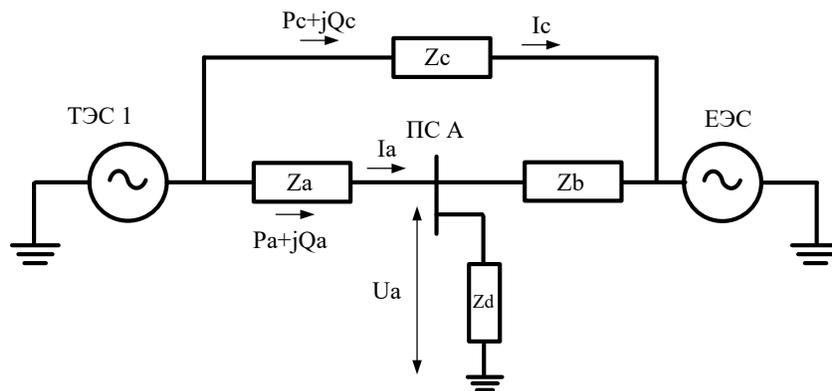
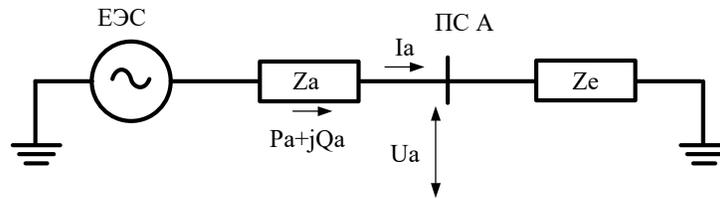
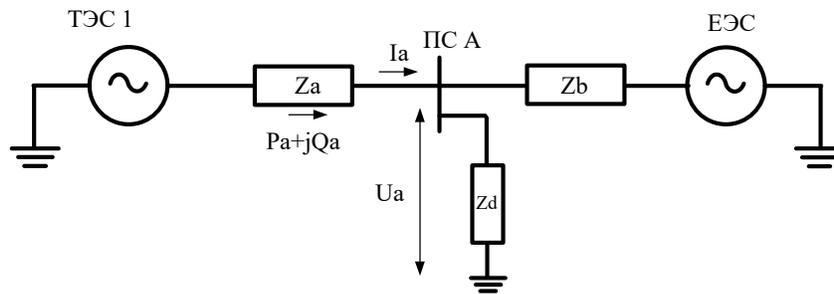


Рис. 8. Упрощенная схема замещения сети

Теперь определим крайние по своей сути режимы: первый – когда за шиной ПС А остается тупиковая нагрузка ( $Z_b = \infty$ ) и второй – когда ТЭС выдает свою мощность только в шины ПС А ( $Z_c = \infty$ ). Отмеченные схемы приведем далее (рис. 9, 10). На рис. 9  $Z_e$  является эквивалентным сопротивлением дефицитной сети 110 кВ за защищаемым сетевым элементом.

Остальные возможные режимы будут характеризоваться множеством наборов схем с различным соотношением сопротивлений  $Z_b$  и  $Z_c$ . Также важным фактором, влияющим на загрузку защищаемого элемента, будет соотношение величины генерируемой активной мощности ТЭС 1 и потребляемой мощности узла ПС А ( $P_{\text{наг}}$ ).


 Рис. 9. Схема замещения сети при  $Z_d = \infty$ 

 Рис. 10. Схема замещения сети при  $Z_c = \infty$ 

Используя величины параметров электроэнергетического режима, получаемые путем замера на ПС А (переток активной и реактивной мощности, величина электрического тока и напряжения) можно рассчитать эквивалентное сопротивление сети за шинами ПС А (для рис. 9 -  $Z_e$ , для рис. 10 эквивалент сопротивлений  $Z_b$  и  $Z_d$ ). Величина сопротивления, его активная и реактивная составляющие будут характеризовать режим сети в разных схемно-режимных ситуациях.

Полное сопротивление за защищаемым сетевым элементом:

$$Z = \frac{U_a}{\sqrt{3} \times I_a}, \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление за защищаемым сетевым элементом:

$$R = \frac{Z \times P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q_a^2}}, \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление за защищаемым сетевым элементом:

$$X = \frac{Z \times Q_a}{\sqrt{P_a^2 + Q_a^2}}, \text{ Ом.}$$

Описанный ранее метод расчета сопротивления сети требуется использовать для настройки органа сопротивления в устройстве автоматики ограничения перегрузки оборудования. Для этого необходимо заложить в логику работы устройства дополнительный орган сопротивления с заданными зонами. На рис. 11 приведена область сопротивлений за защищаемым сетевым элементом в момент его перегрузки электрическим током. Каждая зона (I, II, III) характеризует причину загрузки защищаемого элемента сети.

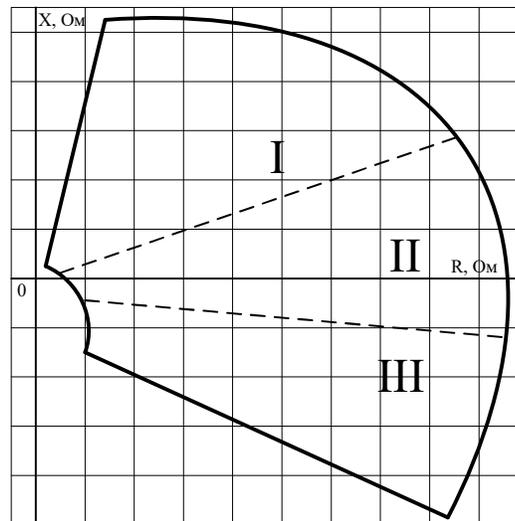


Рис. 11. Область сопротивлений с тремя зонами

Если в логику автоматики заложить привязку определенного алгоритма ее работы в зависимости от нахождения измеряемого сопротивления в зоне (I, II, III), то получится универсальное устройство, адаптирующееся под любой режим работы сети. К примеру, при работе органа I – зоны реализуются УВ на ОН, при работе органа II – зоны реализуются УВ на ОН и ДРТ, при работе органа III – зоны реализуются УВ на ДРТ и ОГ. При этом если дозировать управляющие воздействия, то в процессе работы ПА возможна последовательная работа сначала II – зоны, а затем I – зоны, вследствие изменения сопротивления. Такая работа автоматики повышает эффективность УВ, то есть снижает эффект перерегулирования (уменьшается число отключенных потребителей или количества генераторов), воздействия от автоматики становятся более сбалансированными.

Таким образом, выданные управляющие воздействия будут приводить к разгрузке сетевого элемента и ускорять время ликвидации аварии.

### Выводы

На основе анализа работы противоаварийной автоматики в различных ремонтных схемах энергосистемы выявлены проблемы объектовых устройств автоматики, которые не выполняют своих функций при авариях на в электрической сети связанных с отключением ЛЭП и электросетевого оборудования.

Предложен путь решения озвученной проблемы, заключающийся в оснащении устройства АОПО дополнительным органом сопротивления, предназначенным для оценки аварийного возмущения в прилегающей сети.

Дополнительный орган позволяет предотвратить неправильную работу устройства противоаварийной автоматики, упростить ее оперативное обслуживание и сократить время ликвидации аварии. Также такое решение дает возможность реализовать в одном устройстве несколько логик работы автоматики и, как следствие, предотвратить повреждение оборудования и повысить пропускную способность электрической сети.

### Библиографический список

1. **Ясько, Д.В.** Повышение эффективности работы автоматики ограничения перегрузки оборудования воздушных линий электропередач/ Д.В. Ясько, В.А. Кизин // Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. с. 133-136.
2. **Ситников, С.А.** Анализ проблем энергосистемы с высокой долей солнечной генерации / С. А. Ситников, Н.В. Шайтор, А.В. Горпинченко, Е.А. Дубков // Вестник ИжГТУ имени 88 М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. с. 87 -95. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-87-95.
3. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. – 2020. – № 7. – С. 12–21. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-7-12-21.
4. Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок "Методические указания по устойчивости энергосистем"/ Москва – 2018 г. – 16 с.
5. Правила технологического функционирования электроэнергетических систем. /Москва – 2018 г. – 108 с.
6. СТО 59012820.29.020.002-2018. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования. Утв. приказом ОАО «СО ЕЭС» от 02 апреля 2018 г. № 79
7. СТО 59012820.29.020.004-2018. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика. Нормы и требования. Утв. приказом ОАО «СО ЕЭС» от 30 марта 2018 г. № 75

S.A. Sitnikov<sup>1</sup>, N.M. Shaitor<sup>2</sup>

## IMPROVEMENT OF THE AUTOMATION DEVICE FOR LIMITING EQUIPMENT OVERLOAD THROUGH THE USE OF A RESISTANCE ORGAN

Sevastopol State University<sup>2</sup>  
Branch of JSC "SO UPS" Chernomorskoe RDU<sup>1</sup>

**Annotation.** The complexity and growth of electric power systems leads to unavoidable problems with the transportation of electric energy during the withdrawal of equipment for repair, as well as to emergency situations. Solutions to these problems in terms of cost savings, during the construction and modernization of the electric grid complex, require the development of new approaches. Recent trends in modern energy indicate the need for the development of high-speed automation devices for system mode control. Currently, all existing automation systems and complexes work according to the results of the analysis of incoming data in online mode, since their logic already includes solutions based on preliminary analytical work on the calculation of dynamic modes of the energy system.

Based on the analysis of calculations of steady-state modes performed on a mathematical model of the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol, the problems of automation designed to limit the overload of power system equipment are formulated and ways of solving it are proposed. The imperfection of automation devices consists in their limited abilities to analyze the current circuit-mode situation in the adjacent network that is being overloaded.

A new method for solving this problem is proposed, based on determining the resistance behind the network element, and expanding the possibilities of analyzing the current circuit-mode situation in the electrical network. The use of such a body makes it possible to distinguish the causes of overload of the protected power grid element and to form the control actions necessary for unloading.

**Keywords:** automation of equipment overload limitation, active power, electric power mode, electric grid, power transmission line, power system.

### References

1. Yasko D.V., Kizin V.A. Improving the efficiency of automation for limiting overload of overhead power transmission equipment// Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference. 2017. pp. 133-136.
2. Sitnikov S. A., Shaitor N.V., Gorpinchenko A.V., Dubkov E.A. Analysis of problems of the power system with a high proportion of solar generation// Bulletin of IzhSTU named after 88 M. T. Kalashnikov. 2021. vol. 24, No. 1. pp. 87-95. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-87-95.
3. Voropai N.I. Directions and problems of transformation of electric power systems // Electricity. – 2020. – No. 7. – pp. 12-21. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-7-12-21.
4. Requirements for ensuring the reliability of electric power systems, reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations "Methodological guidelines for the stability of power systems"/ Moscow – 2018 – 16 p
5. Rules of technological functioning of electric power systems. /Moscow – 2018 – 108 p .
6. STO 59012820.29.020.002-2018. Relay protection and automation. Automatic emergency management of power systems modes. Automation devices for limiting equipment overload. Norms and requirements. Approved by the Order of JSC "SO UES" dated April 02, 2018 No. 79
7. STO 59012820.29.020.004-2018. Relay protection and automation. Automatic emergency management of power systems modes. Emergency automation. Norms and requirements. Approved by the Order of JSC "SO UES" dated March 30, 2018 No. 75

---

**Секция 4. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

---

УДК 621.311.1

DOI: 10.46960/47355565\_2022\_209

**О.А. Бурмакин, В.В. Гуляев, Г.А. Андреев, К.А. Крупин****МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK**

Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация:** В статье рассмотрена модель валогенераторной установки на основе синхронного генератора с преобразователем частоты. Приведена имитационная модель установки и результаты моделирования в различных режимах работы судовой электроэнергетической системы.

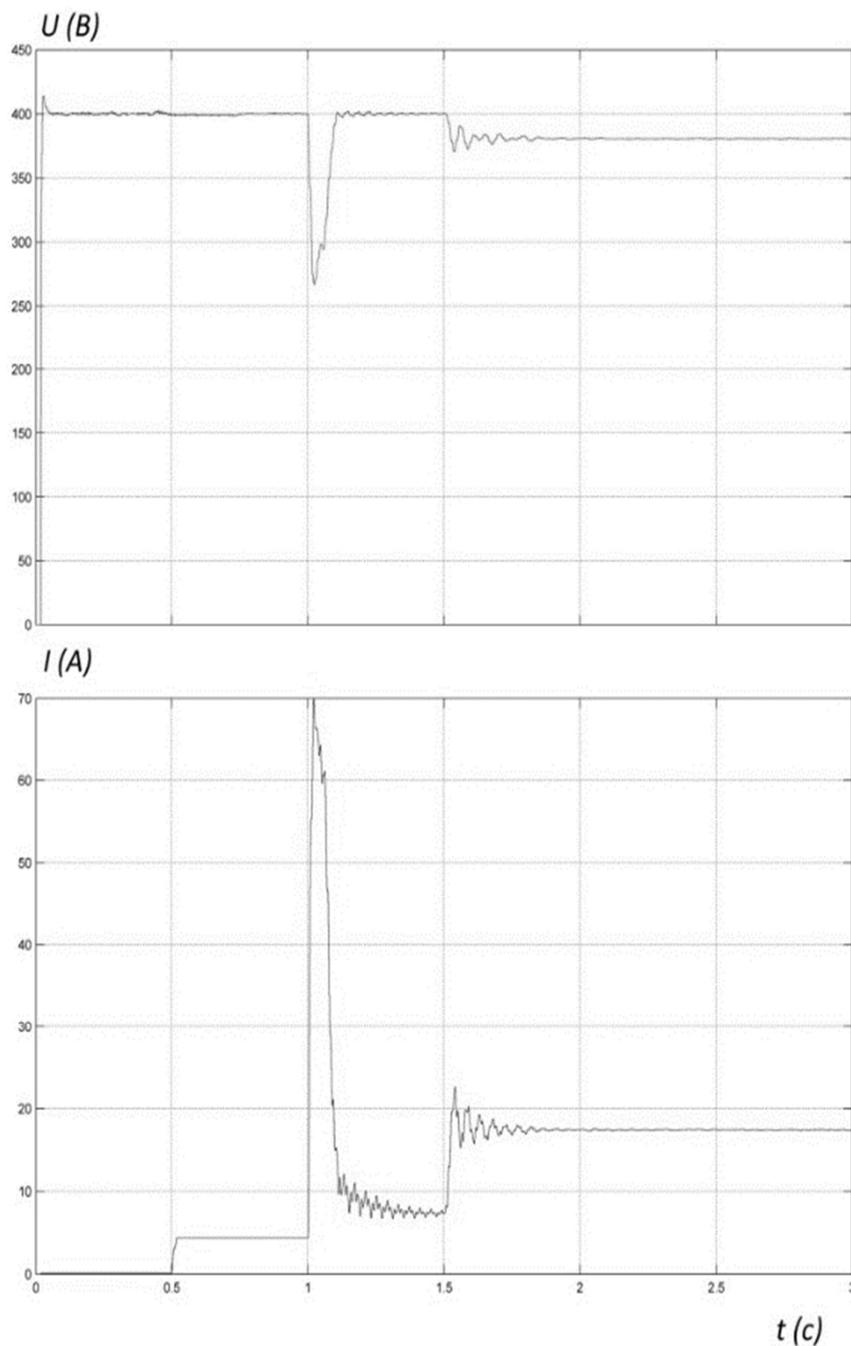
**Ключевые слова:** судовой электроэнергетической системы, валогенераторная установка на основе синхронного генератора с преобразователем частоты.

В составе судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) часто можно встретить валогенераторные установки (ВГУ), как на морских судах, так и на речных. При этом себестоимость энергии на судах с использованием ВГУ снижается до 30%.

Развитие систем ВГУ расширяет диапазон их работы. Среди перспективных систем валогенераторов интерес представляет ВГУ на основе СГ и ПЧ. Моделирование такой ВГУ связано с исследованием переходных процессов. С этой целью в пакете MATLAB SIMULINK была синтезирована модель валогенератора на основе СГ с ПЧ (рис.1).

Модель СЭЭС состоит из синхронного генератора, преобразователя частоты, выполненного на IGBT-транзисторах, и выходного LC-фильтра. Система управления ПЧ имеет обратную связь по напряжению, что позволяет поддерживать номинальное напряжение сети. Обратная связь осуществляется двумя блоками: блок регулирования напряжения (voltage regulation) и генератор импульсов (Discrete PWM Generator). Блок регулирования напряжения построен на ПИ-регуляторе. В блоке генераторов импульсов задаётся несущая частота (carrier frequency) 10000 Гц. Частота тока на выходе преобразователя частоты равна 50 Гц. Модель позволяет задать частоту выходного напряжения без обратной связи при выборе значения internal generation of modulation signal(s) (внутренняя генерация сигнала модуляции). При этом можно выбрать частоту выходного напряжения в герцах (frequency of output voltage), угол между фазами выходного напряжения в градусах (Phase of output voltage), индекс модуляции (modulation index), изменяющийся в диапазоне от 0 до 1, влияющий на выходное напряжение. Система управления ПЧ позволяет поддерживать частоту тока 50 Гц во всех режимах

работы ВГУ. В качестве нагрузки использовались блоки RLC и асинхронный двигатель. Результаты моделирования исследуемой системы показаны на рис. 2-10.



**Рис. 1. Ток и напряжение на шинах валогенератора на выходе ПЧ при номинальной частоте вращения**

При номинальной частоте вращения приводного двигателя напряжение на шинах валогенератора остается номинальным при подключении всех ступеней нагрузки (рис.2).

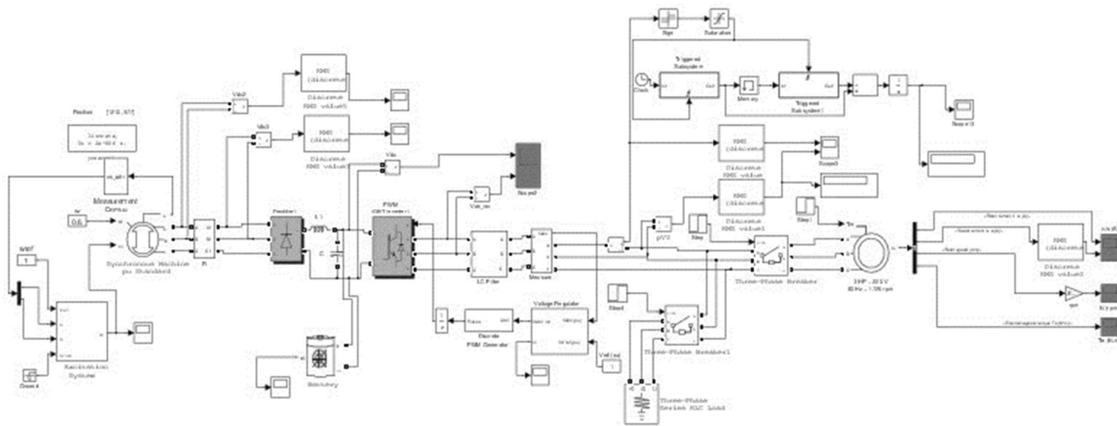


Рис. 2. Модель валогенератора СГ с ПЧ

При снижении частоты вращения приводного двигателя до 0,9 от номинального значения напряжение на шинах валогенератора падает на 20 вольт (рис.3).

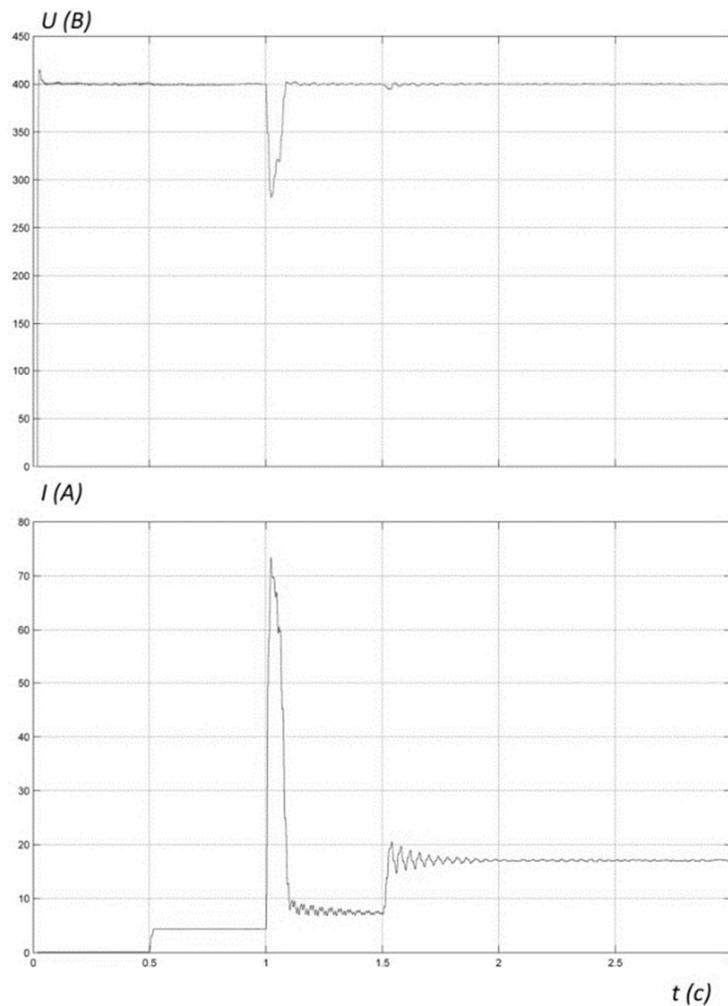


Рис. 3. Ток и напряжение на шинах валогенератора при  $\omega=0.9$

При дальнейшем снижении частоты вращения приводного двигателя до 0,6 от номинальной частоты вращения уровень напряжения на холостом ходу сохраняется на номинальном уровне. Но при подключении активной нагрузки в момент времени 0,5 с, напряжение падает до 368 В. Далее при подключении асинхронного двигателя на холостом ходу, в момент времени 1 с напряжение остаётся на уровне 368 В. При подключении нагрузки к асинхронному двигателю напряжение падает до 328 В.

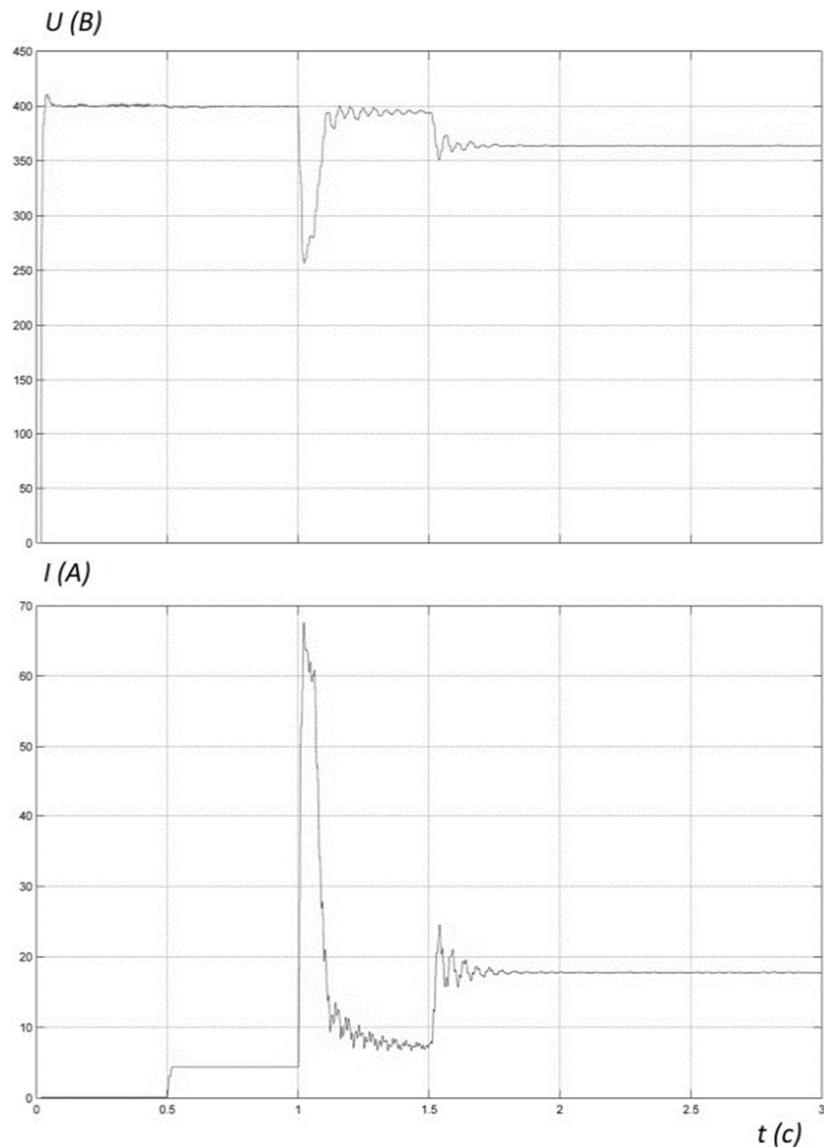


Рис. 4. Ток и напряжение на шинах валогенератора на выходе ПЧ при  $\omega=0.6$

Поэтому для улучшения характеристик в динамических режимах в звено постоянного тока ПЧ включена аккумуляторная батарея (АБ). Результаты моделирования с АБ приведены на рис. 5 и 6.

При частоте вращения приводного двигателя равной  $\omega=0,9$  (о.е) напряжение на выходе ПЧ сохраняется на номинальном уровне (400В). При этом: при подключении нагрузки в момент времени 0,5 секунды (активная нагрузка), 1 секунда

(асинхронный двигатель на холостом ходу) и 1,5 секунды (асинхронный двигатель под номинальным моментом нагрузки)–напряжение восстанавливается за короткий промежуток времени, равный 0,1 секунды (рис.5).

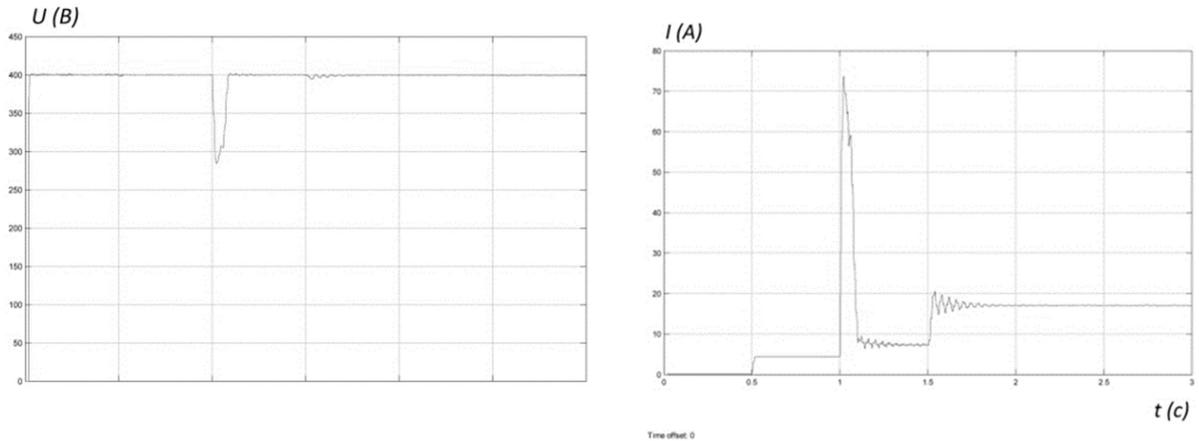


Рис. 5. Напряжение и ток на выходе ПЧ при  $\omega=0,9$

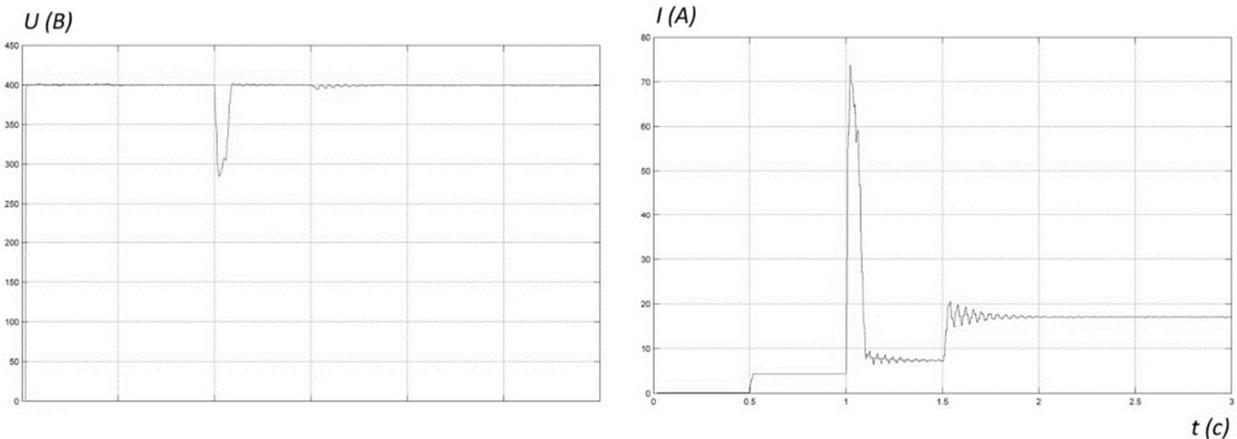


Рис. 6. Напряжение и ток на выходе ПЧ при  $\omega=0,6$

При частоте вращения приводного двигателя, равной  $\omega=0.6$  (о.е.), значение напряжения не изменяется как в статическом, так и в динамическом режиме. Благодаря АБ, при подключении нагрузки в звене постоянного тока сохраняется номинальное напряжение при динамическом режиме работы ВГУ (рис.6).

Далее показаны результаты моделирования при одновременном изменении характера нагрузки и частоты вращения приводного двигателя.

Из них видно, что система не реагирует на изменение характера нагрузки в диапазоне  $\cos\varphi=0,3\div 1$  (рис.7). Напряжение сохраняется на номинальном уровне. Однако при снижении частоты вращения приводного двигателя до 0,6 напряжение под нагрузкой падает до определённого уровня, в зависимости от  $\cos\varphi$  нагрузки. Если  $\cos\varphi=1$ , то напряжение при подключении нагрузки падает до 375 В (рис.8).

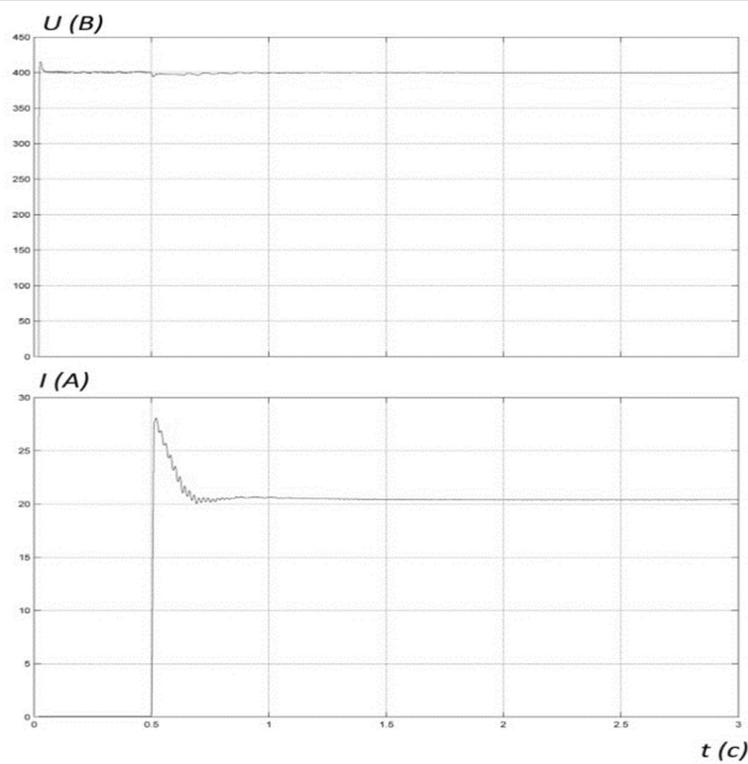


Рис. 7. Напряжение и ток на выходе ПЧ при  $\omega = 1$ ;  $\cos\varphi = 0,3 \div 1$

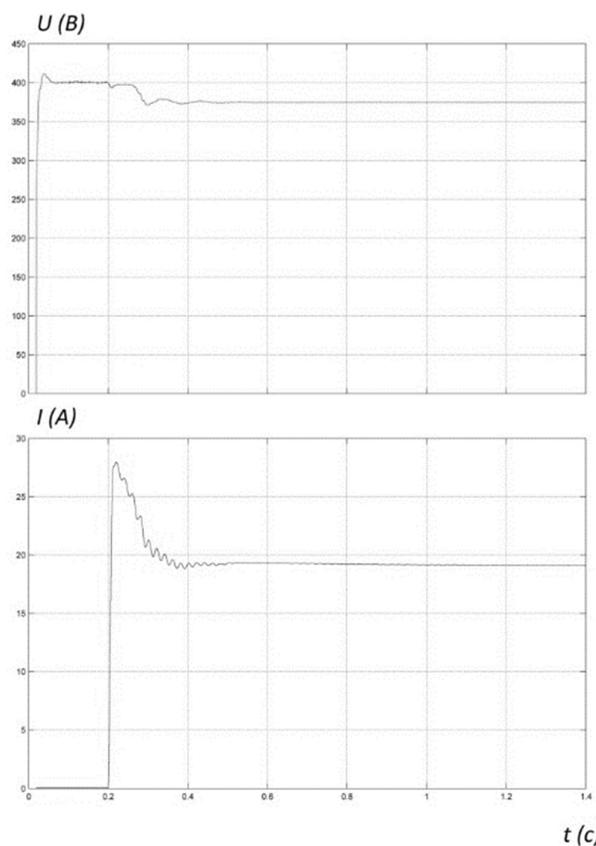


Рис. 8. Напряжение и ток на выходе ПЧ при  $\omega = 0,6$ ;  $\cos\varphi = 1$

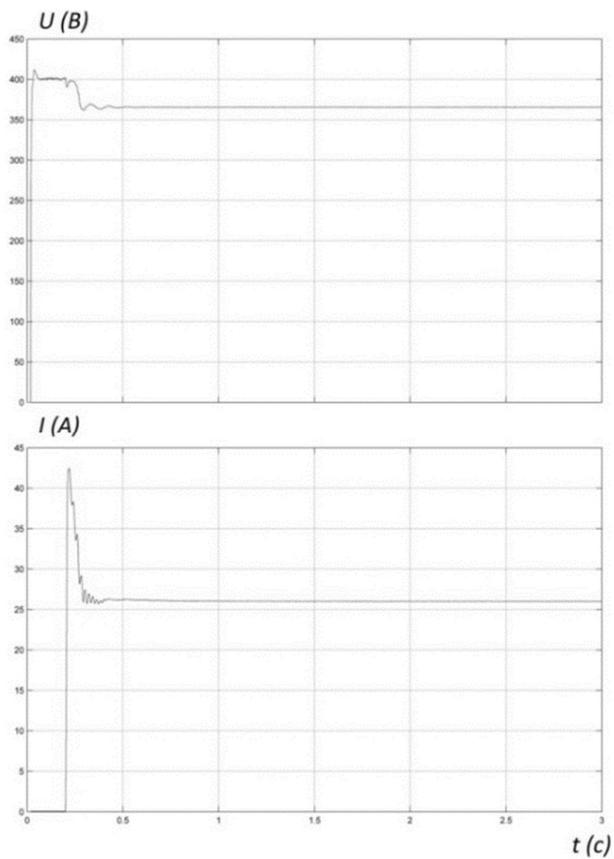


Рис. 9. Напряжение и ток на выходе ПЧ при  $\omega=0,6$ ;  $\cos\varphi=0,6$

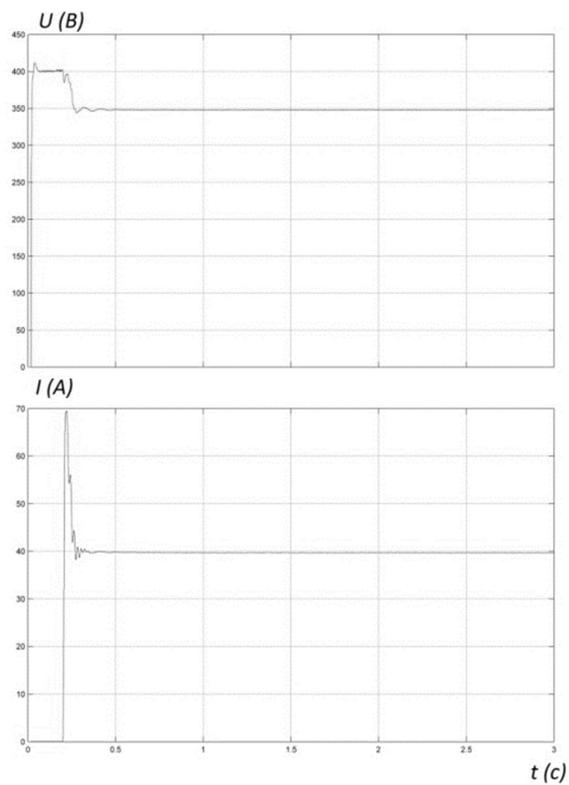


Рис. 10. Напряжение и ток на выходе ПЧ при  $\omega=0,6$ ;  $\cos\varphi=0,3$

При значениях  $\cos\varphi=0,3\div 0,6$  и подключении нагрузки напряжение снижается до 370 В (рис.9-10).

Таким образом, разработанная модель в целом отражает качество происходящих в СЭЭС с ВГУ реальных переходных процессов при изменении частоты вращения приводного двигателя, мощности и характера нагрузки.

#### Библиографический список

1. **Григорьев, А.В.** Современные и перспективные судовые валогенераторные установки / А.В. Григорьев, В.А Петухов. - Изд-во ГМА им. Адм. С.О. Макарова, 2009-176 с.
2. **Бурмакин, О.А.,** Имитационная модель судовой электростанции/ О.А. Бурмакин [и др.] // Нижний Новгород, Вестник ВГАВТ.- 2016.- №48.- С.273-280.
3. **Попов С.В.** Особенности работы автоматизированной системы управления автономной электростанции. / А.В. Бишлетов, В.В. Гуляев // Интеллектуальная электротехника №2. 2019. – С. 53-60.

**O.A. Burmakin , V.V. Gulyaev, G.A. Andreev, K.A. Krupin**

**A MODEL OF AN ELECTRIC POWER SYSTEM IN THE MATLAB  
SIMULINK ENVIRONMENT**

Volga State University of Water Transport,  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract:** The article considers a model of a halogen generator set based on a synchronous generator with a frequency converter. A simulation model of the installation and simulation results in various modes of operation of the ship's electric power system are presented.

**Keywords:** marine electric power system, a halogen generator set based on a synchronous generator with a frequency converter.

**References**

- [1] Grigor'ev A.V.; Petuhov V.A. Sovremennye i perspektivnye sudovye valogeneratornye ustanovki [Modern and promising marine halogen generator sets]. Izd-vo GMA im. Adm. S.O. Makarov, 2009- p.176 (in Russian).
- [2] Burmakin O.A., Malyshev U.S., Popov S.V., Shilov M.P. Imitacionnaya model' sudovoy electrostancii [Simulation model of a ship power plant]. Nizhniy Novgorod, Vestnic VGAVT. 2016.- №48.- p.273-280 (in Russian).
- [3] Popov S.V., Burmakin O.A., Bishletov A.V., Gulyaev V.V. Osobennosti raboty avtomatizirovannoy sistemy upravleniya avtonomnoy electrostancii [Features of the automated control system of an autonomous power plant]. Intellectual'naya electrotehnika №2. 2019. – p. 53-60 (in Russian).

Р.В. Мицкевич, А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, В.Е. Рудник

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВОБОДНО КОНФИГУРИРУЕМОЙ СТРУКТУРЫ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет

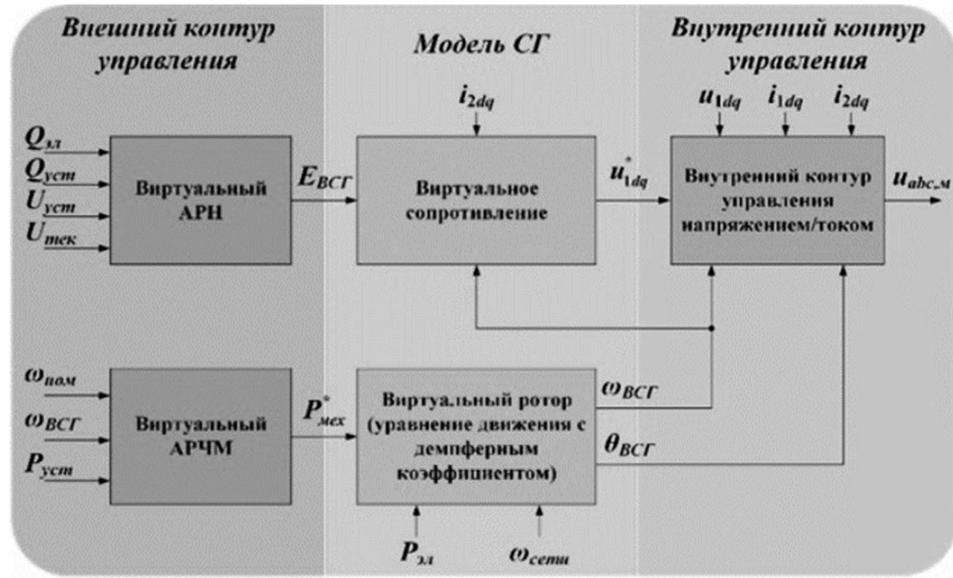
**Аннотация:** В статье рассмотрены проблемы существующих систем автоматического управления (САУ) силовыми преобразователями. Предложена свободно конфигурируемая модель САУ на основе виртуального синхронного генератора. Произведен анализ устойчивости схемы замещения малых сигналов разработанной модели, подтверждающий улучшение её свойств и возможностей по сравнению с классической САУ.

**Ключевые слова:** Возобновляемые источники энергии, устойчивость, система управления, виртуальный синхронный генератор.

В последние десятилетия ввиду глобальных климатических изменений и стремлением уменьшить углеродный след наблюдается широкомасштабное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), преимущественно на основе энергии ветра и солнца. Из-за особенностей подключения объектов ВИЭ к сети, заключающихся в использовании устройств силовой полупроводниковой техники, снижается общая инерция энергосистемы, что приводит к недостаточному для сохранения устойчивости частотному отклику при различных возмущениях. Кроме этого, объекты ВИЭ работают в режиме выдачи максимальной активной мощности, являются ведомыми сетью и практически не учтываются в регулировании режима сети. В связи с этим в данной работе разрабатывается альтернативный подход и основанная на нём система автоматического управления (САУ) силовым преобразователем (СП) объектов ВИЭ на базе свободно конфигурируемой модели виртуального синхронного генератора (ВСГ), которая позволит повысить устойчивость энергосистемы в целом.

Среди существующих структур САУ СП на основе ВСГ наиболее эффективной и надежной считается каскадная модель ВСГ с упрощенным воспроизведением статорной цепи, управляемая по напряжению (ВСГ–Н) [1]. Данной модели характерна последовательная структура контуров с жесткой направленностью сигналов (рис.1, а), которая копирует традиционные синхронные генераторы (СГ). Ввиду принципиальной проблемы взаимовлияния выходных активной и реактивной мощностей, которая свойственна традиционным СГ при увеличении внутреннего угла  $\delta$  или уменьшения отношения  $X/R$  сети, модели характерны колебания активной мощности при изменении напряжения на входе САУ [2,3,4]. Для устранения данного недостатка была предложена модель САУ СП на основе свободно конфигурируемого ВСГ (ВСГ–СК) (рис.1, б), дополнительно разделенная на параллельные блоки выдачи мощности,

которые в последствие суммируются. Верхний блок формирует уставки мощностей в установившемся режиме, нижний блок воспроизводит динамику СГ [5,6,7].



а)



б)

**Рис. 1. Структурная схема системы управления:**  
 а – на основе управляемого по напряжению ВСГ,  
 б – на основе свободно конфигурируемого ВСГ

Блоки, имитирующие поведение виртуального регулятора частоты и мощности, виртуального ротора и регулятора напряжения, описываются уравнениями (табл. 1).

Таблица 1

Системы уравнений блоков ВСГ

ВСГ-Н	ВСГ-СК
$P_{уст} - P_{эл} - K_d (\omega_{ВСГ} - \omega_{ном}) = s \cdot T_J \omega_{ВСГ}$	$P_{уст,ВСГ} - P_{ВСГ} = s \cdot T_J \omega_{ВСГ}$
$Q_{уст} + K_q (U_{уст} - U_{мек}) - Q_{эл} = s \cdot E_{ВСГ} K_{APH}$	$(s \cdot K_{APH} + K_q)(U_{уст} - U_{мек}) = Q_{APH}^*$
$\begin{cases} 0 = -u_{1d} - \psi_q \omega_{ВСГ} - R_v i_{d,ВСГ} \\ 0 = -u_{1q} + \psi_d \omega_{ВСГ} - R_v i_{q,ВСГ} \end{cases}$	$\begin{cases} 0 = -u_{1d} - \psi_q \omega_{ВСГ} - R_v i_{d,ВСГ} \\ 0 = -u_{1q} + \psi_d \omega_{ВСГ} - R_v i_{q,ВСГ} \\ 0 = \frac{1}{\omega_6} \frac{d\psi_Q}{dt} + \frac{R_Q}{L_Q} \psi_Q - R_Q i_{q,ВСГ} \end{cases}$
$P_{ВСГ} = u_{1d} i_{d,ВСГ} + u_{1q} i_{q,ВСГ},$ $Q_{ВСГ} = u_{1d} i_{q,ВСГ} - u_{1q} i_{d,ВСГ}$	

Для качественного анализа и сравнения динамических свойств САУ на основе системы алгебро-дифференциальных уравнений была сформирована их линеаризованная модель (рис.2). В работе исследуется наиболее значимый случай зависимости выходной активной мощности от изменения напряжения на входе САУ. Полученные разомкнутая  $K(s)$  и замкнутая передаточные функции  $W(s)$ , а также зависимости  $H_{dP/d\delta}$ ,  $H_{dP/dE}$ ,  $H_{dQ/d\delta}$ ,  $H_{dQ/dE}$ , отражающие влияние внутреннего угла и ЭДС на выходные активную и реактивную мощность, представлены в табл. 2.

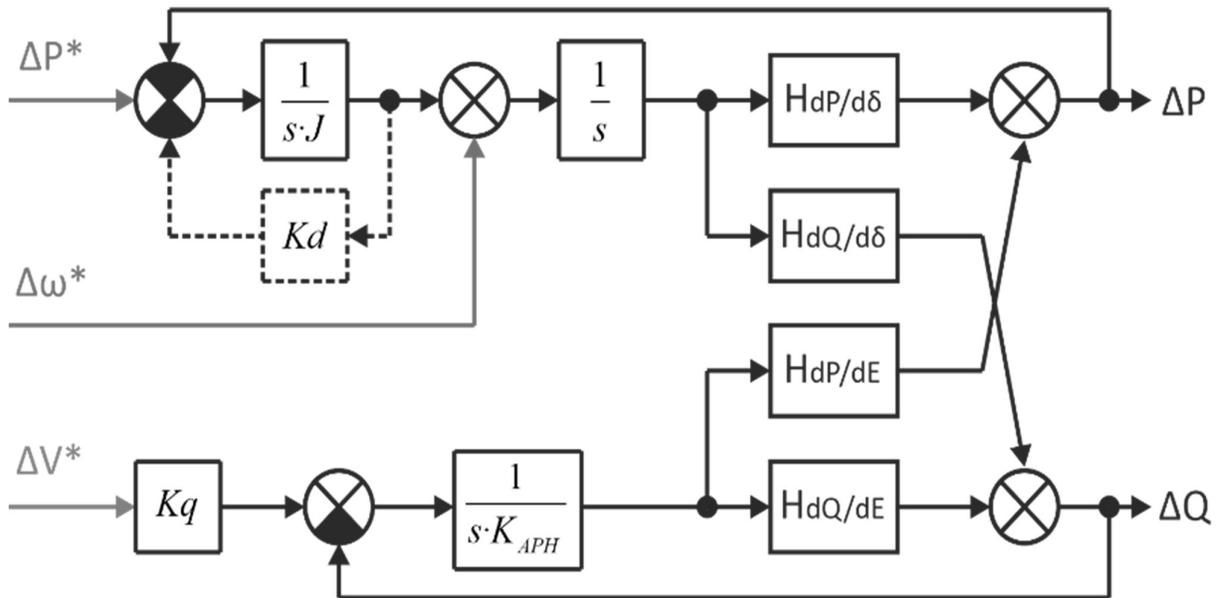


Рис. 2. Структурная схема САУ и линеаризованная модель ВСГ

Таблица 2

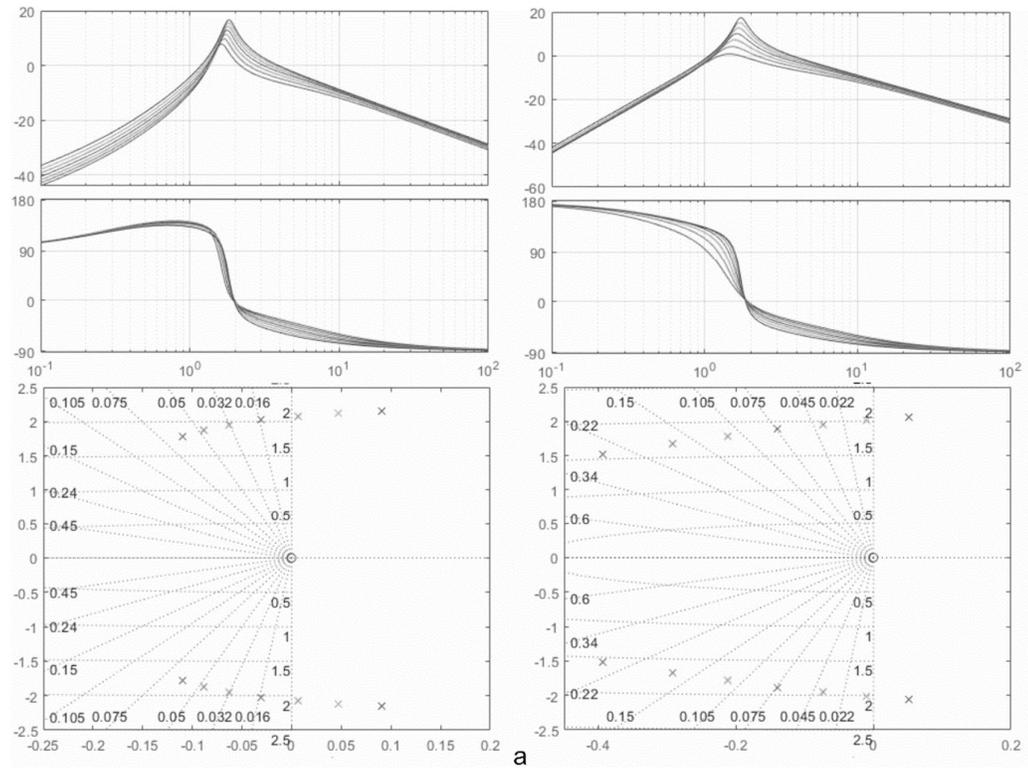
Передаточные функции ВСГ

ВСГ–Н	
$K(s) = \frac{K_q \cdot H_{dP/dE} (Js^2 + K_d s)}{J \cdot K_{APH} s^3 + (H_{dQ/dE} \cdot J + K_d \cdot K_{APH}) s^2 + (K_{APH} \cdot H_{dP/d\delta} + H_{dQ/dE} \cdot K_d) s + H_{dQ/dE} \cdot H_{dP/d\delta}};$	
$W(s) = \frac{H_{dP/dE} \cdot J \cdot K_q s^2 + H_{dP/dE} \cdot K_d \cdot K_q s}{J \cdot K_{APH} s^3 + (H_{dQ/dE} \cdot J + K_d \cdot K_{APH}) s^2 + (K_{APH} \cdot H_{dP/d\delta} + H_{dQ/dE} \cdot K_d) s - H_{dQ/d\delta} \cdot H_{dP/dE} + H_{dQ/dE} \cdot H_{dP/d\delta}};$	
$H_{dP/d\delta} = \frac{E \cdot U \cdot (R \sin(\delta) + X \cos(\delta))}{R^2 + X^2};$	$H_{dP/dE} = \frac{2E \cdot R + U \cdot (X \cdot \sin(\delta) - R \cdot \cos(\delta))}{R^2 + X^2};$
$H_{dQ/d\delta} = \frac{E \cdot U \cdot (X \sin(\delta) - R \cos(\delta))}{R^2 + X^2};$	$H_{dQ/dE} = \frac{2E \cdot X - U \cdot (R \cdot \sin(\delta) - X \cdot \cos(\delta))}{R^2 + X^2}.$
ВСГ–СК	
$K(s) = \frac{H_{dP/dE} \cdot J \cdot K_q s^2}{J \cdot K_{APH} \cdot s^3 + H_{dQ/dE} \cdot J \cdot s^2 + K_{APH} \cdot H_{dP/d\delta} \cdot s + H_{dQ/dE} \cdot H_{dP/d\delta}};$	
$W_1(s) = \frac{H_{dP/dE} \cdot J \cdot K_q \cdot s^2}{J \cdot K_{APH} \cdot s^3 + H_{dQ/dE} \cdot J \cdot s^2 + K_{APH} \cdot H_{dP/d\delta} \cdot s + H_{dQ/dE} \cdot H_{dP/d\delta} - H_{dP/dE} \cdot H_{dQ/d\delta}};$	
$H_{dP/d\delta} = \frac{E \cdot R \cdot U_d \sin(\delta) - E^2 \cdot X + E \cdot U_d \cdot X \cos(\delta)}{R^2 + X^2} + \frac{E \cos(\delta) [E \cos(\delta) \cdot (X + \psi_Q) - E \sin(\delta) \cdot R]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q} + \frac{E \sin(\delta) [E \cos(\delta) \cdot (R) + E \cdot X_d \sin(\delta)]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q};$	
$H_{dQ/d\delta} = \frac{E^2 \cdot R - E \cdot R \cdot U_d \cos(\delta) + E \cdot U_d X \sin(\delta)}{R^2 + X^2} + \frac{E \sin(\delta) [E \cos(\delta) \cdot (X + \psi_Q) - E \sin(\delta) \cdot R]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q} - \frac{E \cos(\delta) [E \cos(\delta) \cdot R + E \sin(\delta) \cdot X]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q};$	
$H_{dP/dE} = \frac{U_d X \sin(\delta) - U_d R \cos(\delta) + E \cdot R}{R^2 + X^2} + \frac{E \sin(\delta) [\sin(\delta) \cdot R - X_d \cos(\delta)]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q} + \frac{E \cos(\delta) [\sin(\delta) \cdot (X + \psi_Q) + \sin(\delta) \cdot R]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q};$	
$H_{dQ/dE} = \frac{E \cdot X - U_d R \sin(\delta) - U_d X \cos(\delta)}{R^2 + X^2} - \frac{E \cos(\delta) [\sin(\delta) \cdot R - \cos(\delta) \cdot R]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q} + \frac{E \sin(\delta) [\sin(\delta) \cdot (X + \psi_Q) + \cos(\delta) \cdot R]}{R^2 + X^2 + X \cdot \psi_Q};$	

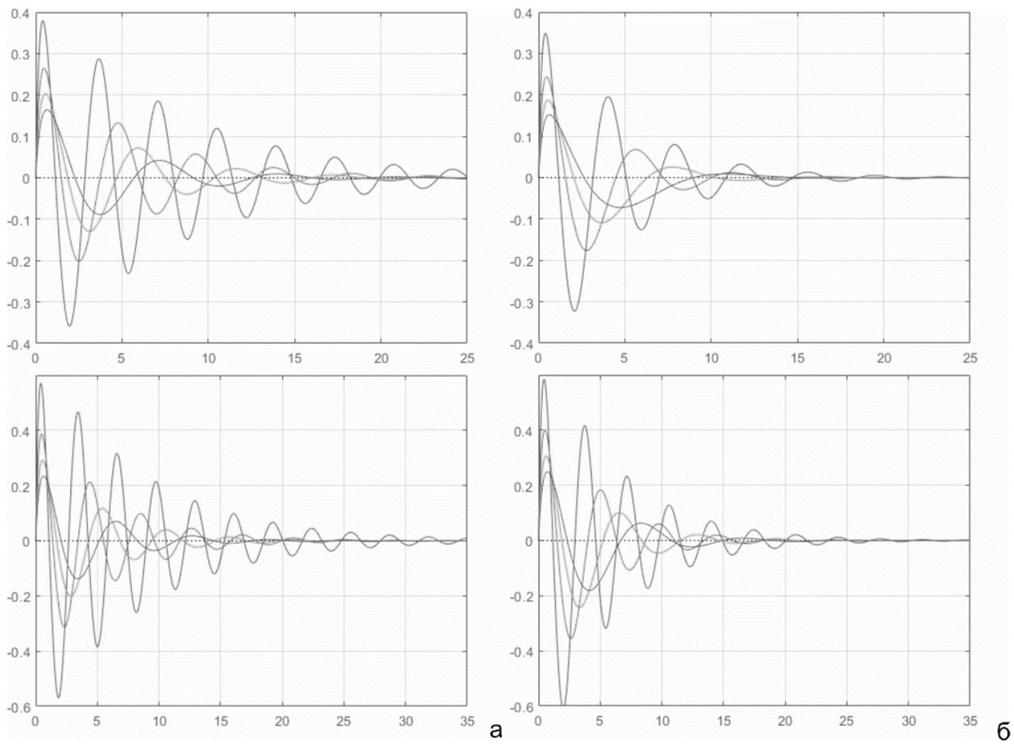
Для доказательства минимизации обозначенной принципиальной проблемы в разработанной САУ СП произведены опыты по уменьшению и увеличению отношения  $X/R$  за счёт увеличения активного сопротивления сети  $R_v$  от 0 до 0,4 о.е. (рис. 3) и увеличению реактивного сопротивления  $X_v$  от 0 до 0,4 о.е. (рис. 4).

Из полученных результатов ЛАЧХ и ФАЧХ и корневого годографа САУ при и угле  $\delta = 20^\circ$ , видно, что при равных условиях увеличения  $R_v$ , САУ ВСГ–СК обладает большей областью устойчивости по сравнению с ВСГ–Н

Рост  $X_v$  аналогично для ВСГ–Н и ВСГ–СК способствует улучшению области устойчивости. Причём из сравнения переходных функций ВСГ–Н и ВСГ–СК отчётливо прослеживается превосходство демпфирующих свойств разработанной модели, для которой колебания затухают через 20 с, а для ВСГ–Н через 30 с. Причём стоит отметить сохранение эффективности демпфирования разработанной САУ при увеличении внутреннего угла.



**Рис.3. ЛАЧХ и ФАЧХ и корневой годограф разомкнутой функции при увеличении активного сопротивления и угле  $\delta = 20^\circ$ :  
*a* – для ВСГ–Н; *б*– для ВСГ–СК**



**Рис.4. Переходная функция  $W(s)$  при увеличении  $X_v$ :  
*a* – для ВСГ–Н; *б*–для ВСГ–СК**

Представленные результаты доказывают, что, изменяя конфигурацию структуры ВСГ и контролируемые режимные переменные, можно добиться существенного повышения эффективности её функционирования при различных возмущениях, тем самым повысив качество регулирования напряжения и частоты сети. При этом предлагаемая модель ВСГ-СК позволяет естественным образом исключить фундаментальные проблемы, присущие традиционной последовательной структуре ВСГ с жёсткой направленностью сигналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.

#### Библиографический список

1. Blaabjerg, F. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, № 53 (5), P. 1398–1409.
2. Mo, O. Evaluation of Virtual Synchronous Machines With Dynamic or Quasi-Stationary Machine Models / O. Mo, S. D'Arco, J. A. Suul // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, № 64 (7), P. 5952–5962.
3. Kundur, P. *Power System Stability and Control* // New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994
4. Chen, J. Parameter constraints for virtual synchronous generator considering stability / J.Chen, T. O'Donnell // *IEEE Trans. Power Syst.*, 2019, 34, (3), pp. 2479–2481
5. D'Arco S., A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids / S. D'Arco, J. A. Suul, O. B. Fosso // *Electric Power Systems Research*, 2015, № 122, P. 180–197.
6. Mallemaci V., A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation / Mallemaci V., Mandrile F., Rubino S., Mazza A., Carpaneto E., Bojoi R. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, № 201, 107516.
7. Beck H.-P., Hesse R. Virtual synchronous machine / H.-P. Beck, R. Hesse // *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, pp. 1–6, DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424220.

R.V. Mitskevich, A.A. Suvorov, A.B. Askarov, V.E. Rudnik

## STABILITY ANALYSIS OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BASED ON A FREELY CONFIGURED STRUCTURE OF A VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR

National Research Tomsk Polytechnic University

**Abstract:** Abstract: The article deals with the problems of existing automatic control systems (ACS) for power converters (PC). A freely configurable ACS model of a virtual synchronous generator (VSG) is proposed. An analysis of the stability of the developed model confirming the increase in the damping properties of a freely configurable ACS VSG was carried out.

**Key words:** Renewable energy sources, sustainability, control system, virtual synchronous generator.

### References

- [1] Blaabjerg, F. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, № 53 (5), P. 1398–1409.
- [2] Mo, O. Evaluation of Virtual Synchronous Machines With Dynamic or Quasi-Stationary Machine Models / O. Mo, S. D'Arco, J. A. Suul // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, № 64 (7), P. 5952–5962.
- [3] Kundur, P. Power System Stability and Control / P. Kundur // New York, NY, USA: McGraw-Hill, Jan. 1994
- [4] Chen, J. Parameter constraints for virtual synchronous generator considering stability / J.Chen, T. O'Donnell // IEEE Trans. Power Syst., 2019, 34, (3), pp. 2479–2481
- [5] D'Arco S., A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids / S. D'Arco, J. A. Suul, O. B. Fosso // Electric Power Systems Research, 2015, № 122, P. 180–197.
- [6] Mallemaci V., A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation / Mallemaci V., Mandrile F., Rubino S., Mazza A., Carpaneto E., Bojoi R. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, № 201, 107516.
- [7] Beck H.-P., Hesse R. Virtual synchronous machine / H.-P. Beck, R. Hesse // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, pp. 1–6, DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424220.

**Р.В. Мицкевич, Н.Ю. Рубан**

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА РАЗГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ И НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УЧАСТИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ПРОЦЕССЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

**Аннотация:** В статье производится сравнительная оценка эффективности применения метода разгрузки оборудования фотоэлектрических установок и применения систем накопления электроэнергии в качестве источников мощности для обеспечения частотного отклика при возникновении дефицита активной мощности в энергорайоне.

**Ключевые слова:** частота, возобновляемые источники энергии, отклик, накопители, разгрузка.

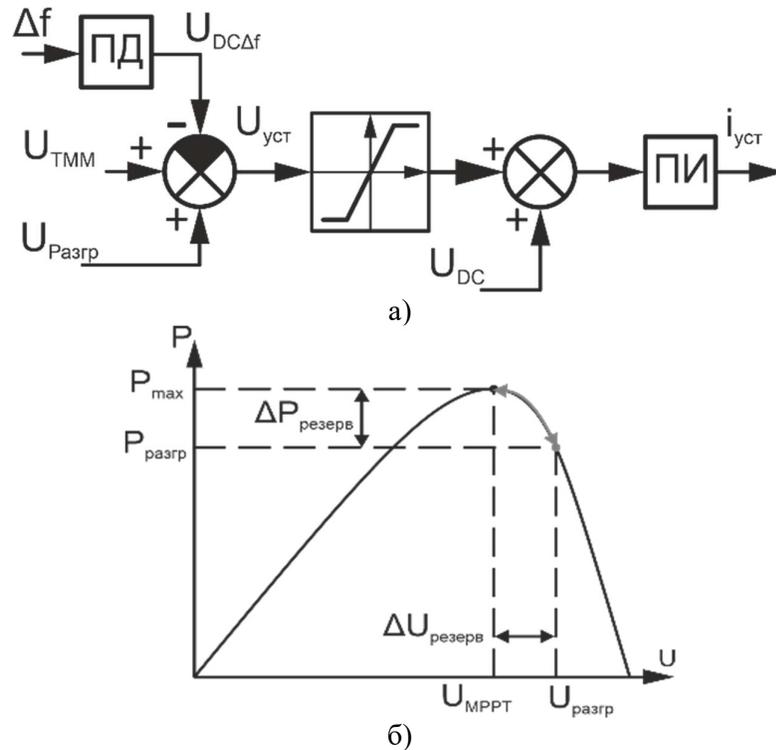
Одними из основных видов ВИЭ являются солнечные электростанции (СЭС). Особенностью СЭС является способ подключения к сети электроэнергетической системы посредством устройств силовой полупроводниковой техники, как правило статических преобразователей напряжения и их модификаций, не обладающих свойствами классических ГУ. Внедрение объектов ВИЭ, подключаемых к сети посредством силовых преобразователей, в значительной мере снижают инерционные характеристики энергосистемы. Что влечет за собой увеличение амплитуды и колебаний и скорости изменения частоты при возникновении возмущающих воздействий в сети. Традиционная генерация вынуждена подстраивать свои режимы работы под стохастический характер выработки ВИЭ, демпфировать возмущающие воздействия в энергосистеме и обеспечивать маневренность и резерв регулирования [1].

В данной работе рассматривается метод поддержки уровня частоты в сети путем обеспечения отклика по частоте оборудованием СЭС. Отклик обеспечивается управлением силовыми преобразователями и заключается в обмене активной мощностью с энергосистемой определенным способом, для обеспечения уменьшения отклонения и скорости снижения частоты в первые моменты времени аварийного режима.

Для обеспечения отклика по частоте может быть использован любой тип источника энергии или энергоустановки. В качестве таких источников могут быть использованы как внутренние конструктивные ресурсы, так и дополнительные системы накопления энергии [2].

Для СЭС режимы работы определяются системой отслеживания точки выдачи максимальной мощности, уставка которой зависит от величины солнечной инсоляции, температуры окружающей среды и температуры фотоэлектрических панелей. Путем настройки системы отслеживания точки выдачи максимальной

мощности, фотоэлектрические панели могут быть разгружены, для обеспечения резерва мощности [3]. Алгоритм управления напряжением цепи постоянного тока и диаграмма зависимости выдаваемой мощности фотоэлектрических панелей от напряжения представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Способ разгрузки ФЭУ изменением напряжения постоянного тока панелей:**  
*а* – алгоритм правления; *б* – диаграмма ТММ ФЭУ

Применение способа разгрузки оборудования СЭС в определенных случаях является эффективным способом поддержки уровня сети, так как при разгрузке даже на 10% обеспечивается большой объем установленной мощности, который может быть быстро введен в работу. Однако применение такого способа обеспечения резерва мощности является довольно ненадежным в силу стохастического характера генерации возобновляемых источников энергии. К тому же разгрузка оборудования приводит к недопуску электроэнергии что влечет за собой увеличение сроков окупаемости проектов по внедрению ВИЭ.

С целью обеспечения гарантированного запаса мощности применяются гибридные системы объектов ВИЭ, включающие в свою структуру системы накопления энергии. Обобщенная структура СЭС с системой накопления электроэнергии представлена на рис. 2.

Современные системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) обладают достаточными характеристиками скорости разряда и выдачи мощности, что позволяет применять их для предоставления услуг регулирования баланса мощности и частоты [4]. Применяются как различного типа аккумуляторные батареи, так и суперконденсаторы. В свою очередь системы накопления требуют больших капитальных затрат на единицу мощности.

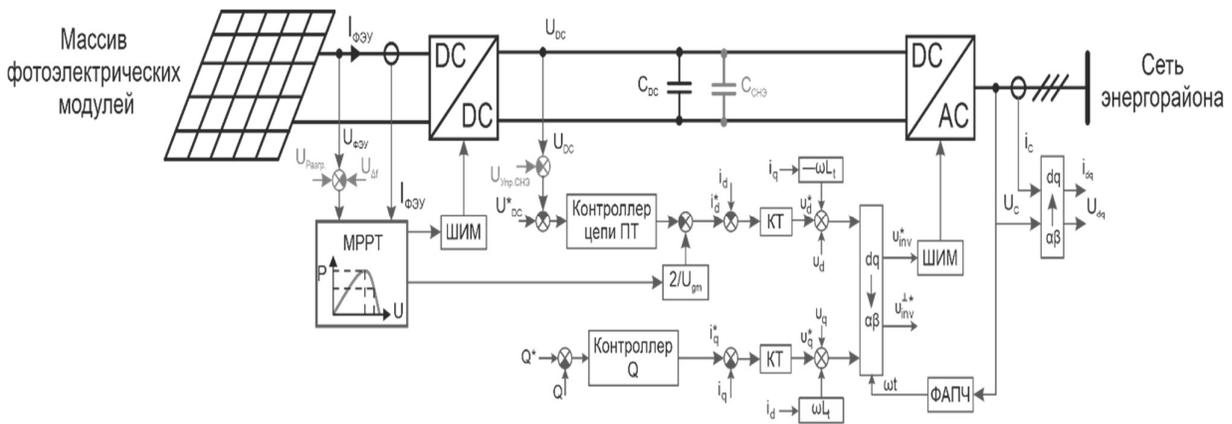


Рис. 2. Обобщенная структура СЭС с системой накопления электроэнергии

В данной работе производится сравнительная оценка эффективности применения способа разгрузки оборудования СЭС и систем накопителей энергии на базе гибридной системы литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов [5].

Для оценки эффективности применения объектов ВИЭ для предоставления услуг регулирования частоты были применены результаты исследований по оценке вероятности возникновения колебаний мощности в различных энергосистемах с вероятностью 1 раз в сутки и за 7 дней, в достаточном объеме для приведения в действие автоматики частотной разгрузки [6]. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

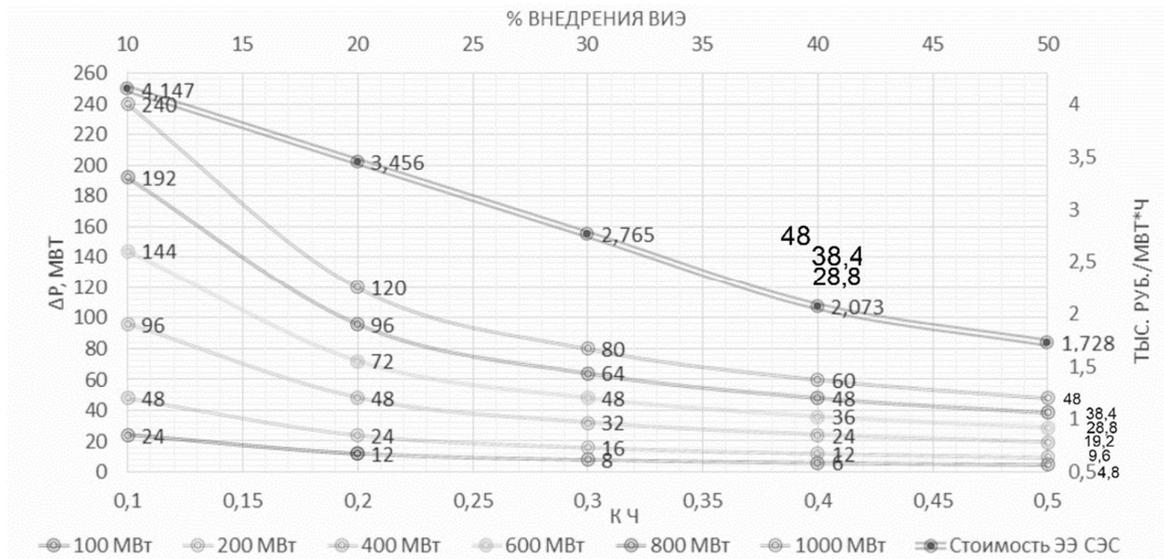
Также, согласно [6], была произведена оценка зависимости величины небаланса мощности, приводящей к срабатыванию первой ступени АЧР от величины коэффициента эквивалентной частотной характеристики энергосистемы  $K_{\text{ч}} = \Delta f / \Delta P$ . Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Учитывая оценочный характер исследования, с достаточной точностью допустимо интерпретировать изменение величины  $K_{\text{ч}}$  с влиянием внедрения объектов ВИЭ на инерционные характеристики энергосистемы и на регулирующие характеристики вращающегося резерва мощности. Таким образом, изменение величины  $K_{\text{ч}}$  в диапазоне от 0,1 до 0,5 принято характеризовать с уровнем участия в электроснабжении потребителей от объектов ВИЭ от 10% до 50%.

Таблица 1

Зависимость колебаний мощности от плотности вероятности возникновения небаланса и величины мощности энергосистемы

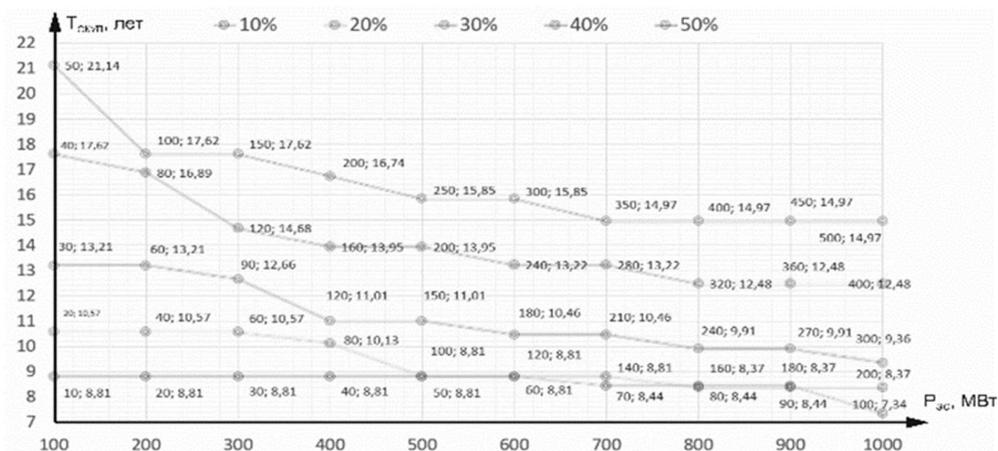
Доля участия СЭС	Величина мощности энергосистем									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	Величина возникающего небаланса активной мощности									
10%	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
20%	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
30%	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
40%	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
50%	4,8	9,6	14,4	19,2	24	28,8	33,6	38,4	43,2	48



**Рис. 3. Минимальный аварийный небаланс активной мощности, приводящий к срабатыванию АЧР, и рыночная стоимость электроэнергии СЭС как функция от доли мощности генерации энергосистемы**

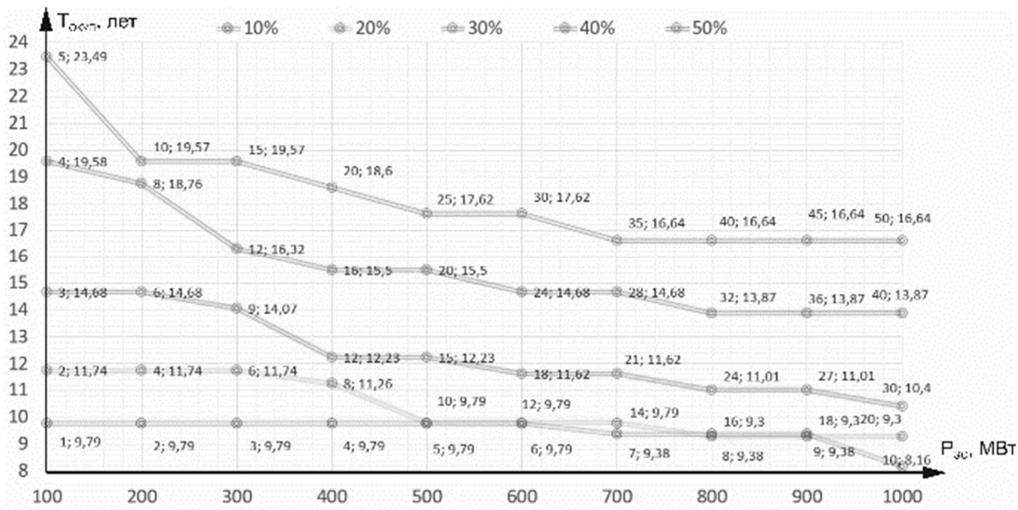
Согласно полученным графикам, при интервале в семь дней и высокой плотности вероятности возникновения небаланса, уровни отклонения мощности, достаточные для срабатывания АЧР, характерны лишь для «слабых» энергосистем с высокой долей внедрения ВИЭ и малом резерве регулирования мощности.

Учитывая рыночную стоимость фотоэлектрических панелей порядка 100 млн.р. за 1 МВт можно оценить увеличение срока окупаемости проектов по внедрению объектов ВИЭ при применении способа разгрузки оборудования и применения системы накопления энергии. Оценка производилась согласно рыночной стоимости электроэнергии от солнечных электростанций с учетом динамики цен в зависимости от величины мощности СЭС и доли участия в электроснабжении потребителей энергосистемы [7]. Графики оценки срока окупаемости представлены на рис. 4.

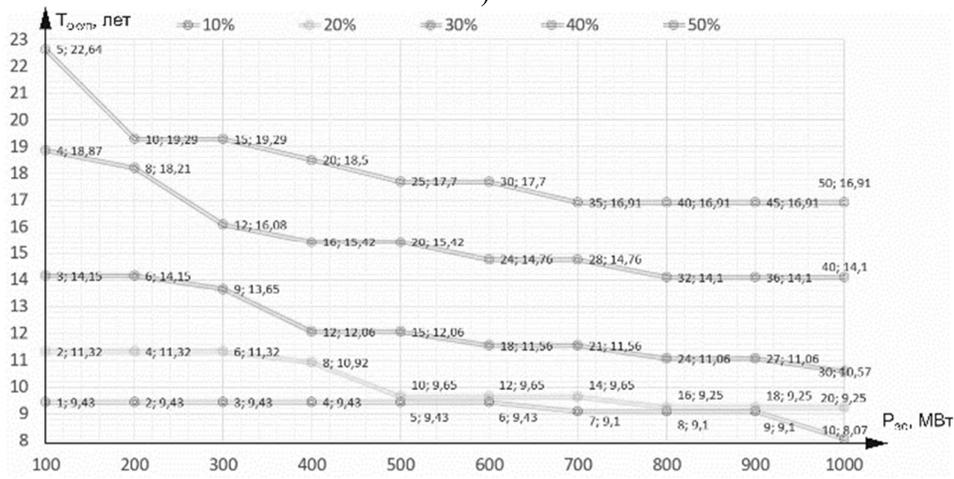


а)

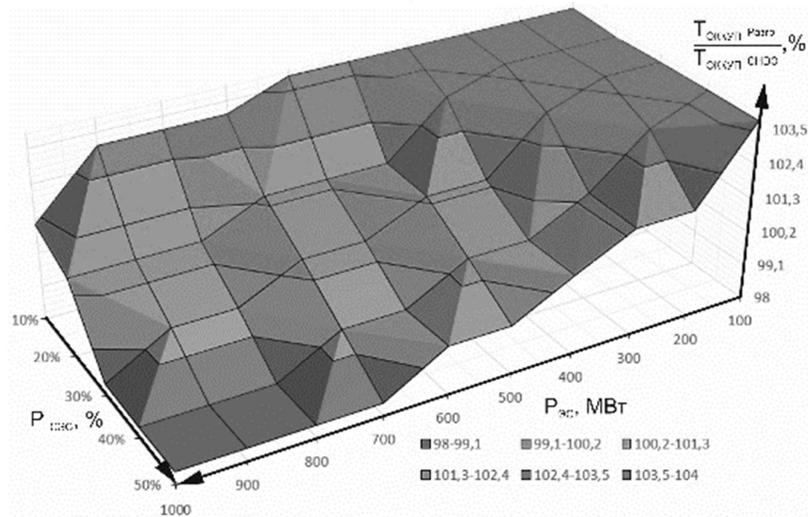
**Рис. 4 Оценка срока окупаемости проектов строительства СЭС (начало)**



б)



в)



г)

**Рис. 4 Оценка срока окупаемости проектов строительства СЭС(окончание):**  
*а* – базовый вариант; *б* – при применении системы разгрузки фотоэлектрических модулей, *в* – при применении СНЭЭ; *г* – график динамики соотношения сроков окупаемости сценариев с применением недогрузки и СНЭЭ

Согласно графикам (рис. 4), период окупаемости СЭС при использовании способа разгрузки в среднем увеличивается на 13%, а при использовании СНЭЭ на 9,7%.

Учитывая динамику стоимости электроэнергии, можно сделать выводы, что для относительно малых энергосистем при уровне внедрения СЭС до 30% целесообразнее применение систем накопителей электроэнергии.

Однако ввиду увеличения удельных затрат на эксплуатацию ячеек системы СНЭЭ использование метода разгрузки оборудования оказывается более эффективным для энергосистем с большой мощностью нагрузки и высокой долей участия СЭС в электроснабжении потребителей. Также следует отметить, что применение способа разгрузки СЭС обеспечивает резерв мощности с малым коэффициентом готовности ввиду стохастического характера выдачи мощности СЭС. В таком случае выбор способа обеспечения резерва мощности необходимо производить с учетом частоты возникновения небалансов мощности в энергосистеме.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-5320.2021.4.

#### Библиографический список

1. Teodorescu, R. Grid converters for photovoltaic and wind power systems / R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez // Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. – 2011.
2. Xiong, Liansong, Yujun Li, Yixin Zhu, Ping Yang, and Zhirong Xu. 2018. "Coordinated Control Schemes of Super-Capacitor and Kinetic Energy of DFIG for System Frequency Support" *Energies* 11, no. 1: 103. <https://doi.org/10.3390/en11010103>
3. A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi, and Á. Molina-García. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115:109369, 2019.
4. M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144–155, 2017.
5. Посьпанко Н., Баранов М., Костюк Р. Накопители энергии в России: инъекция устойчивого развития. VYGON Consulting. 2020 54 с.
6. Кошечев Л. А., Кутузова Н. Б., Штефка Й.. Об учете нерегулярных колебаний частоты в изолированной энергосистеме. *Известия НТЦ единой энергетической системы*. № (2) 69. 2013. с 19-32.
7. Стоимость декарбонизации: издержки в энергосистемах с большими долями ядерной и возобновляемой энергии. Агентство по ядерной энергии организация экономического сотрудничества и развития, ОЭСР, 2019. 228 с.

R.V. Mitskevich, N.Y. Ruban

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE METHOD OF UNLOADING EQUIPMENT AND ENERGY STORAGE TO ENSURE THE PARTICIPATION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN THE PROCESS OF FREQUENCY REGULATION**

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia

**Abstract:** The article provides a comparative evaluation of the effectiveness of applying the method of photovoltaic equipment unloading and the use of electricity storage systems as power sources to provide frequency response when there is a shortage of active power in the power district.

**Key words:** Frequency, renewable energy sources, response, storage systems, unloading.

**References**

- [1] Teodorescu, R. Grid converters for photovoltaic and wind power systems / R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez // Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. - 2011.
- [2] Xiong, Liansong, Yujun Li, Yixin Zhu, Ping Yang, and Zhirong Xu. 2018. "Coordinated Control Schemes of Super-Capacitor and Kinetic Energy of DFIG for System Frequency Support," *Energies* 11, no. 1: 103. <https://doi.org/10.3390/en11010103>
- [3] A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi, and Á. Molina-García. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115:109369, 2019.
- [4] M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144-155, 2017.
- [5] Posypanko N., Baranov M., Kostyuk R. Energy storage in Russia: an injection of sustainable development. VYGON Consulting. 2020 54 c.
- [6] Koshcheev, L.A.; Kutuzova, N.B.; Stefka, J. On the account of irregular frequency fluctuations in an isolated power system. *Proceedings of the STC of the unified power system. № (2) 69.* 2013. c 19-32.
- [7] The cost of decarbonization: costs in power systems with large shares of nuclear and renewable energy. Agency for Nuclear Energy Organization for Economic Cooperation and Development, OECD, 2019. 228 c.

С.А. Петрицкий, А.В. Шалухо, Р.Ш. Бедретдинов, Р.А. Шароватов

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В статье рассмотрены нормативные документы, требования которых должны учитываться при создании энергоустановок с водородными топливными элементами. Разработана структурная схема, поясняющая устройство и принципы действия системы эксплуатационной безопасности гибридного электроэнергетического комплекса на основе водородных топливных элементов. Представлен алгоритм определения утечки водорода, основанный на сравнении показателей датчика давления водорода и регулятора расхода газа.

**Ключевые слова:** топливные элементы, водород, гибридный электроэнергетический комплекс, эксплуатационная безопасность.

### Введение

Одно из важных направлений развития современной электроэнергетики связано с водородными технологиями, которые включают совокупность технологий производства, транспортировки, длительного хранения водорода и экологически чистого получения из него электроэнергии. Одним из наиболее перспективных подходов к получению электроэнергии из водорода является использование топливных элементов (ТЭ). Они могут служить основой для создания электростанций мощностью от нескольких кВт до десятков МВт. Применение энергоустановок с водородными ТЭ позволит максимально использовать потенциал возобновляемых энергоресурсов, повысить качество электроснабжения и минимизировать отрицательное воздействие на окружающую среду.

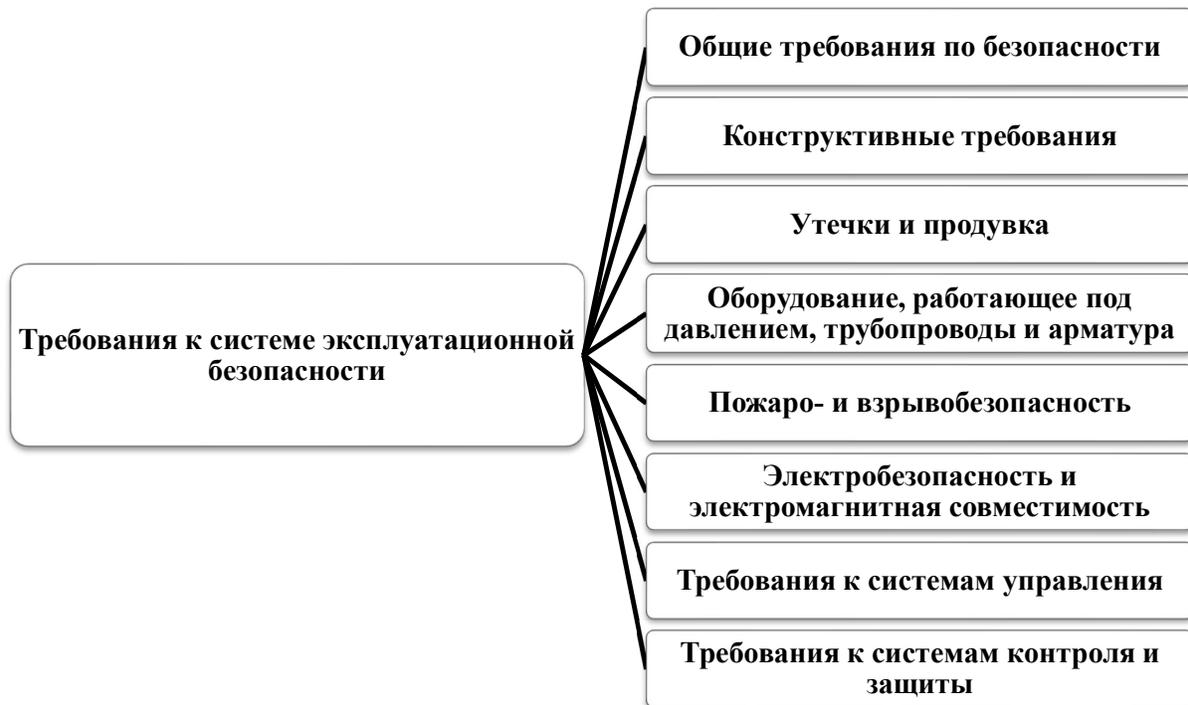
Главными недостатками ТЭ, создающими проблемы их применения в системах электроснабжения, являются длительное время запуска и невозможность мгновенной реакции на изменения нагрузки потребителей. Эффективное решение проблемы низкой маневренности ТЭ заключается в совместном использовании ТЭ и аккумуляторных батарей (АБ) в едином гибридном электроэнергетическом комплексе (ГЭК).

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева разрабатывается экспериментальный образец ГЭК на основе низкотемпературного топливного элемента с протонно-обменной мембраной (ПОМТЭ) и литий-железо-фосфатных АБ.

Согласно классификации [1], использующиеся в составе ГЭК водородные ТЭ относятся к водородным устройствам и системам, которые, в свою очередь, классифицируются как пожаровзрывоопасные (при недостаточных герметичности, дренаже, контроле примесей водорода и мерах по их удалению, контроле состава атмосферы помещений и мерах по ее нормализации). Поэтому использование в составе комплекса водородных источников энергии, сочетающих

устройства хранения и использования водорода, предъявляют повышенные требования к эксплуатационной безопасности ГЭК.

По указанным причинам, одной из важных задач создания экспериментального образца ГЭК является разработка системы эксплуатационной безопасности, которая должна учитывать требования, предъявляемые к безопасной эксплуатации энергоустановок на водороде, регламентируемые нормативными документами (рис. 1).



**Рис. 1. Анализ требований к системе эксплуатационной безопасности энергоустановок, работающих на водороде**

Проведен анализ и систематизация требований по эксплуатации энергоустановок с водородными ТЭ.

**Общие требования по безопасности**

Конструкции энергоустановок с водородными ТЭ должны обеспечивать минимизацию [2]:

- энергетического потенциала, необходимого для достижения их функциональных показателей;
- возможных действий человека, приводящих к аварийной ситуации, и их опасных последствий;
- поражающих факторов возможных аварий – температурного воздействия пламени, ударной волны, осколков разрушенного оборудования, вытеснения кислорода (воздуха).

Также конструкция энергоустановок с водородными ТЭ должна учитывать [3, 4]:

- все предсказуемые (нормально ожидаемые) опасности, опасные ситуации и события на весь предполагаемый срок службы энергоустановок на топливных элементах;

- риск для каждой из таких опасных ситуаций с учетом двух факторов: вероятности возникновения и предполагаемой степени серьезности такой опасности.

Требования к функциональной безопасности и к системе управления должны соответствовать требованиям международных стандартов МЭК 62061, МЭК 60730-1, МЭК 61508.

#### **Основные конструктивные требования**

Можно выделить следующие основные конструктивные требования:

- корпус энергоустановки на ТЭ должен обладать достаточной прочностью, жесткостью, износоустойчивостью и устойчивостью к коррозии;

- конструкция энергоустановки должна соответствовать условиям физической среды, для работы в которых предназначена;

- все компоненты системы, обеспечивающие функции аварийного останова, неисправность которых может привести к возникновению опасного события, должны быть идентифицированы, пройти сертификацию или отдельные испытания для использования этих компонентов по назначению.

- энергоустановка на ТЭ должна быть спроектирована, изготовлена и/или оснащена таким образом, чтобы не допускать возникновения рисков, вызываемых присутствием газов, жидкостей, пыли или паров, выделяющихся во время эксплуатации.

#### **Утечки и продувка**

При разработке энергоустановки на водородных ТЭ важным является обеспечение необходимых требований к производительности систем вентиляции и продувки в соответствии со скоростью утечки газов, определяемой по [3]. В случае использования механической системы вентиляции должна быть предусмотрена аварийная система, либо автоматическое отключение установки при неисправности системы вентиляции. При использовании периодической продувки (вентиляции), продувку можно считать законченной, если объемная доля водорода не будет превышать 0,4%. При этом в энергоустановке должны быть предусмотрены средства продувки воздухом или инертным газом для тех случаев, когда необходимо обеспечить безопасное состояние энергоустановки после останова или перед пуском.

#### **Оборудование, работающее под давлением, трубопроводы и арматура**

В энергоустановке на водородных ТЭ резьбовые соединения трубопроводов и арматуры, предназначенные для горючих газов, должны соответствовать ИСО 22550. Патрубки, если они используются для горючего газа или кислорода, должны иметь соединения с притертыми поверхностями или иметь фланцевые соединения, уплотнение которых должно соответствовать использованию горючих газов. Использование фланцевых соединений с плоскими фланцами не допускается.

Если для газа используются гибкие шланги и соответствующая арматура, то они должны соответствовать требованиям, обеспечивающим безопасность их

применения. Вся автоматическая запорная и отсекающая арматура должна иметь сигнализацию положения (открыто/закрыто) с выводом ее на пульт управления.

Все топливо, подаваемое к энергоустановке на ТЭ, должно проходить по меньшей мере через два автоматических клапана, расположенных последовательно, каждый из которых служит как предохранительный отсечной клапан и может быть использован как управляющий клапан. Эти клапаны могут входить или не входить в состав единого органа управления.

### **Пожаро- и взрывобезопасность**

Энергоустановка на ТЭ должна быть оснащена средствами защиты (вентиляция, детекторы газов и пр.), благодаря которым газ, просачивающийся из энергоустановки или скапливающийся внутри него, не мог образовывать взрывоопасных концентраций. Электрические, трубопроводные и иные соединения между различными отсеками энергоустановки должны быть герметизированы несгораемыми материалами с пределом огнестойкости не ниже предела огнестойкости перегородок между соответствующими отсеками. Конструкция энергоустановки должна исключать возможность возникновения температур, превышающих температуры самовозгорания горючих смесей, которые могут образоваться в энергоустановке.

В пределах зон, в которых возможно выделение водорода, необходимо исключить присутствие источников воспламенения, обеспечив выполнение следующих положений:

- установленное электрооборудование соответствует классификации зон в соответствии с МЭК 60079-0 и другим применимым частям серии МЭК 60079;
- потенциал для статического разряда должен быть устранен путем соответствующего электрического соединения и заземления и за счет правильного выбора материалов.

В случае внепланового прекращения работы топливного элемента или его неработоспособности после автоматического запуска, энергоустановка должна автоматически отключать подачу топлива.

### **Электробезопасность и электромагнитная совместимость**

Конструкция энергоустановок, использующих топливные элементы, должна также учитывать следующие специфические моменты: остаточный заряд в блоке топливных элементов, опасный энергетический потенциал между элементами. Все электрооборудование, установленное в зонах возможного выделения водорода, должно иметь взрывобезопасное исполнение в соответствии с требованиями, установленными в технических регламентах по пожарной безопасности и безопасности электрооборудования. Размещение в этих зонах электрооборудования, не используемого для обеспечения работоспособности водородных устройств и систем, не допускается.

Места размещения пусковой и регулирующей аппаратуры (пультов управления, распределительных щитов, панелей реле и иной аппаратуры) должны быть изолированы от мест возможного выделения водорода.

### **Требования к системам управления**

Система управления должна осуществлять следующие функции: пуск энергоустановки; останов энергоустановки; выбор режима работы энергоустановки; дистанционный контроль и управление.

Системы дистанционного контроля и управления, предназначенные для дистанционного управления энергоустановкой и контроля ее работы, должны отвечать следующим требованиям:

- получать разрешение работать с энергоустановками только в том случае, если дистанционное управление не приведет к возникновению опасного состояния;
- не блокировать устройства защиты, установленные локально;
- оснащены устройством локального отключения энергоустановки от сигналов дистанционного управления, с целью предотвращения несанкционированного дистанционного пуска установки при проведении на ней работ (осмотр, техническое обслуживание) локальным персоналом.

### **Требования к системам контроля и защиты**

Системы защиты должны предотвращать возникновение опасных режимов работы энергоустановки на ТЭ (перегрузка, неисправность оборудования, утечка топлива и пр.), с использованием устройств встроенного контроля, регулирования и управления (автоматические выключатели, ограничители температуры, дифференциальные реле давления, расходомеры, устройства мониторинга и пр.). Защитные устройства с функцией измерения должны иметь порог срабатывания за пределами регистрируемых предельных значений.

К компонентам системы защиты предъявляются следующие основные требования:

- ограничители давления, такие как реле давления, должны соответствовать МЭК 60730-2-6;
- устройства контроля температуры должны иметь время отклика, достаточное для обеспечения защиты и согласующееся с целью измерения в соответствии с МЭК 60730-2-9;
- газовый детектор должен соответствовать ИСО 26142 или МЭК 60079-29-1;
- водородные устройства должны быть оборудованы системой сигнализации взрывоопасной концентрации горючих веществ, а также система автоматического отключения подачи топлива.

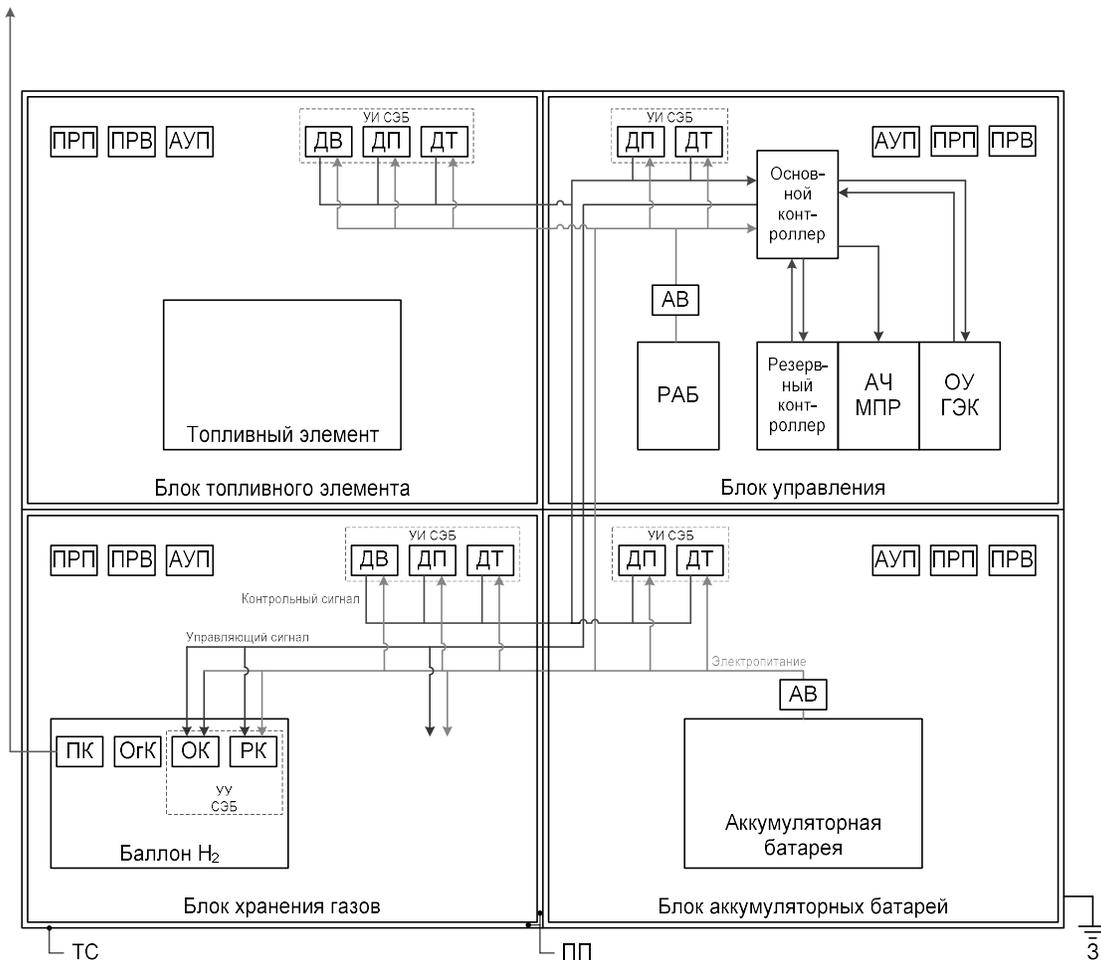
На баллоны вместимостью более 100 л должны устанавливаться предохранительные клапаны. Также водородные устройства и системы должны быть оснащены автоматическими установками пожаротушения, взрывозащиты и взрывоподавления. Во избежание образования взрывоопасных смесей, гашение пламени системами пожаротушения должно осуществляться только после прекращения утечки водорода.

Зоны возможного выделения водорода должны быть оборудованы средствами обнаружения - детекторами водорода, водородного горения и системой сигнализации. Объемная доля водорода в зонах его возможного выделения, при которой срабатывает система сигнализации, не должна превышать 0,4%.

### **Разработка системы эксплуатационной безопасности**

В соответствии с требованиями нормативных документов разработана система эксплуатационной безопасности (СЭБ) гибридного электроэнергетического комплекса на основе ТЭ. Структурная схема СЭБ приведена на рис. 2.

Предполагается, что ГЭК будет иметь блочную структуру и состоять из четырех блоков: блок хранения газов, блок топливного элемента, блок аккумуляторных батарей, блок управления. Блоки предполагается объединить в единую конструкцию, представляющую собой контейнер. ТЭ расположен в отдельном блоке и работает в установившемся режиме с постоянным расходом водорода. Водород хранится в баллонах под давлением, находящихся также в отдельном блоке.



**Рис. 2. Структурная схема системы эксплуатационной безопасности гибридного электроэнергетического комплекса:**

H<sub>2</sub> - водород, РАБ - резервная аккумуляторная батарея, АЧ - аппаратная часть, ОУ - органы управления, УУ - управляющее устройство, УИ - устройство измерения, АВ - автоматический выключатель, ДВ - датчик водорода, ДП - датчик пламени, ДТ - датчик температуры, ПК - предохранительный клапан, ОгК - огнепреградительный клапан, ОК - отсечной клапан, РК - регулировочный клапан, ПРП - противопожарная решетка приточной вентиляции, ПРВ - противопожарная решетка вытяжной вентиляции, ТС - толстостенная сталь, АУП - автономное устройство пожаротушения, ПП - противопожарная панель, ВВ - выпуск водорода, З - заземление

Безопасность работы комплекса при использовании водорода обеспечивает модуль эксплуатационной безопасности (МСЭБ), включающий в состав устройства измерения (датчики) и управляющие устройства (клапаны).

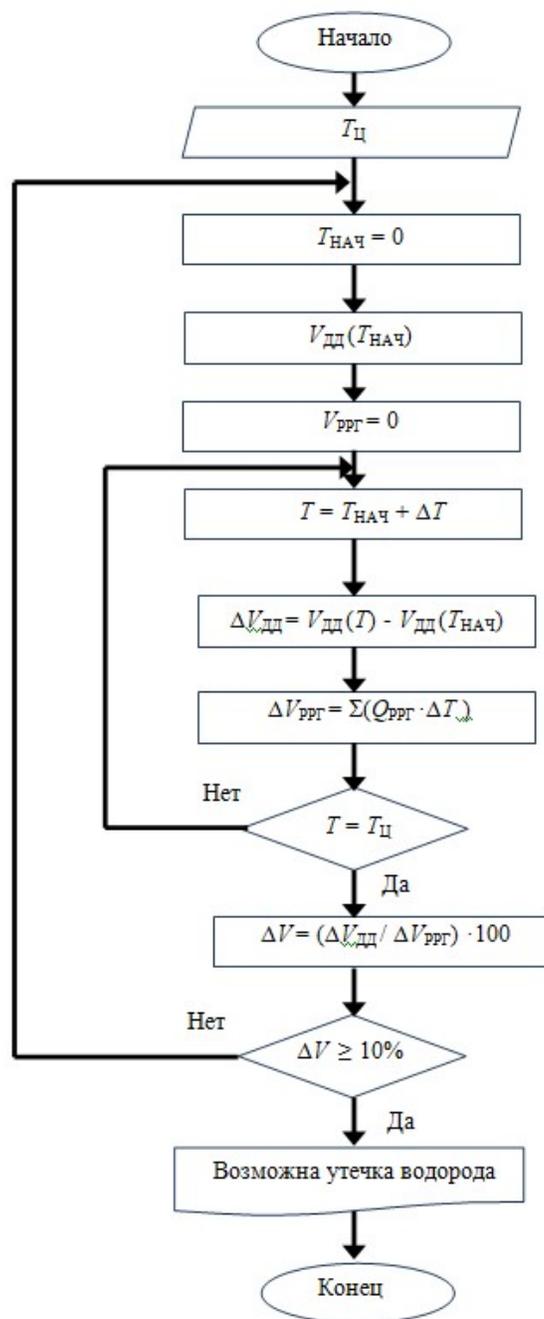


Рис. 3. Алгоритм определения утечки водорода

С помощью устройств измерений основной контроллер системы управления получает информацию о давлении водорода в передающих трубках, расходе водорода, концентрации водорода в блоках с баллонами и топливным элементом.

При обнаружении утечки водорода (или возгорания) основной контроллер системы управления запускает алгоритмы работы системы в предаварийных и аварийных режимах, которые реализуются с помощью управляющих устройств. При наиболее худшем сценарии (значительная утечка водорода) происходит отключение электрической части комплекса и в блоки с баллонами водорода и ТЭ поступает инертный газ (хранится в баллоне в блоке хранения газов).

### **Разработка алгоритма определения утечки водорода**

Разработан алгоритм определения утечки водорода на основе сравнения показателей датчика давления водорода и регулятора расхода газа (рис. 3).

В представленном алгоритме:  $T_{ц}$  – интервал времени, через который происходит сравнение использованного водорода (задается пользователем);  $V_{дд}$  – объем использованного водорода, который определяется с помощью датчика давления;  $V_{ррг}$  – объем использованного водорода, который определяется с помощью регулятора расхода газа;  $\Delta T$  – интервал времени, через который происходит считывание значений показателей;  $Q_{ррг}$  – расход водорода, который определяется регулятором расхода газа. Алгоритм основан на периодическом сравнении результатов расхода водорода, получаемых с разных устройств – датчика давления водорода (на баллоне) и регулятора расхода газа (на присоединении ТЭ). Расхождение результатов показывает возможную утечку водорода. Однако эффективность данного подхода будет зависеть от точности измерений устройств и требует экспериментальной апробации.

### **Выводы**

Проведен анализ и систематизация требований по эксплуатации энергоустановок с водородными ТЭ. На основе полученных результатов разработана система эксплуатационной безопасности для экспериментального гибридного электроэнергетического комплекса на основе топливных элементов мощностью 1 кВт. Предложен алгоритм определения утечки водорода на основе сравнения показателей датчика давления водорода и регулятора расхода газа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.

### **Библиографический список**

1. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. 01.09.2006.
2. ФЗ (Проект № 496165-4 от 2012 г.) Технический регламент по безопасности устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода.
3. ГОСТ Р МЭК 62282-2-2014. Технологии топливных элементов. Часть 2. Модули топливных элементов. 16.09.2014.
4. ГОСТ Р МЭК 62282-3-100-2014. Технологии топливных элементов. Часть 3-100. Стационарные энергоустановки на топливных элементах. Безопасность. 16.09.2014.

---

**Petritsky S.A., Shalukho A.V., Bedretdinov R.SH., Sharovtov R.A.**

**DEVELOPMENT OF AN OPERATIONAL SAFETY SYSTEM FOR THE  
ENERGY COMPLEX BASED ON HYDROGEN FUEL CELLS**

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

**Abstract:** The article discusses regulatory documents, the requirements of which must be taken into account when creating power plants with hydrogen fuel cells. A block diagram has been developed explaining the device and operating principles of the operational safety system of a hybrid electric power complex based on hydrogen fuel cells. An algorithm for determining hydrogen leakage is presented, based on a comparison of the indicators of the hydrogen pressure sensor and the gas flow regulator.

**Key words:** fuel cells, hydrogen, hybrid electric power complex, operational safety.

**References**

- [1] GOST 12.1.004-91. Fire safety. General requirements. 01.09.2006.
- [2] FL (Project № 496165-4 from 2012 year) Technical regulations on the safety of devices and systems intended for the production, storage, transportation and use of hydrogen.
- [3] GOST R IEC 62282-2-2014. Fuel cell technologies. Part 2. Fuel cell modules. 16.09.2014.
- [4] GOST R IEC 62282-3-100-2014. Fuel cell technologies. Part 3-100. Stationary power plants on fuel cells. Safety. 16.09.2014.

И.А. Разживин, Р.В. Мицкевич, Н.М. Космынина

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОМ И КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВОК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

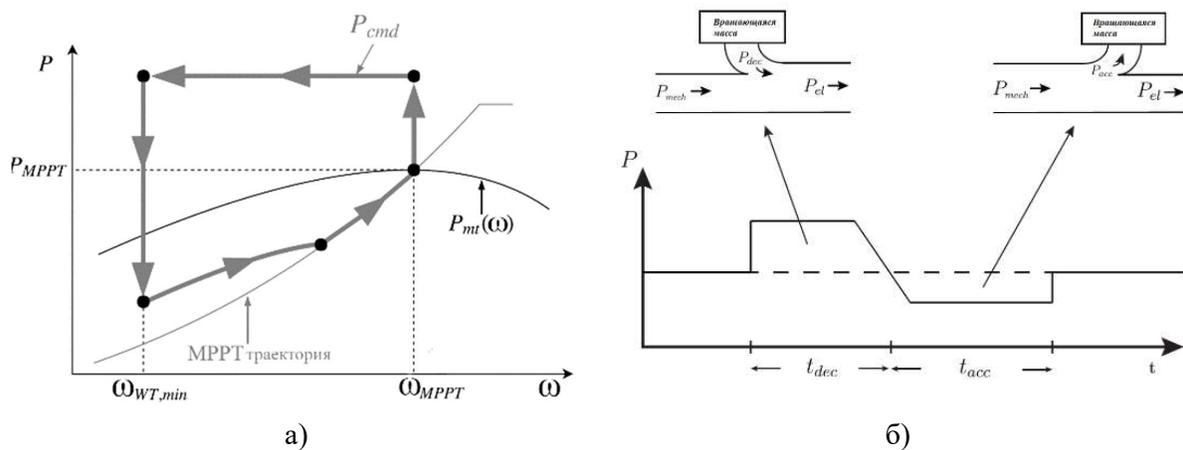
**Аннотация:** В работе рассматриваются методы обеспечения запаса мощности для предоставления функций регулирования частоты ветроэнергетической установкой (ВЭУ) на базе асинхронного генератора двойного питания (АГДП). Методы обеспечения частотного отклика предусматривают использование запасенной энергии суперконденсаторов, включенных в цепь постоянного тока силовых преобразователей (СП), а также в использовании кинетической энергии ветроколеса. В статье рассматриваются комбинации задействования резервов мощности для обеспечения частотного отклика при возникновении дефицита активной мощности в изолированном энергорайоне.

**Ключевые слова:** Возобновляемые источники энергии, отклик, накопители, кинетическая энергия.

В настоящее время одним из основных направлений развития электроэнергетических систем является активное внедрение генерирующих установок (ГУ) на базе возобновляемых источников (ВИЭ). Значительную часть таких ГУ составляют так называемые ВЭУ 3-го типа, в которых реализовано частичное подключение АГДП через связку DC/AC преобразователей, подключенных друг к другу через цепь постоянного тока (ЦПТ). Хотя такая топология подключения и обеспечивает частичную прямую связь с сетью через обмотки статора, инерционный отклик от таких установок сравнительно мал, и обусловлен быстродействующей системой автоматического управления (САУ) преобразователя, координирующей работу ВЭУ 3-го типа. Во время переходного процесса САУ управляет током ротора так, чтобы сохранить электрический момент равным его значению до возмущения, контролирует амплитуду и фазу напряжения в точке присоединения [1, 2]. Однако массовое внедрение объектов ВИЭ, не обеспечивающих динамического отклика при возмущениях в энергосистеме, значительно снижают инерционные характеристики энергосистемы, что в свою очередь приводит к увеличению скорости протекания электромеханических переходных процессов и снижению способности энергосистемы противостоять возмущениям.

Регулирование частоты – обязательная мера для повышения устойчивости и надежности подобных сетей. В данном направлении встречаются исследования, рассматривающие возможности участия ВЭУ в регулировании частоты. Распространение получили управление статизмом, быстрое управление резервом,

реакция на скорость изменения частоты и их комбинации. Однако при таком подходе извлечение инерции происходит за несколько секунд, за которые скорость вращения ротора быстро снижается, что приводит к большим потерям аэродинамической мощности, ротору требуется восстановление скорости вращения. Как следствие, чрезмерное извлечение кинетической энергии может затормозить ротор, привести к эффекту вторичного снижения частоты (SFD) в сети [3]. Кроме того, при снижении скорости ветра такой подход не обеспечивает необходимую поддержку частоте. Во-вторых, частое торможение ветроколеса повышает износ оборудования. Диаграммы процесса высвобождения кинетической энергии ВК представлены на рис. 1.

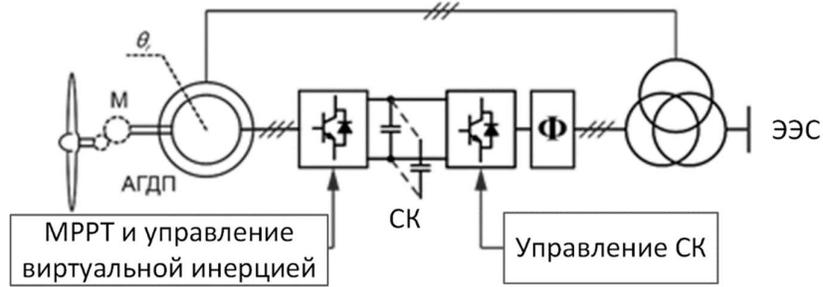


**Рис. 1. Диаграммы процесса высвобождения кинетической энергии ветряного колеса:**

*а* – процесс смещения точки выдачи мощности; *б* – диаграмма мощностей

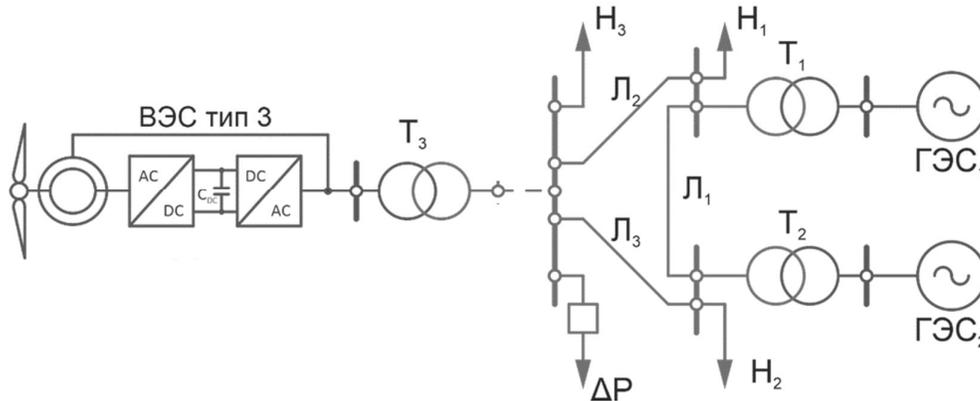
Встречаются исследования, рассматривающие различные комбинации в управлении ВЭУ для возможного участия в регулировании частоты. В [4] авторы предлагают использовать управление статизмом совместно с энергией аккумуляторной батареи, интегрированной в ЦПТ, однако недостаточно раскрыт вопрос согласования между двумя техниками. В [5] предлагается использовать суперконденсатор в ЦПТ ВЭУ 4 типа. В настоящей статье предлагается разработка комбинированного способа управления ВЭУ 3 типа, для максимально эффективного извлечения «скрытой» инерции и использования энергии от водородного накопителя путем его интеграции в ЦПТ. В качестве комбинации применяется скоординированное управление статизмом и изменением скорости изменения частоты для извлечения кинетической энергии ветроколеса с извлечением энергии из суперконденсатора (СК), интегрированного в ЦПТ, с целью минимизации недостатков отдельно взятых способов управления ВЭУ для извлечения инерции. Такое решение позволяет использовать в аварийном режиме часть кинетической энергии вращающихся масс за счет замедления скорости вращения ротора, что может обеспечить приемлемый частотный отклик от ВЭУ при отклонении частоты сети [6].

Структурная схема управления комбинированным методом представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Схема управления ВЭУ с АГДП с применением комбинированной системы управления для обеспечения частотного отклика**

Для проведения опытов была создана модель изолированного энергорайона. В кольцевой сети 110 кВ подключены электростанции и нагрузки. Две электростанции представлены моделями ГЭС с классическими генераторами и системой АРС, третья – эквивалентной моделью ВЭУ 3 типа (рис. 3).



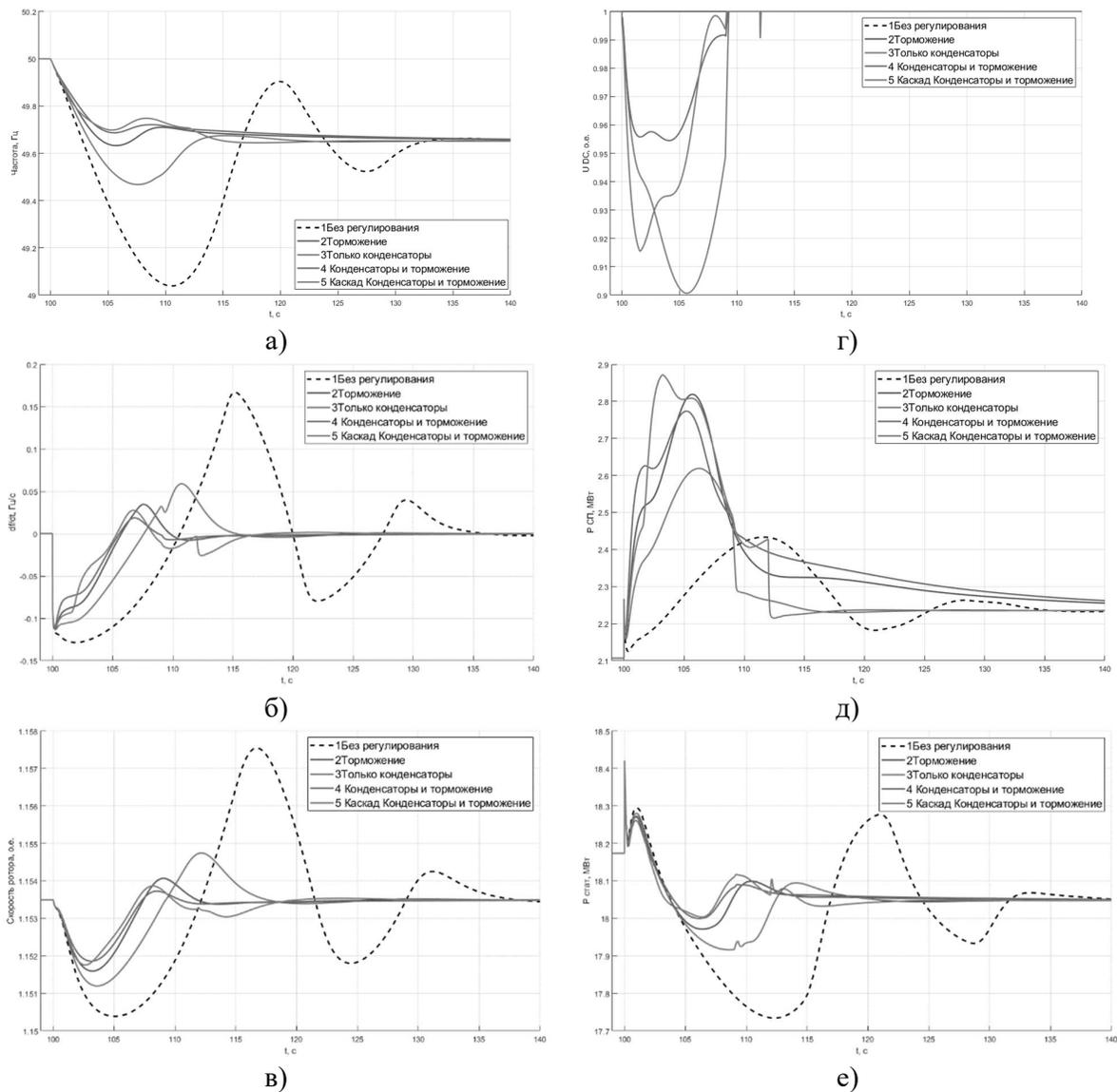
**Рис. 3. Структурная схема сети исследуемого энергорайона**

В нормальном режиме в энергорайоне обеспечивается баланс активной мощности, частота сети поддерживается на требуемом уровне 50 Гц регуляторами ГЭС. Установленные мощности электростанций эквиваленты друг другу и составляют 20 МВт. Для сравнительного анализа частотного отклика принят сценарий нарушения баланса активной мощности путем наброса нагрузки  $\Delta P = 1$  МВт, при котором рассматривался процесс снижения частоты в сети.

Была произведена серия опытов:

- 1) контрольный опыт при отсутствии дополнительного управления;
- 2) при регулировании только торможением ВК;
- 3) при регулировании напряжения цепи постоянного тока;
- 4) при совместном управлении напряжения цепи постоянного тока и торможении ВК;
- 5) при каскадном управлении сначала напряжения цепи постоянного тока и торможении ВК.

Результаты экспериментов представлены на рис. 4.



**Рис. 4. Осциллограммы процесса снижения частоты при различных способах управления ВЭУ:**

- a* – частота сети, Гц; *б* – скорость изменения частоты Гц/с;  
*в* – скорость вращения ротора ВЭУ, о.е.; *г* – напряжение цепи постоянного тока;  
*д* – мощность, выдаваемая силовым преобразователем в сеть;  
*е* – мощность статора выдаваемая в сеть

### Обсуждение результатов

Осциллограммы изменения частоты наглядно демонстрируют эффективность работы дополнительных способов, обеспечивающих участие ВЭУ 3 типа в регулировании частоты и мощности в ЭЭС. Надир частоты без какого-либо управления ВЭУ достигает практически 1 Гц. Согласно осциллограммам наилучший (меньший) результат в значении надир наблюдается при использовании совместных способов извлечения инерции. При этом эффективную динамику демонстрирует скоординированное управление статизмом, реакцией на скорость

изменения частоты и контролем напряжения ЦПТ с использованием энергии из СК).

При использовании энергии из ЦПТ не затрачивается кинетическая энергия ротора, равно как и при использовании кинетической энергии ротора не разряжается конденсатор, поскольку контроллер максимальной мощности смещает рабочую точку, поддерживая напряжение на постоянном уровне. Однако, как демонстрируют предыдущие осциллограммы, применение совместного и скоординированного управления дает наилучший результат. При скоординированном управлении разряд конденсатора происходит на меньшую величину, каскадом на  $t = 102$  с и  $t = 104$  с, чем при использовании просто СИ вместе с контролем напряжения ЦПТ.

По осциллограммам мощности видно, что со стороны статора в первый момент времени обеспечивается ее выдача при использовании кинетической энергии за счет управления статизмом, реакцией на скорость изменения частоты, и совместных техниках управления. При применении только контроля напряжения ЦПТ (т.е. энергии СК) основной прирост мощности идет со стороны преобразователя, так же, как и при совместных управлениях, однако замедляясь, ветроколесо отдает кинетическую энергию и уже к  $t = 105$  с мощность статора значительно снижается, в то время как со стороны преобразователя наоборот после  $t = 105$  сек мощность продолжает поступать в сеть, обусловленная в основном разрядом СК.

### Выводы

В работе предложено рассмотреть несколько способов извлечения «скрытой» инерции ВЭУ 3 типа, для поддержки частоты системы при небалансе мощности в сетях, где присутствие ветровой генерации становится значимым. Рассматриваются применяемые стратегии управления «скрытой» инерцией посредством энергии суперконденсатора в цепи постоянного тока и кинетической энергии ротора и их совместного использования. Результаты показывают, что все применяемые технологии способны обеспечить частотный отклик, однако наилучшие результаты демонстрируют совместные стратегии, особенно при скоординированном управлении.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-3249.2021.4

### Библиографический список

1. L. Yang, Z. Xu, J. Ostergaard, Z. Y. Dong and K. P. Wong, "Advanced Control Strategy of DFIG Wind Turbines for Power System Fault Ride Through," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 2, pp. 713-722, May 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2174387.
2. J. Ekanayake and N. Jenkins, "Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 4, pp. 800-802, Dec. 2004, doi: 10.1109/TEC.2004.827712.
3. Y.Cheng, R. Azizipanah-Abarghooee, S. Azizi et al., "Smart Frequency Control in Low Inertia Energy Systems Based on Frequency Response Techniques: A Review," Applied Energy,

- 
- vol. 279. 2020.
4. Gomez, L.A.G.; Grilo, A.P.; Salles, M.B.C.; Sguarezi Filho, A.J. Combined Control of DFIG-Based Wind Turbine and Battery Energy Storage System for Frequency Response in Microgrids. *Energies* 2020, *13*, 894. <https://doi.org/10.3390/en13040894>
  5. Hasan, N. S., Rosmin, N., Nordin, N. M., & Hassan, M. Y. (2019). Virtual inertial support extraction using a super-capacitor for a wind-PMSG application. *IET Renewable Power Generation*, *13*(10), 1802-1808. doi:10.1049/iet-rpg.2018.5655
  6. M. Dreidy, H. Mokhlis, S. Mekhilef, Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.69, p. 144-155, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.170>

I.A. Razzhivin, R.V. Mitskevich, N.M. Kosmynina

## EFFICIENCY ANALYSIS OF SUPERCAPACITOR CONTROL AND KINETIC ENERGY MATCHING SYSTEM FOR WIND POWER PLANTS TO PROVIDE THE FREQUENCY RESPONSE

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia

**Abstract:** The article considers methods of providing power reserve to provide frequency control functions of wind turbine (WT) based on the asynchronous generator dual power supply (DFIG). Methods of providing frequency response involve the use of stored energy of supercapacitors included in the DC circuit of power converters (PC), as well as the use of the kinetic energy of the wind wheel. The article considers two different ways of combining the use of power reserves to provide frequency response when there is a shortage of active power in the isolated power district.

**Key words:** Renewable energy sources, response, storage units, kinetic energy.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant MK-3249.2021.4

### References

- [1] L. Yang, Z. Xu, J. Ostergaard, Z. Y. Dong and K. P. Wong, "Advanced Control Strategy of DFIG Wind Turbines for Power System Fault Ride Through," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 713-722, May 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2174387.
- [2] J. Ekanayake and N. Jenkins, "Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 800-802, Dec. 2004, doi: 10.1109/TEC.2004.827712.
- [3] Y.Cheng, R. Azizipanah-Abarghooee, S. Azizi et al., "Smart Frequency Control in Low Inertia Energy Systems Based on Frequency Response Techniques: A Review," *Applied Energy*, vol. 279. 2020.
- [4] Gomez, L.A.G.; Grilo, A.P.; Salles, M.B.C.; Sguarezi Filho, A.J. Combined Control of DFIG-Based Wind Turbine and Battery Energy Storage System for Frequency Response in Microgrids. *Energies* 2020, 13, 894. <https://doi.org/10.3390/en13040894>
- [5] Hasan, N. S., Rosmin, N., Nordin, N. M., & Hassan, M. Y. (2019). Virtual inertial support extraction using a super-capacitor for a wind-PMSG application. *IET Renewable Power Generation*, 13(10), 1802-1808. doi:10.1049/iet-rpg.2018.5655
- [6] M. Dreidy, H. Mokhlis, S. Mekhilef, Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.69, p. 144-155, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.17>.

В.Е. Рудник<sup>1</sup>, И.А. Разживин<sup>1</sup>, Н.М. Космынина<sup>1</sup>, С.А. Литвинов<sup>2</sup>

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ В СЕТЯХ С НИЗКОЙ ИНЕРЦИЕЙ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет<sup>1</sup>  
ООО «Газпром добыча Ямбург»<sup>2</sup>

**Аннотация:** Внедрение генерирующих установок, подключаемых через силовые преобразователи, стремительно растет, в первую очередь, за счет внедрения генерации от возобновляемых источников энергии. С увеличением доли таких устройств и, как следствие, уменьшением инерции в сети значительно изменяются и ее динамические свойства. В частности, при дисбалансе мощности возникает более сильное снижение частоты и скорость изменения частоты становится значительной. В данной работе рассматриваются возможности применения синтетической инерции в системе управления солнечной электростанцией для поддержания устойчивой работы электроэнергетической системы в целом.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, солнечная электростанция частота, синтетическая инерция, статический преобразователь напряжения, электроэнергетическая система.

В настоящее время наблюдается тенденция регулярно растущего потребления электроэнергии. Многие ведущие страны заинтересованы в декарбонизации, основанной на сокращении традиционной генерации на базе ископаемого топлива. Одним из основных векторов развития мировой энергетики является внедрение новых объектов генерации за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечных электростанций (СЭС) [1].

Как известно, СЭС подключаются к сети через статические преобразователи напряжения (СПН). Ввиду отсутствия вращающихся частей в СЭС и в целом применение СПН делает такие электростанции безынерционными. При значительной их доле в электроэнергетических системах (ЭЭС) приводит к значительному снижению их надежности в нормальных и аварийных режимах [2, 3]. В частности, одной из основных проблем является обеспечение устойчивости ЭЭС по частоте. В ЭЭС с низкой инерцией величина и скорость изменения частоты гораздо больше при аналогичном возмущении по сравнению с традиционными ЭЭС [4, 5].

Для обеспечения надёжного и бесперебойного функционирования ЭЭС с низкой инерцией (например, в Европе) системные операторы постепенно повышают требования по участию ВИЭ в поддержке частоты и уровню снижения скорости частоты в ЭЭС. В основном эти требования обеспечиваются возможностями гибких систем автоматического управления (САУ) ВИЭ и мероприятиями по управлению режимами работы ВИЭ, например, резервирование мощности путем работы их в неполной загрузке [6]. Для СЭС

участие в поддержании частоты реализуется применением в САУ СЭС блока синтетической инерции (СИ) и работой в режиме «недогрузки».

Использование синтетической инерции обычно применимо к ветроэлектростанциям [7], однако возможности гибкого управления СПН СЭС позволяют применять СИ для СЭС. На рис. 1 представлена структура блока СИ в САУ СПН в виде двухконтурной схемы управления.

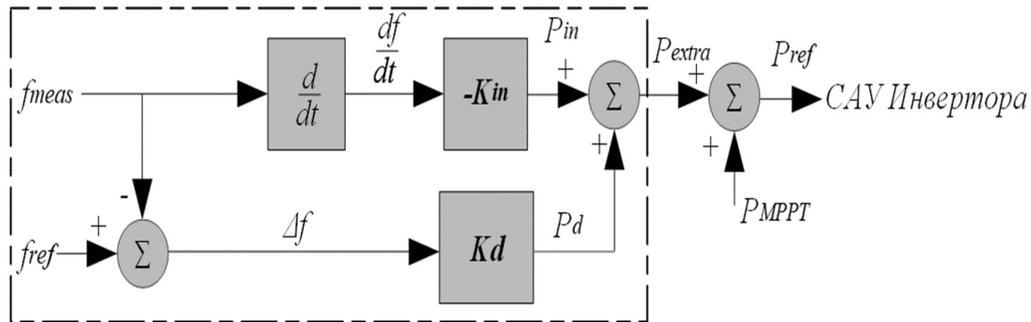
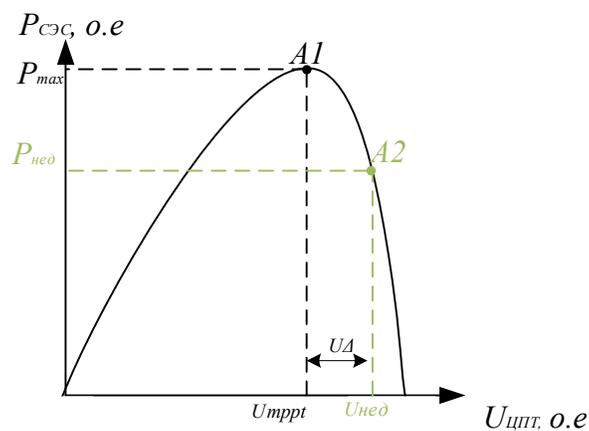


Рис. 1. Структурная схема блока синтетической инерции

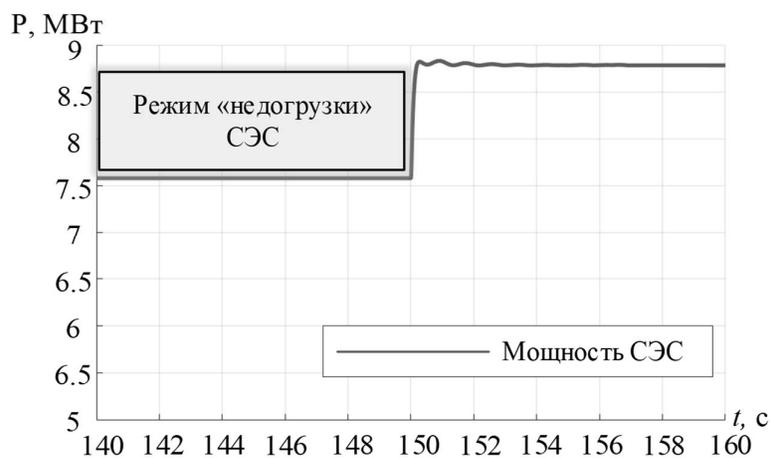
Дифференциальный канал СИ работает пропорционально скорости изменения частоты и коэффициенту усиления  $K_{in}$ . Контур статизма по частоте инжектирует дополнительную мощность пропорционально отклонению частоты и коэффициенту статизма  $K_d$ . Такое управление СИ обеспечивает лучший частотный отклик при небалансе частоты в ЭЭС. При этом в доступной литературе нет методики по расчету коэффициентов при применении СИ для СЭС.

Режим «недогрузки» СЭС реализуется посредством изменения положений рабочих точек характеристики выдачи мощности в контроллере отслеживания точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) в установившемся режиме (рис. 2, а). Для разгрузки СЭС, напряжение в цепи постоянного тока (ЦПТ) повышают, смещая точку MPPT на величину  $\Delta U$ , выходная мощность уменьшается и создается резерв мощности (рис.2, б), который может быть использован для обеспечения инерционного отклика и участия в регулировании частоты [8].

В проведенном исследовании в САУ СПН СЭС была реализована схема управления СИ и режим «недогрузки». В режиме «недогрузки» СЭС работает с резервом активной мощности, составляющий 10% от номинальной [8]. Коэффициенты контуров управления СИ были подобраны опытным путем. Проведен опыт изменения нагрузки в сети с СЭС. На рис. 3 представлены осциллограммы изменения частоты при нормативном возмущении в ЭЭС (наброс нагрузки).



а)



б)

Рис. 2. Зависимость мощности от напряжения постоянного тока СЭС (а), осциллограмма активной мощности СЭС (б)

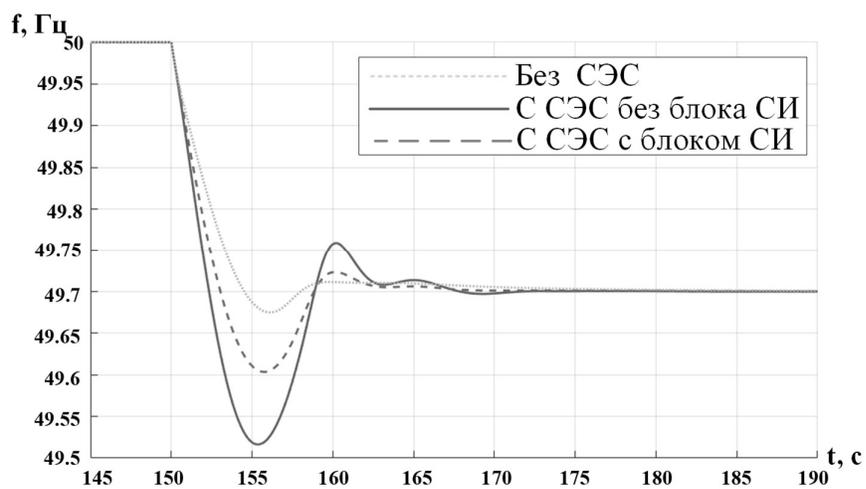


Рис. 3. Осциллограммы изменения частоты в сети

Результаты исследования показывают, что при изменении нагрузочного режима в сети со значительной долей солнечной генерации величина снижения частоты становится значительной, также возрастает скорость изменения частоты. Модернизация САУ СЭС приближает переходный процесс к традиционным ЭЭС и позволяет поддерживать устойчивую работу ЭЭС. Резервируемая мощность в СЭС, которая инжектируется за счет СИ, обеспечивает необходимый инерционный отклик. При этом важным фактором эффективного управления СЭС в ЭЭС с низкой инерцией является настройка САУ СПН: координация настройки МРРТ, выбор, и расчет коэффициентов контуров управления СИ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-3249.2021.4

### Библиографический список

1. Renewable Energy Market Update 2021. // [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021> (дата обращения 20.03.2022).
2. National Grid, Voltage and Frequency Dependency. National Grid, 2018. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/SOFReport-Fr%equenceandVoltageassessment.pdf> (дата обращения 20.03.2022).
3. Huang S., Schmall J., Conto J., Adams J., Zhang Y., Carter C. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience. // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, pp. 1-7.
4. JWG C2/C4.41: Impact of High Penetration of Inverter-based Generation on System Inertia of Networks. // [Электронный ресурс]. URL: <https://e-cigre.org/publication/wbn022-impact-of-high-penetration-of-inverter-based-generation-on-system-inertia-of-networks>.
5. Seneviratne Chinthaka, Ozansoy C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation – A literature review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 57, pp. 659-668.
6. Cheng, Y., Azizpanah-Abarghoee, R., Azizi, S., Ding, L., Terzija, V. Smart Frequency Control in Low Inertia Energy Systems Based on Frequency Response Techniques: A Review. Appl. Energy 2020, 279.
7. Mohammad D, Mokhlis H., Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 69, pp. 144-155.
8. Pieter Tielens, Ph.D. dissertation. Operation and control of power systems with low synchronous inertia. 2017.

I.A. Razzhivin<sup>1</sup>, V.E. Rudnik<sup>1</sup>, N.M. Kosmylina<sup>1</sup>, S.A. Litvinov<sup>2</sup>

## THE FEATURES OF SOLAR POWER PLANT CONTROL IN NETWORKS WITH LOW INERTIA

National Research Tomsk Polytechnic University<sup>1</sup>  
Gazprom добыча Yamburg<sup>2</sup>

**Abstract:** The use of power converter-connected generating units is growing rapidly. This is primarily due to the introduction of generation from renewable energy sources. With the increase in the share of such devices and, as a consequence, the reduction of grid inertia significantly changes its dynamic properties, in particular at power imbalance there is a stronger reduction in frequency and the rate of frequency change becomes significant. This paper considers the possibility of applying synthetic inertia in the control system of a solar power plant in order to possibly maintain the stable operation of the power system as a whole.

**Key words:** renewable energy sources, solar power plant frequency, synthetic inertia, static voltage converter, power system.

### References

- [1] Renewable Energy Market Update 2021. // [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021> (дата обращения 20.03.2022).
- [2] National Grid, Voltage and Frequency Dependency. National Grid, 2018. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/SOFReport-Fr%equenceandVoltageassessment.pdf> (дата обращения 20.03.2022).
- [3] Huang S., Schmall J., Conto J., Adams J., Zhang Y., Carter C. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience. // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, pp. 1-7.
- [4] JWG C2/C4.41: Impact of High Penetration of Inverter-based Generation on System Inertia of Networks. // [Электронный ресурс]. URL: <https://e-cigre.org/publication/wbn022-impact-of-high-penetration-of-inverter-based-generation-on-system-inertia-of-networks>.
- [5] Seneviratne Chinthaka, Ozansoy C. Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation – A literature review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 57, pp. 659-668.
- [6] Cheng, Y., Azizpanah-Abarghooee, R., Azizi, S., Ding, L., Terzija, V. Smart Frequency Control in Low Inertia Energy Systems Based on Frequency Response Techniques: A Review. Appl. Energy 2020, 279.
- [7] Mohammad D, Mokhlis H., Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 69, pp. 144-155.
- [8] Pieter Tielens, Ph.D. dissertation. Operation and control of power systems with low synchronous inertia. 2017.

Д. А. Сахиб

## ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ (РЗ) ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

**Аннотация:** В статье рассмотрены защиты распределительных сетей: дифференциальная защита, токовая защита и эффект мертвой зоны, а также объекты на основе распределенной генерации и микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

**Ключевые слова:** защита распределительных сетей, токовая защита, дифференциальная защита.

В последние годы структура распределительных сетей 3-20 кВ изменилась в результате изменения характера нагрузки потребителей и распределенной генерации. В связи с этим возросли проблемы защиты распределительных сетей. Надежность и защита энергосистемы станут более важными с ростом спроса на электроэнергию. Будущее систем электроэнергетики склоняется к умным или интеллектуальным цифровым сетям. "Умная" электросеть – это электрическая сеть на основе цифровых технологий, которая используется для снабжения потребителей электроэнергией посредством двусторонней цифровой связи.

Некоторые преимущества "умных" электросетей заключаются в следующем:

- 1) обеспечение двусторонних энергетических и информационных потоков;
- 2) создание широко масштабной системы мониторинга и повсеместного контроля за режимом электрической сети;
- 3) обеспечение энергетической эффективности и управления спросом;
- 4) включение в существующую энергосистему возобновляемых источников энергии;
- 5) обеспечение самовосстановления и отказоустойчивости в случае кибер- и физических атак или системных нарушений.

Совокупность взаимосвязанных нагрузок и распределенных генераторов в четко определенных электрических границах, действующих как единый управляемый объект, должна работать как параллельно с энергосистемой, так и в изолированном режиме. Увеличение стоимости передачи энергии от электростанций к потребителям, необходимость повышения надежности системы и экологических преимуществ оправдывают переход к распределенным технологиям генераторов [1]. В существующих методах защиты микросети существует проблемы с точки зрения устранения мертвых зон, неправильного действия защитных реле, снижения уровня повреждаемости.

Типичная модель микросети, которая соединена с внешней сетью в точке общего соединения, показана на рис.1.

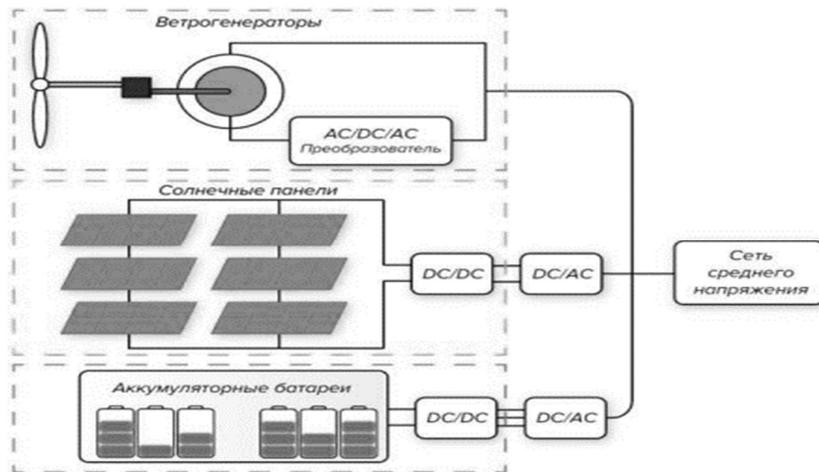


Рис. 1. Типичная модель микросети

Основной проблемой распределенных источников является их негативное воздействие на систему защиты. Наличие распределенного генератора изменяет электрический режим в распределительной сети и усложняет релейную защиту. Традиционные структуры распределительных сетей радиальны и, следовательно, обычно система защиты предназначена для радиальной схемы. Добавление распределенного генератора приводит к изменению направления потока мощности в распределительной сети. Кроме того, уровни тока коротких замыканий могут изменяться из-за распределенного генератора [2]. Это может привести к потере селективности, чувствительности и быстродействия защиты.

#### Токовая защита

Защита от перегрузки по току и замыкание на землю являются основными защитными устройствами в обычных распределительных сетях. Ток короткого замыкания от источника, наблюдаемый реле тока, уменьшается за счет влияния распределенного генератора, когда генератор размещен между точкой замыкания и токовой защитой.

В [5] предложена полная система защиты микросети с использованием программ PSCAD/EMTDC и ETAP для обеспечения более стабильной работы микросети. Значения параметров срабатывания реле были скорректированы в результате моделирования.

Другой метод предложен в [6] для улучшения токовой защиты и основан на ускорении срабатывания защиты и оптимизации координации защиты в микросетях.

Микросеть с большим количеством распределенных генераторов и нагрузок может работать в изолированном режиме или в параллельном. Распределенный генератор должен быть отключен при возникновении любого типа КЗ в сети [10]. Основным преимуществом является то, что параллельный режим позволяет микросети подавать энергию на локальные нагрузки для повышения надежности электроснабжения. Однако в такой системе защита и управление микросетью в

режиме параллельной работы с внешней сетью и в изолированном режиме весьма сложны. Токовые защиты неспособны защитить микросеть в таких режимах [7].

### Дифференциальная защита

Еще одним распространенным методом защиты линий электропередачи и трансформаторов в энергосистемах является дифференциальная защита. Принцип работы дифференциального реле основан на использовании небаланса тока в конкретной зоне защиты. Метод дифференциальной защиты имеет значительно большую чувствительность и может обнаруживать малые токи короткого замыкания в микросети. Однако этот метод не может использоваться в качестве резервной защиты и не подходит для обнаружения повреждения вне зоны защиты. Метод также использует каналы связи, что является недостатком. На рис. 2 показана схема дифференциальной защиты микросети с каналом связи.

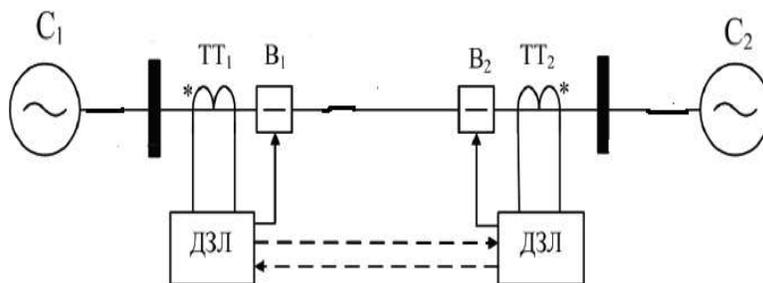


Рис.2. Схема дифференциальной защиты микросети с каналом связи

Обычно эта схема имеет абсолютную селективность, поскольку она зависит от связи между началом и концом защищаемой линии. Авторы [8] исследовали адаптивную систему дифференциальной защиты. Метод делит энергосистему на различные зоны защиты, которые определяются динамически. Система защиты адаптивно меняется с топологическими изменениями энергосистемы. Эта дифференциальная защита позволяет повысить чувствительность к малым токам повреждений, таких как в повреждении с высоким переходным сопротивлением в месте повреждения или повреждения в инверторах. Схема защиты для солнечных электростанций в микросетях постоянного тока была предложена в [9]. Этот метод основан на дифференциальной защите, которая используется в качестве резервной защиты. Однако эта схема защиты может использоваться только в изолированном режиме. Метод основан на эквивалентной схеме распределительной системы и использует в качестве централизованной схемы защиты центр управления с высокоскоростной связью.

### Выводы

В статье представлен анализ защиты по току и дифференциальной защиты в энергосистемах и микросетях. Микроэнергосистемы вызывают много проблем в защите энергосистемы. Распространение распределенной генерации в

микросетях требует пересмотра системы защиты. Главная проблема будущего – реконфигурация сетей, миграция нагрузок и множество распределенной генерации. Традиционные защиты не смогут правильно работать в новых условиях:

1) Массовое внедрение новых технологий распределенной генерации в распределительные сети, что требует адаптивности систем защиты для правильной работы в соответствии с новыми определяющими факторами;

2) Построение правильно работающей системы защиты требует наличия информационной сети;

3) Для повышения устойчивости работы распределенных генераторов требуется высокое быстродействие релейной защиты.

Для простых сетей (сельские сети) защиты могут быть простыми. Распределенные энергетические ресурсы должны быть изолированы от сети по повреждении.

#### Библиографический список

1. **Брахма, С.М.** Разработка схемы адаптивной защиты распределительных систем с высоким проникновением распределенной генерации / С.М. Брахма, А.А. Гиргис// IEEE Trans.Power Del. 2004, №19, С. 56–63.
2. **Касагранде, Э.** Схема защиты компонентов дифференциальной последовательности для микросетей с распределенными генераторами на основе инверторов/ Э. Касагранде, В Вун., Х. Зейнельдин, Д. Светинович IEEE транс. Умная сеть 2013, № 5, С. 29–37.
3. Нормы времени на техническое обслуживание устройств релейной защиты и автоматики. - М.: Энергия, 2014. - 116 с.
4. М.А. Шабад, Расчеты защиты и автоматики распределительных сетей/ Шин Х., Че С.Х., Ким Э.-Х. Проектирование схем защиты микросетей с использованием программ PSCAD/EMTDC и ETAP. Энергия 2020, № 13, С. 5784.
5. Цзи, Л. Улучшенный метод защиты от перегрузки по току с обратнoзависимой выдержкой времени для микросети с оптимизированным ускорением и координацией /Л. Цзи, [и др] //Энергии 2020, № 13, С. 5726.
6. Замани, М.А., Яздани А., Сидху Т.С. Стратегия защиты с помощью связи для микросетей среднего напряжения на основе инверторов. IEEE транс. Smart Grid 2012, №3, С. 2088–2099.
7. Сео, Х.-К. Новая схема защиты в контурной распределительной системе с распределенной генерацией// Энергии 2020, № 13, С. 5897
8. Шабани, А., Оценка схемы защиты от перегрузки по току с помощью связи для фотоэлектрической микросети постоянного тока / К. Мазлуми //IEEE транс. Smart Grid 2019, №11, С. 429–439)

**J. A. Sahib**

**REVIEW OF THE PROBLEM OF USING NEW TYPES OF DIGITAL  
RELAY PROTECTION (RP) FOR ELECTRICAL NETWORKS WITH  
RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
JSC "Central Research Institute"

**Abstract:** The article presents the protection of distribution networks: differential protection, current protection and the dead zone. As well as objects based on distributed generation and micro-generation based on renewable energy sources (RES).

**Key words:** protection of distribution networks, current protection, differential protection.

**References**

- [1] Brahma, S.M.; Girgis, A.A. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation. IEEE Trans. Power Del. 2004, no.19, pp . 56–63.
- [2] Casagrande, E.; Woon, W.; Zeineldin, H.; Svetinovic, D. A differential sequence component protection scheme for microgrids with inverter-based distributed generators. IEEE Trans. Smart Grid 2013, no. 5, pp.29–37.
- [3] Time limits for maintenance of relay protection and automation devices. M.: Energy, 2014. - 116 p.
- [4] M.A. Shabad, Calculations of protection and automation of distribution networks.
- [5] Shin, H.; Chae, S.H.; Kim, E.-H. Design of microgrid protection schemes using PSCAD/EMTDC and ETAP programs. Energies 2020, no.13, p 5784.
- [6] Ji, L.; Cao, Z.; Hong, Q.; Chang, X.; Fu, Y.; Shi, J.; Mi, Y.; Li, Z. An improved inverse-time over-current protection method for a microgrid with optimized acceleration and coordination. Energies 2020, no. 13, p. 5726.
- [7] Zamani, M.A.; Yazdani, A.; Sidhu, T.S. A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids. IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 2088–2099.
- [8] Seo, H.-C. New protection scheme in loop Distribution system with distributed generation. Energies 2020, no. 13, p 5897.
- [9] Shabani, A.; Mazlumi, K. Evaluation of a communication-assisted overcurrent protection scheme for photovoltaic-based DC microgrid. IEEE Trans. Smart Grid 2019, no. 11, pp. 429–439.

О.С Хватов, Д.С. Кобяков

## ВАРИАНТЫ СТРУКТУРЫ РЕГУЛЯТОРА ОБОРОТОВ АСИНХРОННОЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация:** В статье рассмотрены различные варианты реализации структуры регулятора оборотов асинхронной дизель-генераторной электростанции переменной частоты вращения. Приведена имитационная модель регулятора оборотов на базе нечеткого ПИ-регулятора и диаграммы выходных сигналов регулятора оборотов в режиме коммутации нагрузки.

**Ключевые слова:** асинхронный дизель-генератор переменной частоты вращения, регулятор оборотов, задатчик экономичного режима, нечеткий (fuzzy) ПИ-регулятор.

Развитие малой энергетики, существенная доля генерирующих мощностей которой создается дизель-генераторными установками (ДГУ), неразрывно связано с разработкой ДГУ переменной частоты вращения (ДГПЧВ), которые обеспечивают энергоэффективную работу на долевых нагрузочных режимах [1].

Как правило, в качестве электрического генератора в дизельных электростанциях используется синхронная машина. Развитие полупроводниковой преобразовательной техники, в частности, появление активных выпрямителей напряжения (АВН), позволяет расширить варианты построения силовой структуры ДГПЧВ. Во-первых, становится возможным отказаться от использования в составе силового оборудования трансформаторов, что снижает массогабаритные показатели ДГПЧВ.

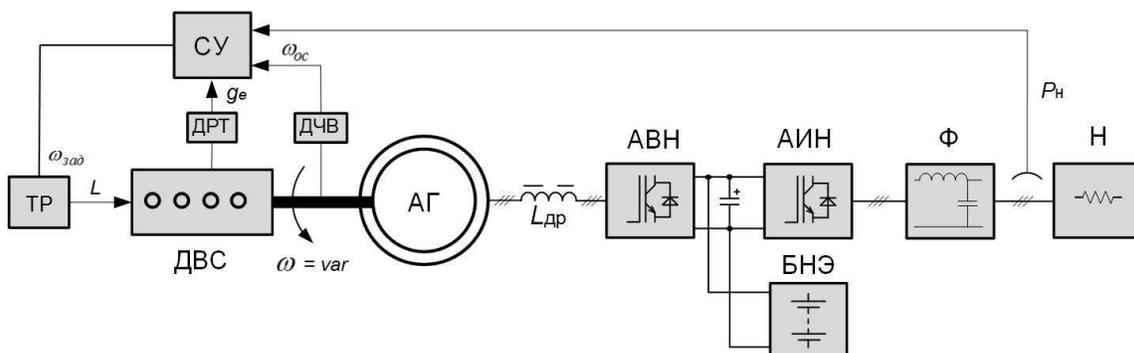


Рис.1. Структурная схема ДГПЧВ на основе АГКЗ и АВН:

ТР – топливный регулятор, ДРТ – датчик расхода топлива, ДЧВ – датчик частоты вращения, СУ – система управления, АИН – автономный инвертор напряжения, БНЭ – буферный накопитель энергии, Ф – фильтр, Н – нагрузка

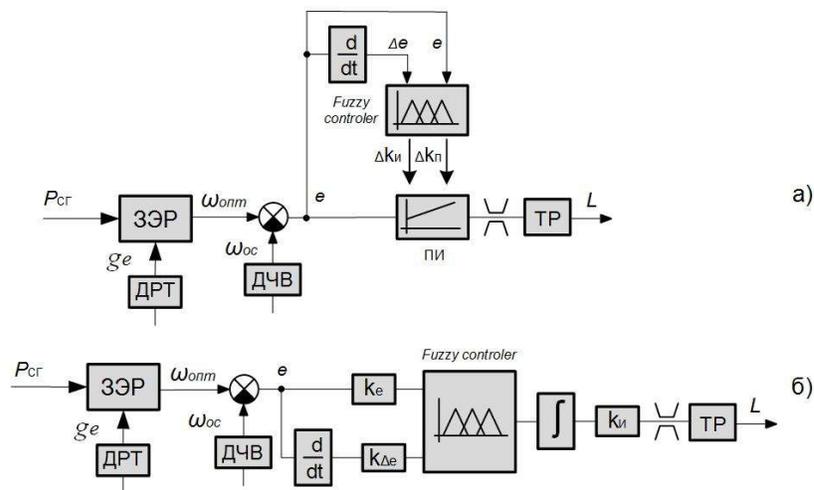
Во-вторых, в качестве электрического генератора может быть использована надежная и дешевая асинхронная короткозамкнутая машина (АГКЗ). На рис. 1 представлена структурная схема ДГПЧВ на основе АГКЗ и АВН.

Повышенные энергетические показатели ДГПЧВ обеспечиваются за счет принудительного регулирования частоты вращения ДВС на долевых нагрузочных режимах в соответствии с многопараметровой характеристикой дизеля. Таким образом, работа электростанции происходит при оптимальном (близком к номинальному) удельном расходе углеводородного топлива. Система управления ДГПЧВ объединяет систему управления подачей топлива в ДВС и систему управления выпрямительно-инверторным преобразователем в статоре АГКЗ, которая обеспечивает стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии (частоты и амплитуды напряжения в сети). Система управления подачей топлива, непосредственно связанная с принудительным регулированием частоты вращения ДВС, состоит из задатчика экономичного режима работы (ЗЭР), регулятора оборотов ДВС (РО), топливного регулятора (ТР) (сервопривода перемещения рейки топливного насоса), а также датчиков активной мощности, удельного расхода топлива и частоты вращения ДВС.

В статье рассмотрены варианты структуры регулятора оборотов ДВС [2]. Назначение РО заключается в поддержании необходимой частоты вращения ДВС, при которой обеспечивается энергоэффективная работа ДГПЧВ на долевых нагрузочных режимах электростанции. Предлагается рассмотреть варианты РО на основе нечеткой (fuzzy) логики. Следует выделить два основных варианта РО данной аппаратной реализации:

- гибридный нечеткий ПИ – регулятор (гибридный fuzzy ПИ–регулятор);
- нечеткий ПИ–регулятор (fuzzy ПИ–регулятор).

Структурные схемы указанных вариантов РО представлены на рис. 2.



**Рис.2. Варианты структурных схем блока РО на базе:**  
 а – гибридного fuzzy ПИ-регулятора; б – fuzzy ПИ-регулятора

Информация о величине активной мощности нагрузки ( $P_{\text{нар}}$ ) и удельном расходе топлива ДВС ( $g_e$ ) поступает в ЗЭР. В ЗЭР определяется значение оптимальной частоты вращения ДВС ( $\omega_{\text{опт}}$ ), которое поступает в РО. Далее РО, осуществляя сравнение оптимальной и текущей частот вращения ДВС, формирует сигнал управления на вход топливного регулятора, который непосредственно управляет положением рейки топливного насоса, обеспечивая энергоэффективную работу электростанции.

В качестве варианта РО для дальнейшего исследования режимов работы ДГПЧВ выбран нечеткий ПИ-регулятор, как наиболее подходящий, по нашему мнению, для данного объектного применения.

На рис. 3 и рис. 4 представлены имитационные модели fuzzy ПИ-регулятора оборотов и системы управления ДВС с fuzzy ПИ-регулятором оборотов соответственно. Регулятор оборотов реализован на основе метода Мамдани (метод активации—min) с двумя входными ( $e$ ,  $de/dt$ ) и одним выходным (*output*) каналом [3]. При этом агрегирование осуществляется операцией min-конъюнкции, а аккумуляция заключений правил реализована на базе метода max-дизъюнкции. Входные переменные описывается пятью лингвистическими правилами.

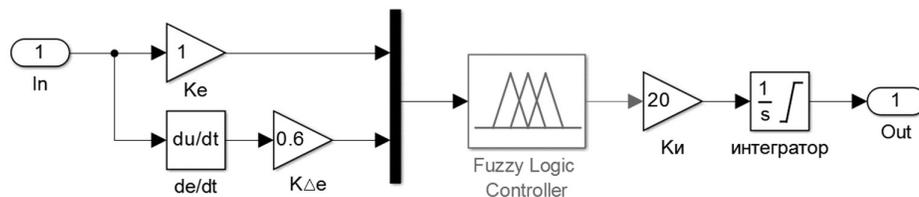


Рис.3. Имитационная модель регулятора оборотов на основе fuzzy ПИ-регулятора

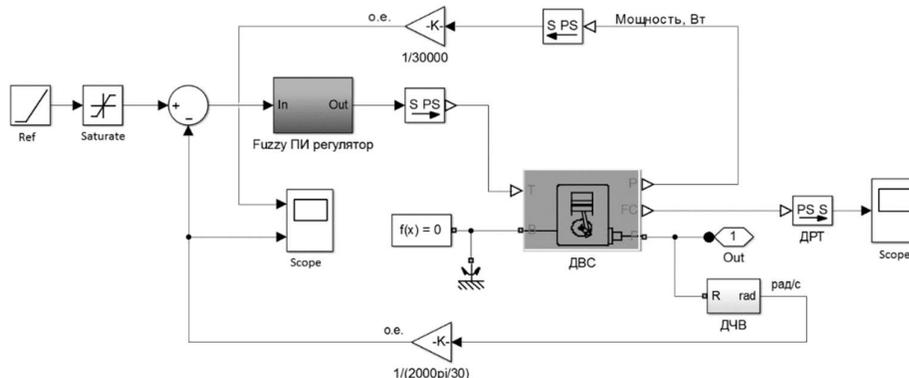
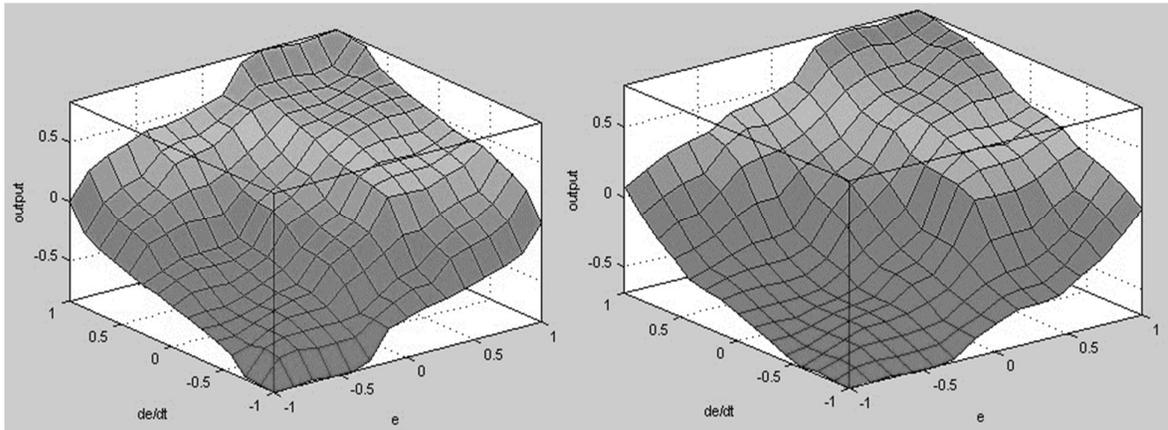


Рис.4. Имитационная модель системы управления ДВС с fuzzy ПИ-регулятором

На рис.5 представлены трехмерные поверхности fuzzy ПИ-регулятора для различных форм функций принадлежности. По горизонтальным осям отложены значения входных переменных ( $e$ ,  $de/dt$ ), по вертикальным осям – значения выходной переменной (*output*).

На рис. 6 показаны диаграммы выходных сигналов ПИ-регулятора и fuzzy ПИ-регулятора оборотов для режима наброса 50 % нагрузки на электростанцию

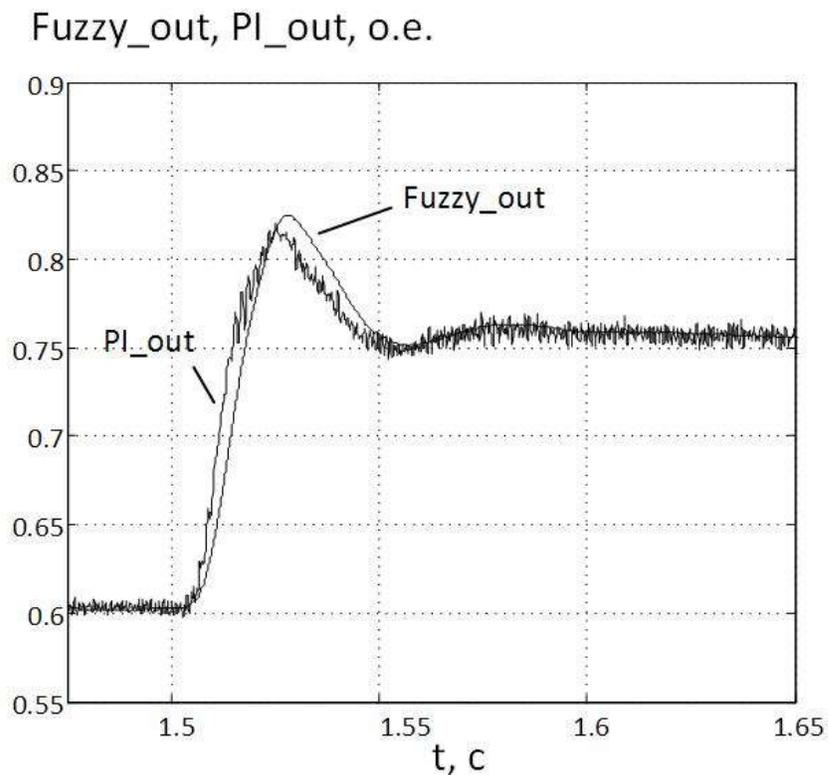
в момент времени 1,5 с. Отметим, что показатели регулирования в статике (статическая ошибка регулирования) практически одинаковы для обоих типов регу-



лятора оборотов.

**Рис.5. Поверхности «входы – выход» нечеткого (fuzzy) ПИ-регулятора оборотов ДВС:**  
*a*– треугольные функции принадлежности; *б*– гауссовы функции принадлежности

При этом fuzzy ПИ-регулятор, как самонастраивающийся регулятор, более предпочтителен для использования в составе ДППЧВ, учитывая различную марку используемого углеводородного топлива, а также возможные изменения условий окружающей среды (температура, влажность и др.) [4].



**Рис.6. Диаграммы выходных сигналов fuzzy ПИ-регулятора (Fuzzy\_out) и ПИ-регулятора (PI\_out) блока регулятора оборотов дизельного двигателя**

#### **Библиографический список**

1. **Артюхов, И. И.** Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала / И. И. Артюхов, С. Ф. Степанов, Д. А. Бочкарев, Е. Т. Ербаев // *Вопр. электротехнологии*. 2015. № 1. С. 58–64.
2. **Хватов, О.С.** Повышение эффективности дизель-генераторной электростанции / О.С. Хватов, Д.С. Кобяков // *Электротехника*. – 2020. № 12. – С. 25–31.
3. **Хватов, О. С.** Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: моногр. Н. Новгород / А. Б. Дарьенков, И. С. Самоявчев, И. С. Поляков: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. 172 с.
4. Delgado C., Dominguez-Navarro J. A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies // *Ninth international conference on publication year (EVER)*. 2014. P. 1–8.
5. **Гельман, М. В.,** Преобразовательная техника: учеб. пособие / М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. 425 с.

O. S. Khvatov, D. S. Kobyakov

**STRUCTURE OPTIONS OF THE SPEED REGULATOR  
OF ASYNCHRONOUS DIESEL GENERATOR POWER PLANT  
OF VARIABLE SPEED**

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract:** The article considers various options for implementing the structure of the speed controller of an asynchronous diesel generator power plant with variable speed. A simulation model of the speed controller based on a fuzzy PI controller and a diagram of the output signals of the speed controller in the load switching mode is presented.

**Keywords:** variable speed asynchronous diesel generator, speed controller, economy mode setpoint, fuzzy PI controller.

**References**

- [1] Artyuhov I. I., Stepanov S. F., Bochkarev D. A., Erbaev E. T. Osobennosti postroeniya avtonomnyh sistem elektropitaniya na osnove generatorov s izmenyaemoj skorost'yu vrashcheniya vala [Features of building autonomous power supply systems based on generators with variable shaft rotation speed]. *Voprosy elektrotekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 58-64 (in Russian)
- [2] Khvatov O.S., Kobyakov D. S. Povyshenie effektivnosti dizel'-generatornoj elektrostancii [Improving the efficiency of a diesel generator power plant]. *Elektrotehnika*, 2020, no. 12, pp. 25-31 (in Russian)
- [3] Khvatov O.S., Dar'enkov A. B., Samoyavchev I. S., Polyakov I. S. Avtonomnye generatornye ustanovki na osnove dvigatelej vnutrennego sgoraniya peremennoj chastoty vrashcheniya: monografiya [Autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines: monograph]. Nizhnij Novgorod, Izd-vo NGTU imeni R. E. Alekseeva, 2016. 172 p (in Russian)
- [4] Delgado C., Dominguez-Navarro J. A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies. Ninth international conference on publication year (EVER), 2014. Pp. 1-8 (in USA)
- [5] Gel'man M. V., Dudkin M. M., Preobrazhenskij K. A. Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoe posobie [Conversion technique: Teaching guide]. Chelyabinsk, Izd-vo YUUrGU, 2009. 425 p (in Russian)

А.В. Шалухо, Р. Ш. Бедретдинов, И.А. Липужин, Ю.Н. Шувалова

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОЛИМЕРНОЙ ПРОТОНОБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** Статья посвящена исследованию характеристик топливного элемента с полимерной протонобменной мембраной мощностью 1 кВт. Исследования были проведены в лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева с помощью лабораторного стенда. Результаты исследований предназначены для разработки системы управления гибридным энергетическим комплексом с топливным элементом, обеспечивающей эффективную работу комплекса и надежное питание потребителя.

**Ключевые слова:** водород, топливный элемент, лабораторный стенд, эффективность.

### Введение

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации, на период до 2035 года [1] водородная энергетика рассматривается одним из направлений перехода к безуглеродной экономике. Наиболее перспективными установками для получения электроэнергии из водорода являются топливные элементы.

Топливный элемент (ТЭ) — это химический источник тока, обеспечивающий прямое преобразование химической энергии в электрическую. ТЭ обладают рядом преимуществ: экологичность, высокий КПД, модульность конструкции, отсутствие шума и т.д.

Однако широкому внедрению ТЭ, в том числе, препятствуют две важные технические проблемы:

1) недостаточный ресурс работы ТЭ – мембрана ТЭ подвержена деградации, в результате чего срок службы ТЭ при неодинаковых внешних условиях может варьироваться от 5000 до 40000 часов;

2) низкая маневренность – ТЭ, в силу низкой скорости химических реакций, обладают инертностью при работе в условиях резких изменений нагрузок.

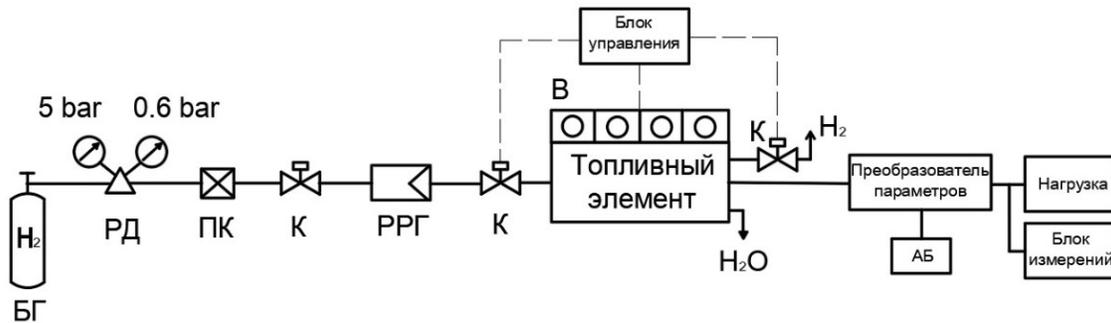
Наиболее эффективное решение данных проблем заключается в комбинированном использовании ТЭ с накопителями электроэнергии в гибридном энергетическом комплексе (ГЭК).

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева разрабатывается экспериментальный образец ГЭК на основе низкотемпературного топливного элемента и аккумуляторных батарей [9]. В разрабатываемом комплексе используется ТЭ с полимерной протонобменной мембраной (ПОМТЭ), мощностью 1 кВт.

Для разработки системы управления экспериментального образца ГЭК, обеспечивающей эффективную работу ГЭК в установившихся режимах проведены экспериментальные исследования работы ПОМТЭ.

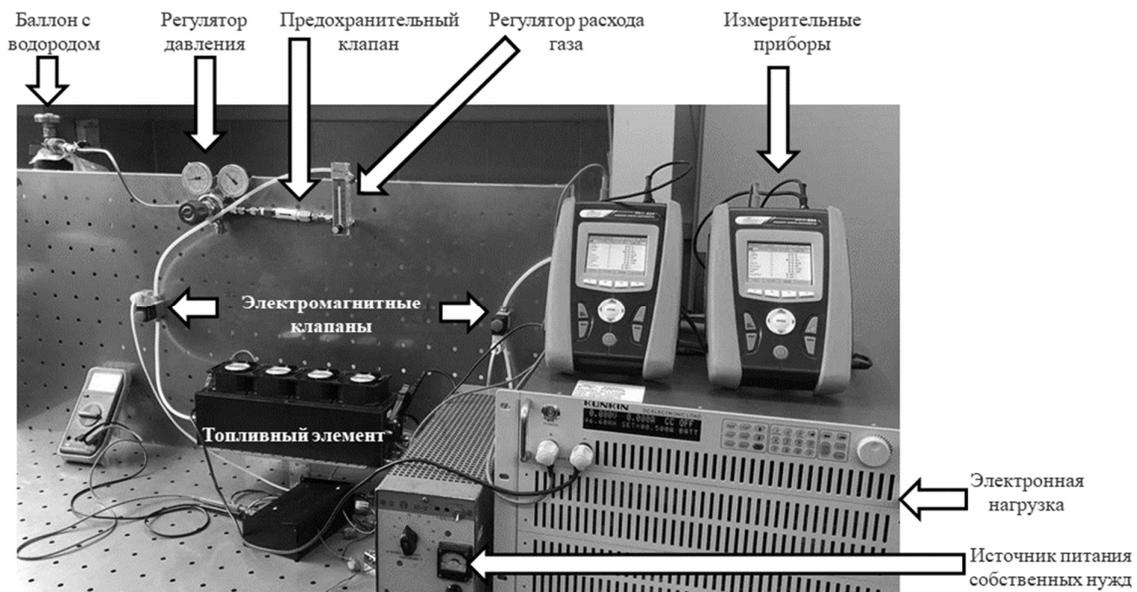
**Лабораторный стенд для проведения экспериментальных исследований**

Для проведения экспериментальных исследований экспериментального образца ГЭК разработан лабораторный стенд, включающий комплект контрольно-измерительного оборудования и регулирующую нагрузку (рис. 1, 2).



**Рис. 1. Структурная схема лабораторного стенда:**

БГ – газовый баллон с водородом, РД – регулятор давления, ПК – предохранительный клапан, К – электромагнитные клапаны, В – вентиляторы, РРГ – регулятор расхода газа, АБ – аккумуляторные батареи



**Рис. 2. Фото лабораторного стенда**

С помощью лабораторного стенда проведены исследования ПОМТЭ и определен КПД при различной нагрузке.

**Исследование КПД работы топливного элемента**

В общем случае под КПД ТЭ ( $\eta_{ТЭ}$ ) понимается отношение электроэнергии, выработанной ТЭ, к энергии, которая была запасена в использованном ТЭ водороде:

$$\eta_{ТЭ} = W_{ТЭ} / Q, \quad (1)$$

где  $W_{ТЭ}$  – выработанная ТЭ электроэнергия;  $Q$  – энергия, которая была запасена в поступившем на вход ТЭ водороде.

Значение  $W_{ТЭ}$  можно выразить в кДж (1 кВтч = 3,6 кДж), используя выражение:

$$W_{ТЭ} = (U_{ТЭ} \cdot I_{ТЭ} \cdot \Delta t \cdot 3,6) / 60, \quad (2)$$

где  $P_{ТЭ} = U_{ТЭ} \cdot I_{ТЭ}$  – мощность на выходе ТЭ;  $\Delta t$  – интервал времени в минутах, за который определялась выработка электроэнергии.

Значение  $Q$ , выраженное в кДж, можно определить на основе измерений расхода водорода, который переведен в количество вещества:

$$Q = n \cdot 286, \quad (3)$$

где  $n$  – количество вещества в моль.

Значение  $n$  можно определить с учетом рабочих параметров ПОМТЭ (давление водорода и температура), используя уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$n = (P \cdot V) / (R \cdot T), \quad (4)$$

где  $P$  – давление (атм.);  $V$  – объем использованного водорода (л);  $R$  – газовая постоянная ( $R = 0,821$  л·атм / моль·К);  $T$  – температура (К).

С помощью лабораторного стенда проведены измерения потребления водорода ТЭ за 1 минуту при работе в установившемся режиме с нагрузкой от 0 до 22 А с шагом 1 А. На основе полученных результатов построена зависимость среднего расхода водорода за 1 мин. от тока нагрузки при  $P = 0,6$  атм (рис. 3).

Приведенный график представляет собой линейную зависимость среднего расхода водорода от тока нагрузки.

При нулевом токе нагрузки потребление водорода ТЭ составляет 2 л/мин. Это связано с химическими процессами, происходящими внутри ТЭ, которые формируют напряжение в разомкнутой цепи. Максимальный расход водорода наступает при максимальной нагрузке и составляет 17 л/мин.

По формулам (1)-(4) на основе результатов измерений для нагрузки от 0 до 22 А с шагом 1 А выполнены расчеты  $\eta_{ТЭ}$  (рис. 4).

Согласно приведенному графику, в области активационных потерь (0-3 А) КПД ТЭ менее 35%. Это связано с малым содержанием водорода на участке и медленными реакциями на поверхности электродов. Можно сделать вывод, что при подобной загрузке для питания потребителей целесообразнее использовать аккумуляторные батареи (АБ), входящие в состав ГЭК.

В области омических потерь (4-17 А) ТЭ обладает максимальным КПД, который варьируется в диапазоне от 35 до 45%.

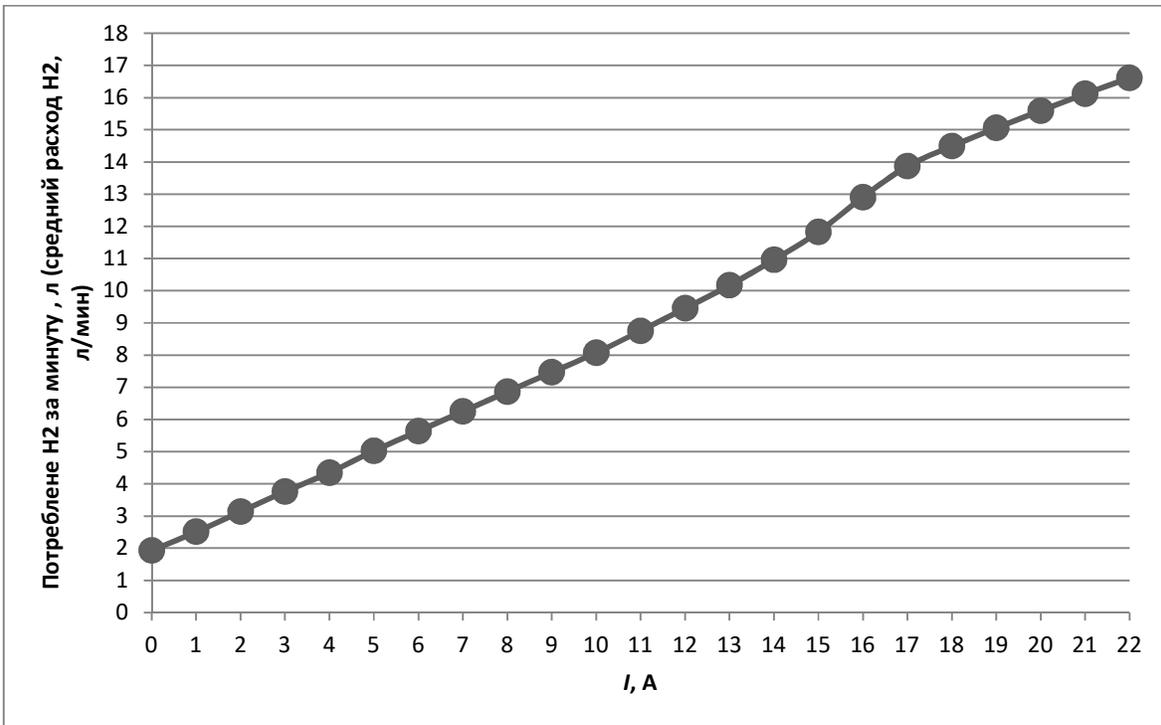


Рис. 3. Зависимость среднего расхода водорода за 1 минуту от тока нагрузки

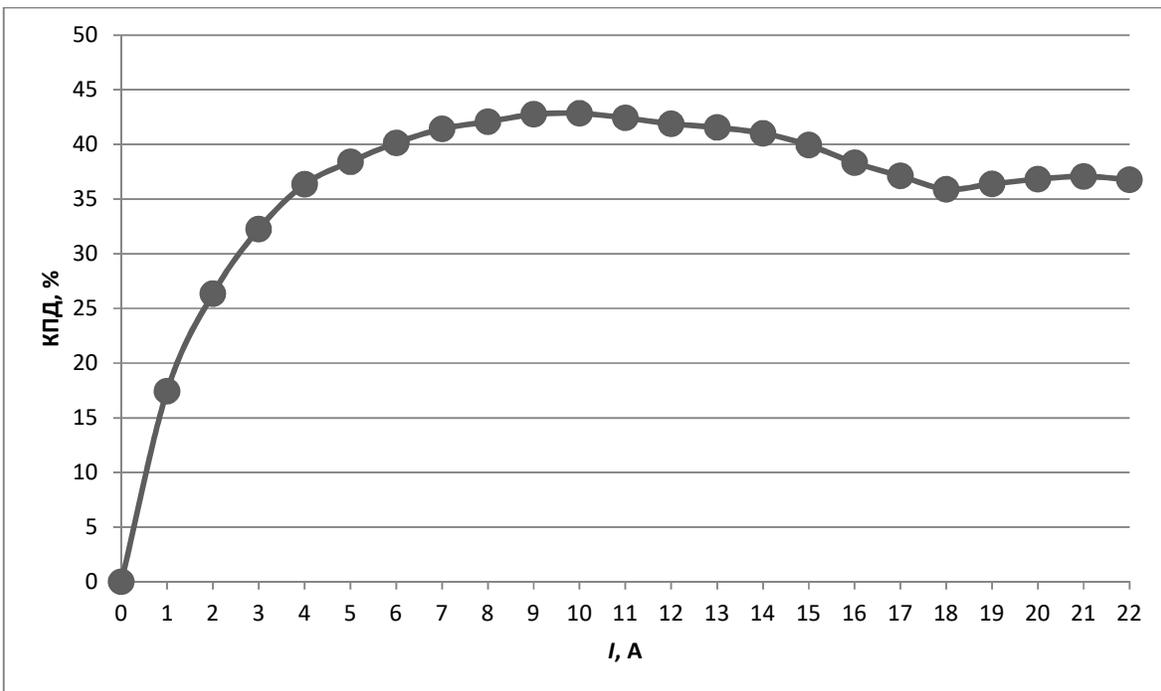


Рис. 4. Зависимость КПД ТЭ от тока нагрузки

Максимальный КПД ТЭ наступает при нагрузке 9-11 А. В данном диапазоне тока нагрузки эффективно использовать ТЭ для питания потребителя и заряда АБ.

В области транспортных потерь (18-22 А) КПД ТЭ изменяется от 35 до 38%. Снижение КПД связано с резкими увеличениями потерь при подводе и отводе реагентов в электродах. На данном участке возможно использование ТЭ, однако из-за значительных падений напряжений предпочтительнее является совместная работа ТЭ и АБ.

### **Выводы**

В работе рассмотрены преимущества и недостатки, возникающие при работе ТЭ.

Для исследования работы ТЭ в составе ГЭК разработан лабораторный стенд на основе топливного элемента с ПОМТЭ мощностью 1 кВт и литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей.

Проведены исследования работы водородного топливного элемента и определен КПД при различной нагрузке. Результаты исследований показали, что в ГЭК использование ТЭ наиболее эффективно в области омических потерь.

Результаты исследований будут использованы при разработке устройства преобразования и управления электроэнергией в составе гибридного электроэнергетического комплекса с водородными топливными элементами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.

### **Библиографический список**

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года от 9 июня 2020 г. №1523-р.
2. ГОСТ Р МЭК 60079-20-1-2011. Взрывоопасные среды. Часть 20-1. Характеристики веществ для классификации газа и пара. Методы испытаний и данные
3. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. 01.01.1991.
4. ГОСТ 12.1.010-76. Взрывобезопасность. Общие требования. 01.02.2002.
5. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. 01.09.2006.
6. ГОСТ 12.1.019-2017. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. 01.01.2021.
7. ГОСТ 12.1.018-93. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования. 01.04.2001.
8. ГОСТ 12.4.124-83. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования. 01.11.2003.
9. A. Kulikov, A. Loskutov, A. Kurkin [et al.]. Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers' power supply // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 16. DOI: 10.3390/su13169355.
10. Pandian, Meiyappan & Anwari, Makbul & Husodo, Budi & Hiendro, Ayong. (2010). Efficiency and Economics Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. 2010 Conference Proceedings IPEC.
11. Hsu, Sheng-Che & Liang, Sheng-Fu. (2012). Optimal efficiency of fuel cell/battery hybrid power management. 2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2012. 231-235. 10.1109/ICCAIS.2012.6466593.

A.V. Shalukho, R. S. Bedretdinov, I.A. Lipuzhin, Yu.N. Shuvalova

## RESEARCH OF OPERATION OF A LOW-TEMPERATURE FUEL CELL WITH A PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Russia

**Abstract:** The article is dedicated to the study of the characteristics of a fuel cell with a PEMFC a capacity of 1 kW. The research was done in the laboratory NSTU named after R.E. Alekseev on a laboratory stand. The research results are meant for the development of a control system for a hybrid energy complex with a fuel cell, which provides efficient operation of the complex and safe power supply to the consumer.

**Keyword:** hydrogen, fuel cell, laboratory stand, efficiency.

### References

- [1] Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035 dated June 9, 2020 No. 1523-p.
- [2] GOST R IEC 60079-20-1-2011. Explosive environments. Part 20-1. Characteristics of substances for the classification of gas and steam. Test methods and data
- [3] GOST 12.1.044-89. Fire and explosion hazard of substances and materials. The nomenclature of indicators and methods of their determination. 01.01.1991.
- [4] GOST 12.1.010-76. Explosion safety. General requirements. 01.02.2002.
- [5] GOST 12.1.004-91. Fire safety. General requirements. 01.09.2006.
- [6] GOST 12.1.019-2017. Electrical safety. General requirements and nomenclature of types of protection. 01.01.2021.
- [7] GOST 12.1.018-93. Fire and explosion safety of static electricity. General requirements. 01.04.2001.
- [8] GOST 12.4.124-83. Means of protection against static electricity. General technical requirements. 01.11.2003.
- [9] A. Kulikov, A. Loskutov, A. Kurkin [et al.]. Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers' power supply // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 16. DOI: 10.3390/su13169355.
- [10] Pandian, Meiyappan & Anwari, Makbul & Husodo, Budi & Hiendro, Ayong. (2010). Efficiency and Economics Analysis of Proton Exchange Mem-brane Fuel Cell. 2010 Conference Proceedings IPEC.
- [11] Hsu, Sheng-Che & Liang, Sheng-Fu. (2012). Optimal efficiency of fuel cell/battery hybrid power management. 2012 International Conference on Con-trol, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2012. 231-235. 10.1109/ICCAIS.2012.6466593.

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

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

***СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ***

Редактор **О.В. Пугина**  
Компьютерный набор и вёрстка **В.Г. Петухова**

Подписано в печать 15.09.2022. Формат 60 x 84<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 36, 25.  
Тираж 100 экз. Заказ

---

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева.  
Типография НГТУ.  
Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.