

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

**СБОРНИК СТАТЕЙ
ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ**

Нижний Новгород 2015

УДК 550.534.524
А 437

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований современных преобразователей параметров электрической энергии, элементов электрооборудования промышленных установок и систем автоматизированного электропривода, эффективности систем электроэнергетики.

Предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

В сборнике использованы материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики» 2014 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

доц. **А.Б. Дарьенков** (отв. редактор), проф. **А.Б. Лоскутов**, проф. **В.Г. Титов**,
проф. **Е.Н. Соснина**, доц. **А.И. Чивенков**, доц. **Е.В. Бычков**

УДК 550.534.524

ISBN 978-5-502-00678-1

© **Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2015**

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	5
Кралин А.А., Гуляев В.В., Богатырев В.В. Исследование гармонического состава напряжения однофазного ТТРН.....	5
Попов С.В., Бурда Е.М. Обеспечение нагрузки электрической мощностью в условиях ограниченной мощности сети.....	8
Панфилов И.С., Чивенков А.И., Панфилов С.Ю., Вихорев Н.Н. Конструкции точных изделий импульсных источников питания.....	11
Вихорев Н.Н., И.С. Панфилов, А.И. Чивенков, Панфилов С.Ю. Имитационная модель нагрузки постоянной мощности в среде Matlab/Simulink.....	15
Панкова Н.Г., Степанов К.С., Титов Д.Ю. Портативный импульсный амплитудно-модулированный источник тока.....	19
Соснина Е.Н., Кралин А.А., Асабин А.А. Модель вольтодобавочного трансформатора фазоповоротного устройства.....	24
Мнев Р.Д., Сокур П.В. Электромеханический накопитель энергии на базе асинхронизированного компенсатора.....	29
Сугаков В.Г., Малышев Ю.С., Тощев А.А., Ягжов И.И. Системы компенсации небаланса фазных напряжений.....	33
Башев А.А. Об исследовании фазовой системы управления.....	40
Башев А.А. Операторы и ядра Вольтерра одной нелинейной системы.....	44
Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	49
Лебедев С.К., Гнездов Н.Е., Колганов А.Р. Модель динамики по Бесселю для компонентов электромехатронных модулей позиционирования.....	49
Дарьенков А.Б., Поляков И.С., Гузев С.А. Техничко-экономический анализ аппаратной реализации дизель-генераторной системы переменной частоты вращения.....	53
Смирнов А.Ю., Уснунц-Кригер Т.Н., Ершова Е.А. Сравнение статических моделей явнополюсных двигателей с реактивным ротором.....	57
Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С. Электростанции автономных объектов на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения.....	62
Кузменков А.Н., Титов В.Г., Мирясов Г.М. Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником.....	69
Дарьенков А.Б., Курицын Д.Б., Ходыкина И.В. Исследование переходных режимов работы ВДЭС на основе ДВС переменной частоты вращения (постановка задачи)....	76
Слядзевская К.П. Синтез цифровых регуляторов для асинхронного частотного электропривода.....	83
Уснунц-Кригер Т.Н., Смирнов А.Ю. Минимизация пульсаций крутящего момента в коммутируемых реактивных двигателях с использованием адаптивного нечеткого управления.....	88
Бадугин Д.А., Бычков Е.В., Дарьенков А.Б., Комраков Д.А., Мельников В.Л., Смирнов Е.О., Соколов В.В. Стенд для испытания интеллектуальной системы управления ветро-дизель-электрической станции.....	92
Байков А.И., Дарьенков А.Б., Титов Д.Ю. Математические модели синхронного генератора с активно-индуктивной и выпрямительной нагрузкой.....	98
Тузов П.Ю., Сокур П.В. Преимущества применения на ГАЭС гидроагрегатов с переменной частотой вращения.....	109
Хлынин А.С. Комбинированные системы управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами.....	114

Уснунц-Кригер Т.Н., Смирнов А.Ю. Исследование влияния геометрии зубцовой зоны вентильных реактивных двигателей на пульсации вращающего момента.....	118
Шпрехер Д.М., Бабокин Г.И., Колесников Е.Б. Адаптивный контроль технического состояния многопараметрического электротехнического комплекса.....	123
Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ	128
Куликов А.Л., Ананьев В.В. Уточнение расстояния до повреждения при волновом ОМП ЛЭП.....	128
Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. Энергоэффективные трансформаторы в распределительных электрических сетях.....	133
Вагин Г.Я., Севостьянов А.А., Терентьев П.В., Малафеев О.Ю. Перспективы внедрения светодиодных источников света в государственных и муниципальных учреждениях.....	140
Грунтович Н.В., Капанский А.А. Расчетно-статистический метод оценки показателей энергоэффективности в технологических системах водоотведения.....	145
Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. Принципы организации управления распределительными городскими активно-адаптивными сетями.....	150
Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А. Simulink-модель ветродизельной электростанции с вставкой постоянного тока.....	155
Грунтович Н.В., Жуковец С.Г., Жеранов С.А., Шенец Е.Л. Оценка горизонтальной регулировочной способности по энергоэффективности промышленных производств различных отраслей промышленности.....	160
Шагидуллин А.В., Грачева Е.И. Мероприятия по повышению энергоэффективности сетей до 1кв.....	165

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

УДК 621.3(075)

А.А. КРАЛИН, В.В. ГУЛЯЕВ, В.В. БОГАТЫРЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО ТТРН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы исследования гармонического состава выходного напряжения трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения (ТТРН) при импульсно-фазовом управлении. Представлены результаты исследований поведения коэффициента мощности в зависимости от угла регулирования при активной нагрузке. Исследования проводились с использованием системы Matlab Simulink.

Ключевые слова: тиристорный регулятор напряжения, гармонический состав, коэффициент мощности.

Matlab Simulink. Questions of harmonic composition of output voltage of the thyristor voltage regulator with pulse regulation are considered. Results of power factor behavior depending on a control angle at active loading are presented. Researches were carried out by means of Matlab Simulink system.

Key words: thyristor voltage regulator, harmonic composition, power factor, Matlab Simulink.

Разработка и проектирование устройств регулирования и стабилизации параметров электроэнергии, обладающих высокими технико-экономическими показателями, является одной из актуальных задач энергосбережения.

Среди обширного класса данных устройств, различающихся как по принципу регулирования параметров электроэнергии, так и по технической реализации, особое внимание уделяется трансформаторно-тиристорным регуляторам напряжения (ТТРН) с импульсно-фазовым управлением.

Развитие полупроводниковой технологии, создание новых силовых тиристоров, существенно превосходящих по своим показателям другие регулирующие элементы, обеспечили их широкое внедрение в регуляторах и стабилизаторах самых различных назначений.

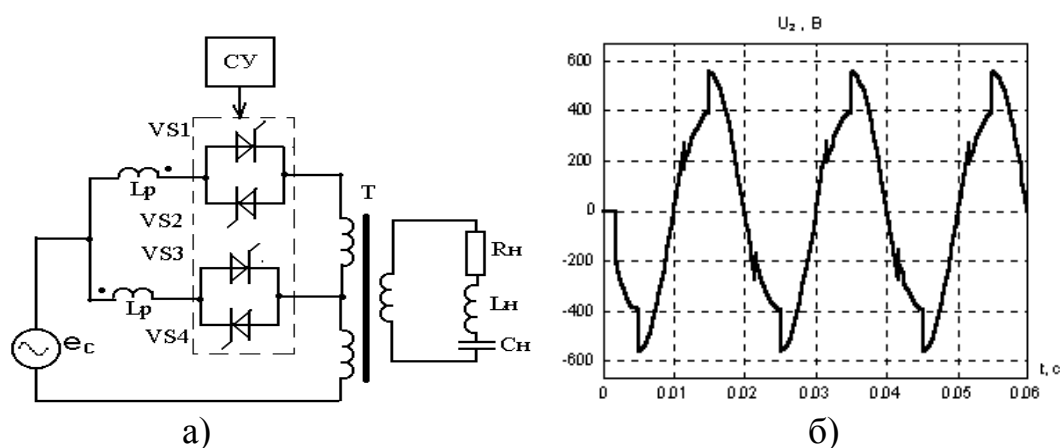
Наряду с такими достоинствами, как плавность и быстродействие регуляторов, малые массогабаритные показатели, имеются и серьезные недостатки –

искажение формы кривых регулируемого тока и напряжения, снижение коэффициента мощности в процессе регулирования. В связи с этим определение энергетических характеристик и гармонического состава регулируемого напряжения и тока является неотъемлемой частью проектирования и разработки данных устройств.

Исследование гармонического состава выходного напряжения целесообразно проводить с помощью имитационного моделирования. Это наиболее мощный и универсальный метод исследования.

В качестве платформы для моделирования использована система MATLAB Simulink.

В данной публикации представлены результаты гармонического анализа установившихся электромагнитных процессов в однофазных многоэлементных ТТРН при переключении с одной отпайки регулировочной обмотки трансформатора на другую (рис. 1).



**Рис. 1. Однофазный многоэлементный ТТРН (а);
выходное напряжение ТТРН в режиме "закоротка ВТ-вольтдобавка" (б)**

Определим гармонический состав кривых регулируемого напряжения в ТТРН при различных параметрах регулирования и значениях фазового угла нагрузки. Для кривых подобного типа в гармоническом составе отсутствуют постоянная составляющая и гармоники четного порядка. Это иллюстрирует спектрограмма напряжения рис. 2.

На рис. 3 приведены полученные зависимости амплитуды первой гармоники в функции угла регулирования α при различных значениях глубины регулирования и фазового угла нагрузки φ_H . На рис. 4 в качестве примера приведены графики, иллюстрирующие изменение амплитудных значений 3-й гармоники кривой выходного напряжения в процессе регулирования при активной нагрузке.

Установлено, что при увеличении фазового угла нагрузки φ_H амплитуды высших гармонических регулируемого напряжения возрастают.

В связи с несинусоидальностью регулируемого напряжения и тока, несинусоидален и ток, потребляемый из сети. Результаты моделирования показывают, что искажение потребляемого тока из сети сильнее, чем искажение тока нагрузки.

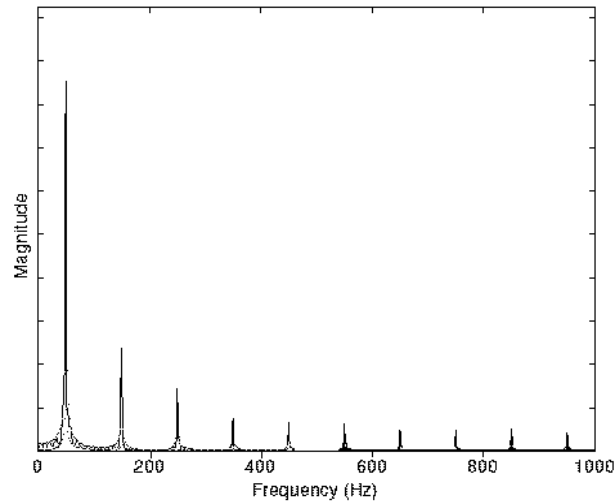


Рис. 2. Спектрограмма выходного напряжения

Несинусоидальность сетевого тока обуславливает также и понижение коэффициента мощности ТТРН. Результаты исследований поведения коэффициента мощности в зависимости от угла регулирования α при активной нагрузке ($\varphi_{\text{н}}=0$) оформлены графиками, представленными на рис. 5.

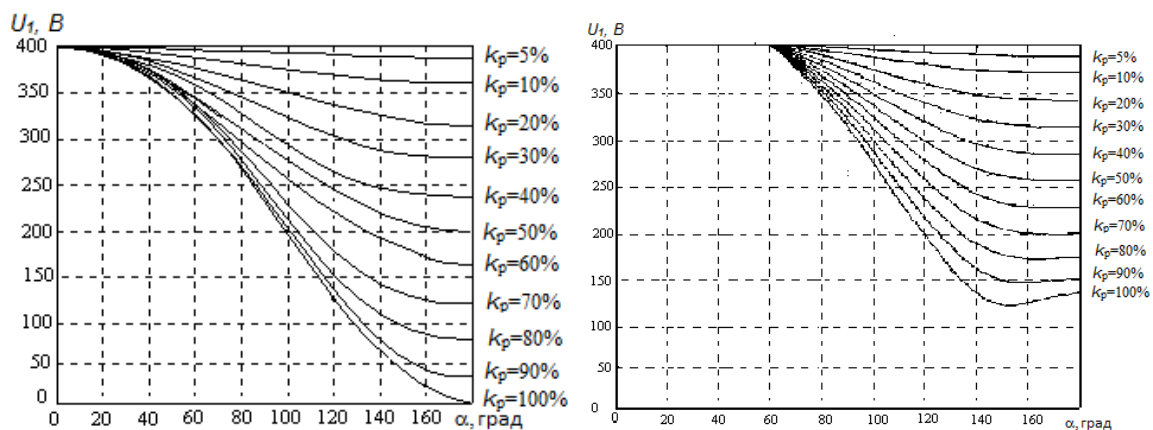


Рис. 3. Изменение амплитуды 1-й гармоники регулируемого напряжения:
а – при активной нагрузке ($\varphi=0$); *б* – активно-индуктивной нагрузке ($\varphi=600$)

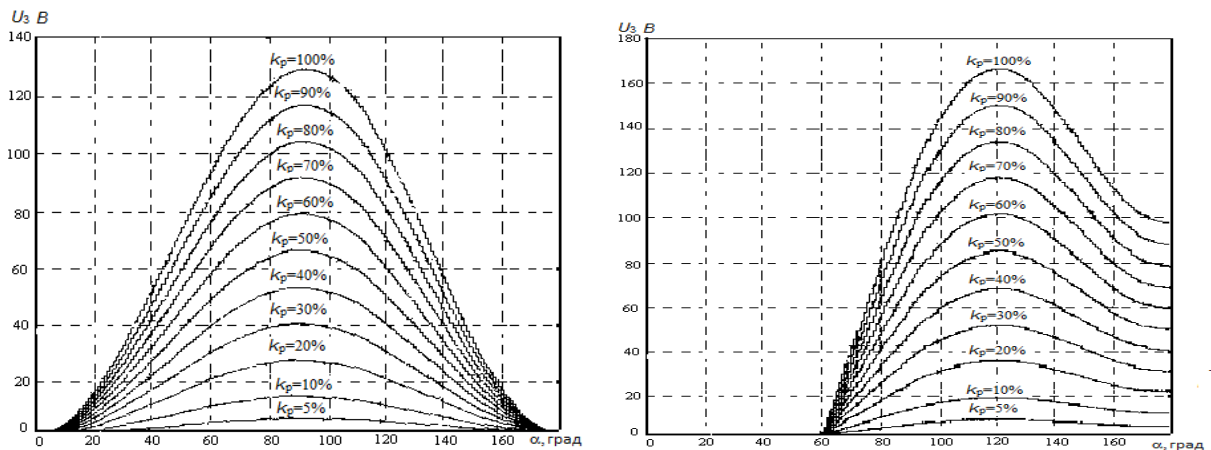


Рис. 4. Изменение амплитуды 3-й гармоники регулируемого напряжения:
а – при активной нагрузке ($\varphi=0$); *б* – активно-индуктивной нагрузке ($\varphi=600$)

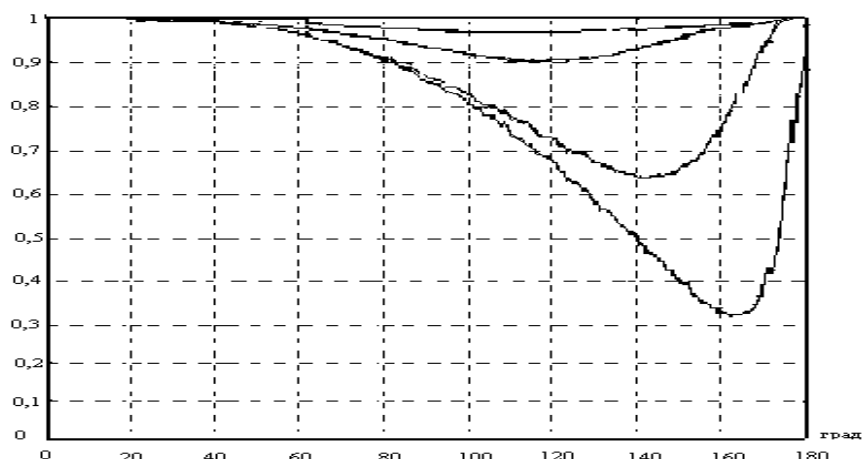


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента мощности ТТРН от величины угла управления и глубины регулирования

Библиографический список

1. **Алтунин, Б.Ю.** Математическое моделирование тиристорных устройств РПН трехфазных трансформаторов / Б.Ю. Алтунин, И.М. Туманов // *Электротехника*. 1996. №6. С. 22–25.
2. **Mohan, N.** *Power Electronic, Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.

УДК 621.317

С.В. ПОПОВ, Е.М. БУРДА

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ СЕТИ

Волжский государственный университет водного транспорта

Приводится обоснование необходимости установки автономных источников электроэнергии для ряда объектов. Приведен алгоритм эффективной работы электростанции, работающей как в автономном режиме, так и параллельно с сетью. Даны объяснения распределения мощности при работе генераторных агрегатов параллельно с сетью.

Ключевые слова: газопоршневой генераторный агрегат, электрическая мощность, система автоматики, система управления, синхронизация.

The article provides the rationale for the installation of Autonomous sources of electricity for a number of objects. The algorithm of efficient operation of the plant, working in the Autonomous mode and in parallel with the network is shown. There are explains of power distribution when generators operate in parallel with the network.

Key words: gas-piston generator set, electric power, automation system, control system, synchronization

В связи с нарастающим темпом застройки больших городов возникает необходимость электрификации новых объектов при дефиците энергоресурса [1]. В

таких условиях электроснабжение выполняется с ограничением потребляемой мощности, что вполне справедливо. Контроль за потреблением электроэнергии осуществляет служба Энергонадзора, которая в случае нарушения может наложить штрафные санкции. Оплата за потребляемую мощность производится по двум тарифам: общему и увеличенному, за мощность, превышающую установленную.

Наряду с многочисленными постройками жилищного фонда, существуют объекты, подключенные к городскому энергоснабжению, к которым может быть подведено газовое обеспечение (в основном котельные). Нередки случаи, когда электропитание потребителей таких объектов, при отключении основного (сетевое) электроснабжения, поступает от установленных газопоршневых генераторных агрегатов.

Из опыта эксплуатации известно, что оплата за израсходованный газ, для определенного диапазона мощности, может быть ниже оплаты за электроэнергию по увеличенному тарифу. Отсюда следует, что в случае превышения потребляемой мощности над отведенной, экономически обосновано генерирование электроэнергии автономной электростанцией, т.е. газогенераторами.

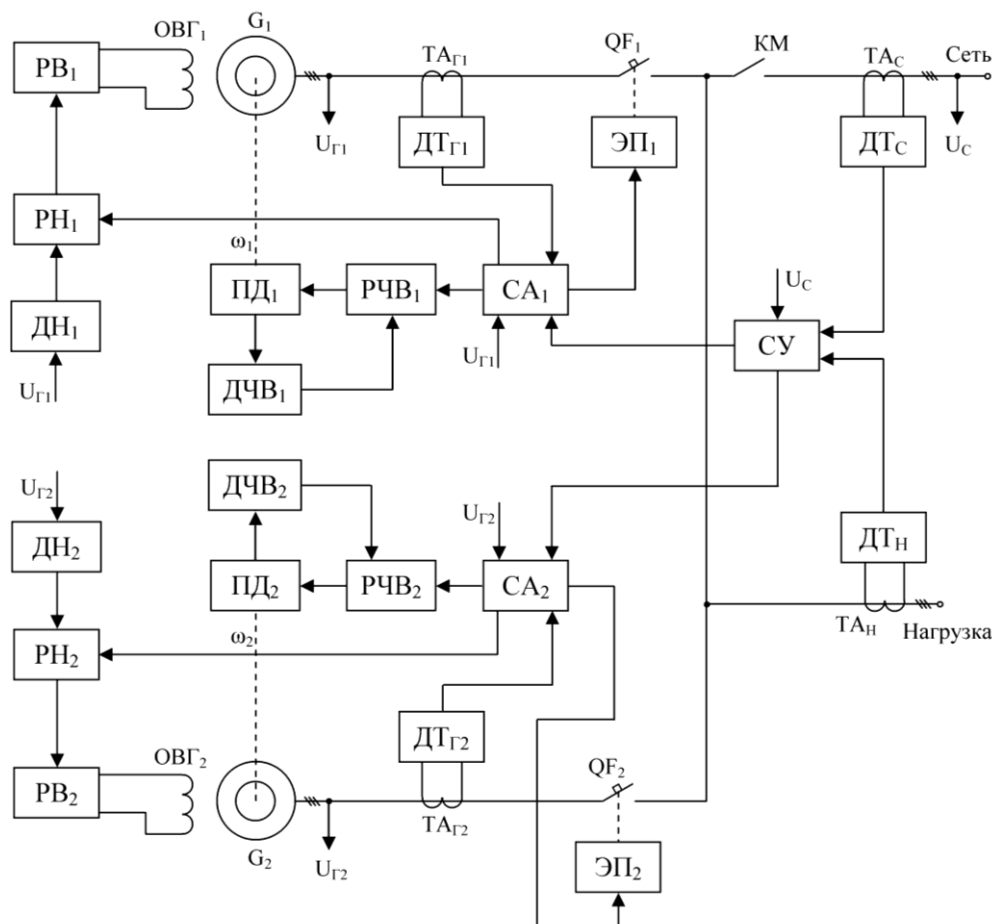


Рис. 1. Функциональная схема системы распределения электроэнергии

Система генерирования и распределения электроэнергии объекта, схема которой показана на рис. 1, состоит из двух газопоршневых генераторных агрегатов G_1 и G_2 и имеет сетевой ввод с ограниченной потребляемой мощностью.

При питании нагрузки от сети без превышения отведенной мощности автономная электростанция находится в «дежурном» режиме, подготовленная для автоматического запуска. Контроль потребляемой мощности выполняет система управления СУ, получающая информацию о токе нагрузки через трансформатор тока T_{A_H} и датчик тока нагрузки DT_H . В случае превышения установленного значения мощности, потребляемой из сети, система управления СУ формирует сигнал для системы автоматики СА1 (СА2) генератора G_1 (G_2) на запуск газогенератора в зависимости от установленного приоритета. Система автоматики СА выполняет алгоритм пуска с использованием каналов регулирования частоты вращения двигателя ω_1 (ω_2) и регулирования напряжения U_{G_1} (U_{G_2}). Управляющий сигнал от системы автоматики СА поступает на регулятор частоты вращения РЧВ, который воздействует на систему подачи топлива приводного двигателя ПД и имеет сигнал обратной связи от индукционного датчика частоты вращения ДЧВ.

Система возбуждения построена по классической схеме и включает в себя датчик напряжения генератора ДН, регулятор напряжения РН и регулятор тока возбуждения РВ. После выхода агрегата на рабочий режим, система автоматики СА запускает алгоритм синхронизации напряжения генератора U_G с напряжением сети U_C , при выполнении которого формируется управляющий сигнал на электропривод ЭП генераторного автомата QF .

Система регулирования потребляемой мощности посредством контроля тока нагрузки будет ограничивать мощность, потребляемую от сети, на требуемом уровне, а дефицит мощности будет поступать в нагрузку от генератора G , работающего параллельно с сетью [2]. Если мощность нагрузки будет превышать суммарную мощность генератора и потребляемую от сети (экономически обоснованную) система управления СУ произведет запуск второго газогенератора. После выполнения синхронизации автоматический выключатель вводит генератор на параллельную работу с сетью.

При снижении нагрузки система управления СУ формирует сигнал на остановку газогенератора (газогенераторов), который с помощью системы автоматики СА выполняет отключение генераторного автомата с последующим алгоритмом расхолаживания и остановки. После остановки двигателя система автоматики СА переводится в дежурный режим, в результате чего агрегат будет подготовлен для следующего пуска.

Следует отметить, что мощность нагрузки периодически изменяется, поэтому автозапуск и остановка генераторных агрегатов выполняются после анализа тока нагрузки, который фактически производит расчет по гистерезисному циклу. Этот метод позволит исключить частые запуски агрегатов в моменты потребления мощности, близкой к уставкам, при превышении которых формируются команды автозапуска.

В случае выхода из строя или после нескольких попыток неудачного пуска приводного двигателя первого агрегата, система управления СУ произведет запуск второго агрегата с последующей синхронизацией генератора и введением его на параллельную работу с сетью.

Библиографический список

1. **Коробко, Г.И.** Алгоритм управления автономной электростанцией при параллельной работе с сетью ограниченной мощности / Г.И. Коробко, С.В. Попов, А.В. Бишлетов // Великие реки – 2011: 13 Международный научно-промышленный форум. Труды конгресса. – Н.Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. С. 262–266.
2. **Коробко, Г.И.** Исследование параллельной работы автономного генераторного агрегата с сетью / Г.И. Коробко [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы НТК /НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 116–120.

УДК 621.314

И.С. ПАНФИЛОВ, А.И. ЧИВЕНКОВ, С.Ю. ПАНФИЛОВ, Н.Н. ВИХОРЕВ

КОНСТРУКЦИИ МОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

ОАО НПП «Полет»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложены конструктивные решения сильноточных обмоток для высокочастотных преобразователей напряжения.

Ключевые слова: трансформаторы, дроссели, трансформаторы тока, ферритовый сердечник.

The constructive solutions for high-current windings of high-voltage converters.

Key words: transformers, chokes, current transformers, ferrite core.

Из-за многообразия схемных (по принципу действия) и технических характеристик преобразователей постоянного напряжения в постоянное (ППН) зачастую невозможно для них использовать унифицированные серийно изготавливаемые электромагнитные компоненты (ЭМК). Оптимальным разрешением этой проблемы является разработка или использование унифицированных конструкций ЭМК (силовых трансформаторов, дросселей и трансформаторов тока).

В импульсных источниках электропитания с высокими частотами преобразования (до 500 кГц и выше) для изготовления силовых трансформаторов и дросселей широко используются магнитомягкие ферриты различных конструкций (рис. 1).

ЭМК, выполненные на кольцевых ферритовых сердечниках (тип К или R по классификации фирмы Epcos), компактны, обладают наименьшей величиной индуктивности рассеивания из-за отсутствия магнитного зазора и не требуют нанесения защитного диэлектрического покрытия (выполняется предприятием-изготовителем) при низкой стоимости самого сердечника. Однако существуют

технические и технологические трудности при изготовлении обмотки (обмоток) и, следовательно, стоимость МЭК в целом оказывается высокой. Кроме того, невозможно при изготовлении сильноточных обмоток достичь высоких значений коэффициента заполнения медью окна сердечника из-за ограничений по допустимому радиусу изгибамоточного провода.

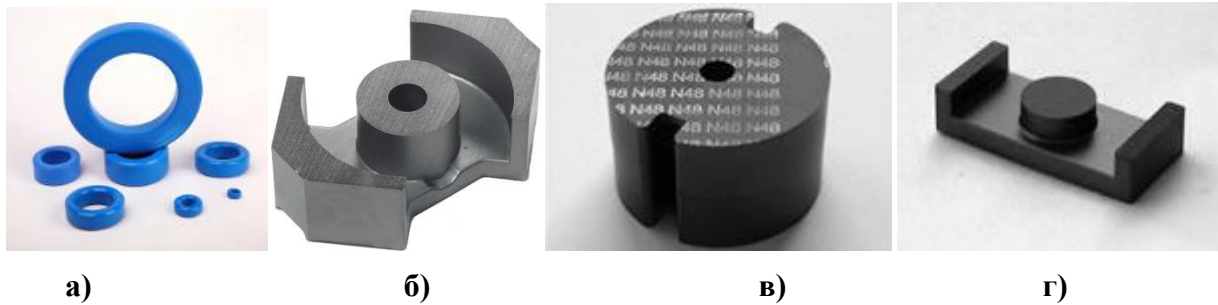


Рис. 1. Конфигурации ферритовых сердечников:
a – тип К; *б* – тип КВ; *в* – тип Б; *г* – тип ER

Значительно меньшие затраты требуются для изготовления обмоток МЭК при использовании разъёмных ферритовых сердечников типов:

- КВ (квадратные ферритовые сердечники, по классификации фирмы Epcos - RM,PQ);
- Б (броневые ферритовые сердечники, по классификации фирмы Epcos - RM, P, P Halves, EP);
- ER (низкопрофильные ферритовые сердечники).

Разъёмные ферритовые сердечники имеют большую номенклатуру, обеспечивают низкую стоимость изготовления обмоток и, следовательно, МЭК в целом. Другим важным преимуществом разъёмных сердечников является относительная простота изготовления сильноточных обмоток трансформаторов и дросселей высокочастотных преобразователей, например сетевых преобразователей с бестрансформаторным входом и низким выходным напряжением (менее 10 В). Зачастую такие обмотки содержат единицы витков и должны выдерживать токи свыше 10 А, то есть представлять собой электрические шины. Двухвитковая обмотка (рис. 1, *a*) может быть изготовлена из листовой меди или фольгированного двухстороннего стеклотекстолита.

При необходимости изготовления обмотки с большим числом витков предлагается воспользоваться шаблоном, представленным на рис. 2, *б*. Пунктирная линия показывает место изгиба электрической шины. Изгибы производят последовательно от любого крайнего витка. Угол α первого и (или) последнего витка выбирают из условия совпадения начала и конца обмоток после сложения неполных витков. Изготавливать заготовку для обмотки возможно либо методом штамповки, либо травлением. В последнем случае для экономии электролита необходимо изготовить шаблон с минимальной площадью травления (только контур обмотки).

Разработка новых конструкций трансформаторов обусловлена необходимостью достижения малых значений индуктивности рассеяния, при этом желательно, чтобы конструкция трансформатора была плоской с высотой не более 20 мм. Наиболее подходящими для решения этой задачи явилось использование в качестве сердечника трансформатора сердечника типа КВ с диаметром центрального стержня 10 мм [1].

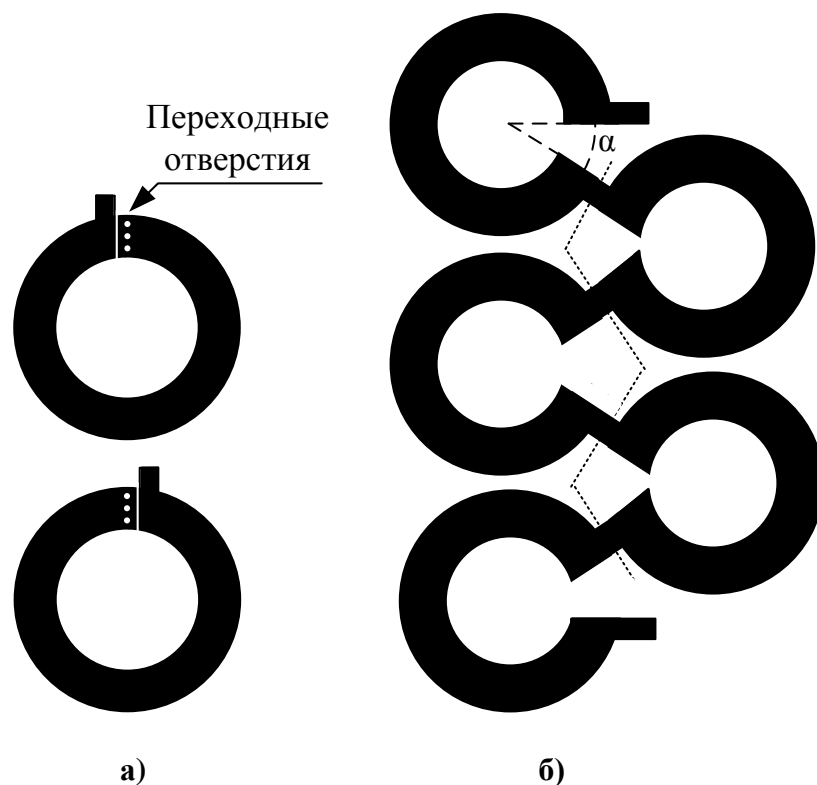


Рис. 2. Конфигурации сильноточных обмоток МЭК для ППН
а – двухвитковая; б – многовитковая

Отличие разработанной конструкции трансформатора (рис. 3, а) от известных заключается в совмещении каркаса обмоток трансформатора со вторичной обмоткой, то есть выполнения его из электропроводящего материала (меди). Каркас-обмотка при этом устанавливается непосредственно на сердечник из феррита, что оказывается возможным из-за относительно низких электрической проводимости феррита и выходного напряжения (напряжения на вторичной обмотке). Особенностью такой конструкции является рассечение каркаса-обмотки для формирования выводов обмотки. Это возможно выполнить либо поперечным разрезом для формирования одного витка, либо спиралевидным для формирования двух или трех витков обмотки. Первичная и другие обмотки трансформатора расположены внутри вторичной обмотки-каркаса [2]. Предложенная конструкция силового трансформатора обеспечивает малые значения теплового сопротивления и позволяет увеличить удельную мощность силовых трансформаторов на рабочей частоте 100 кГц до 11 кВт/дм³.

Для повышения плотности компоновки ППН разработана конструкция

трансформатора тока узла защиты от превышения тока нагрузки заданного значения (рис. 3, б). Предлагаемая конструкция позволяет устанавливать его непосредственно на силовой транзистор в корпусе КТ48 или аналогичных ему.

Это обеспечивает, кроме плотной компоновки ППН, минимальные длины проводников силовой части. Трансформатор тока представляет собой конструкцию, состоящую из катушки (вторичной обмотки) и отдельно выполненной первичной обмотки-витка, один из выводов которой используется в качестве корпуса трансформатора тока.

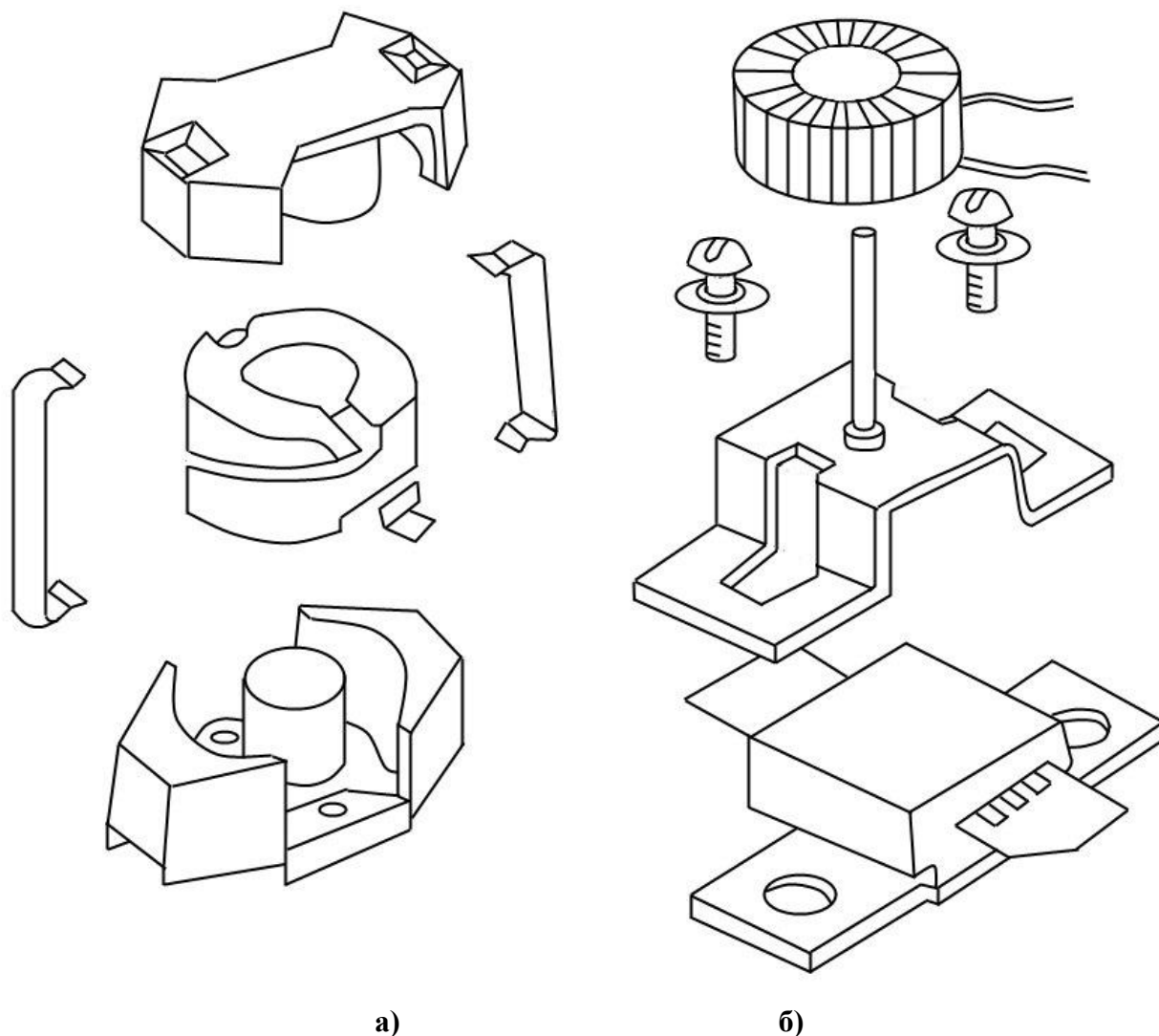


Рис. 3. Конфигурация силового трансформатора и трансформатора тока
а – силовой трансформатор; *б* – трансформатор тока

Библиографический список

1. **Пирогов, А.И.** Магнитные сердечники для устройств автоматики и вычислительной техники / А.И. Пирогов, Ю.М. Шамаев. – М: Энергия, 1973. – 263 с.
2. **Полетаев, И.В.** Высокоэффективный источник постоянного тока / И.В. Полетаев, С.Ю. Панфилов, М.Г. Тyles // Средства связи в авиации: тез. докл. межотрасл. науч. – техн. конф. Горький, окт. 1989. Горький, 1989. С. 6.

УДК 621.314

Н.Н. ВИХОРЕВ, И.С. ПАНФИЛОВ, А.И. ЧИВЕНКОВ, С.Ю. ПАНФИЛОВ

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЗКИ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ
В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ОАО НПП «Полет»

Оконечным звеном автономных систем электропитания является стабилизатор напряжения, работающий на заданную нагрузку. Для сокращения времени моделирования электрогенерирующей установки оконечные каскады (стабилизатор напряжения и нагрузка) заменяются на стабилизатор мощности.

Ключевые слова: топливный элемент, гибридный емкостный накопитель, вольт-амперная характеристика, математические функции.

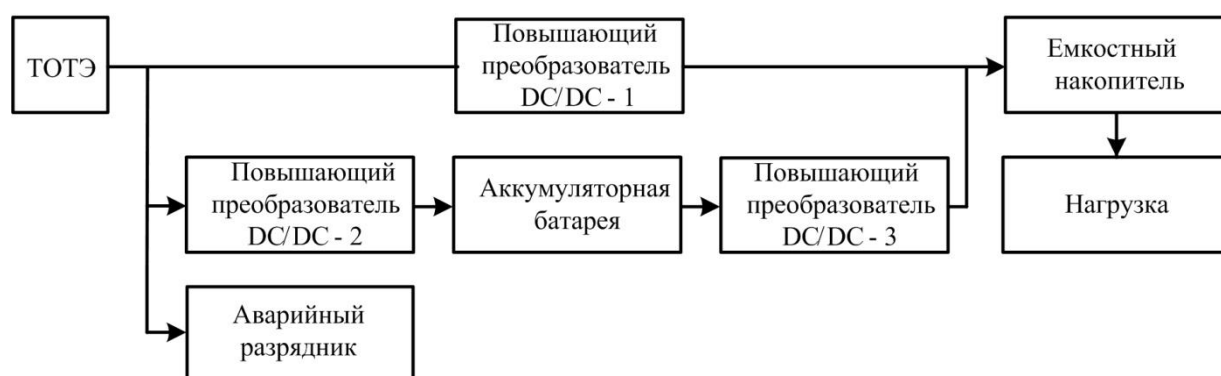
The final link is a stand-alone power systems voltage, working on a given load. In order to reduce the simulation time power generation installation power amplifiers (voltage and load) are replaced by the power regulator.

Key words: fuel cell hybrid capacitive drive voltage characteristic, mathematical functions.

В настоящей работе рассмотрены вопросы моделирования гибридного источника электропитания с твёрдооксидными топливными элементами (ТОТЭ), имеющего выходной типовой преобразователь DC/AC, обеспечивающем на нагрузке трёхфазное напряжение 380 В, частотой 50 Гц при заданной мощности.

Целью исследований является разработка алгоритмов регулирования потоков мощности между ТОТЭ, аккумуляторной батареей и емкостным накопителем. Исключение типового преобразователя DC/AC позволяет значительно сократить время моделирования (рис. 1) [1], но в этом случае требуется элемент моделирования эквивалентный по энергетическим показателям исходным.

Разработана имитационная модель нагрузки, обеспечивающая решение поставленной задачи при изменении напряжения питания.

**Рис. 1. Структурная схема энергосистемы с ТОТЭ**

При использовании стандартного блока R (Series RLC branch) снижение напряжения, приводит к пропорциональному снижению тока нагрузки, а следовательно, уменьшению заданной мощности потребления электроэнергии по линейному закону.

Задание произвольной вольт-амперной характеристики с использованием семейства блоков библиотеки Simulink требует создания подсистемы, реализующей связь двунаправленных сигналов блоков библиотеки SimPowerSystem (аналоги токов и напряжений) с безразмерными однонаправленными сигналами блоков библиотеки Simulink [2].

Модель нагрузки обеспечивает постоянство потребляемой мощности в модели гибридного источника электропитания с ТОТЭ и представлена блоком Load/Нагрузка (Simulink/CommonlyUsedBlocks/SubSystem) (рис. 2) и его составной частью – блоком SubSystem (рис. 3).

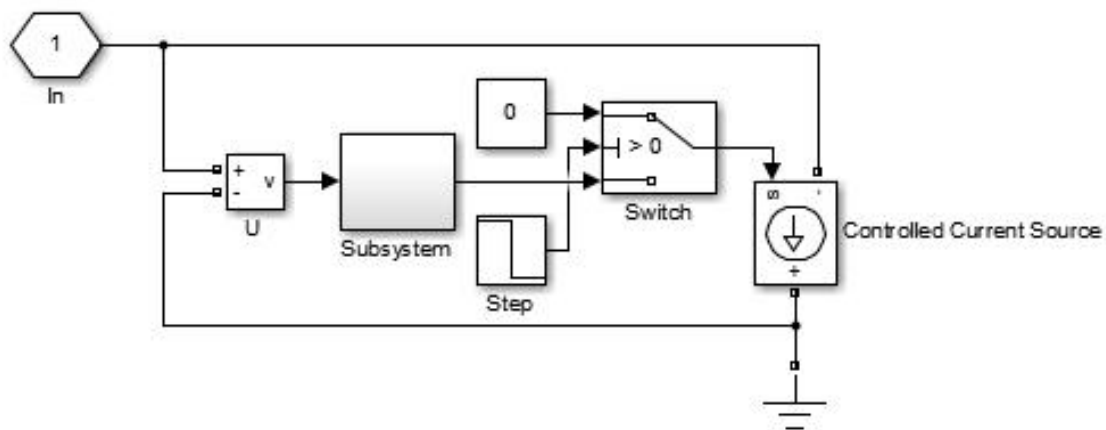


Рис. 2. Внутреннее устройство блока Load

Блок Load включает в себя вольтметр U , показания которого являются входными данными для блока Subsystem, и управляемый источник тока (Controlled Current Source). Источник тока обеспечивает протекание значения тока в соответствии с управляющим сигналом, формируемым блоком Subsystem (рис. 3).

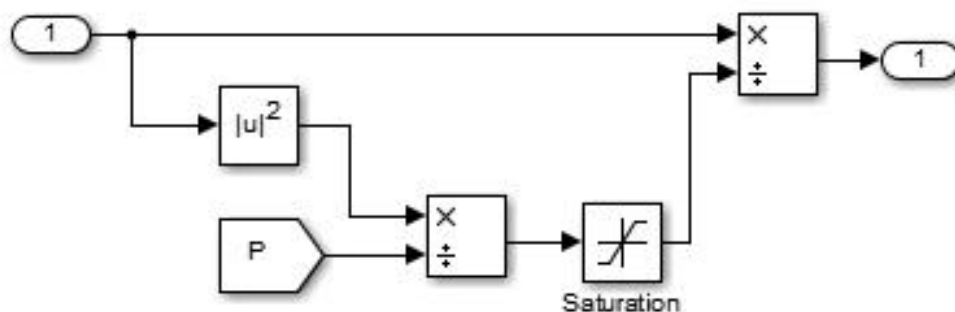


Рис. 3. Внутреннее устройство блока Subsystem

В модели реализована возможность задания нулевого тока на определенном временном интервале, что соответствует отключенной нагрузке. Это обес-

печивается блоками Step, Switch и Constant. В дальнейшем ток нагрузки задается выходными сигналами блока Subsystem.

Блок Subsystem выполнен на базе математических блоков библиотеки Simulink/Math Operations, с применением блоков пересылки данных (In, Out) из библиотеки Simulink/Signal Routing.

Блок реализует следующие функции:

$$I = U / R, \quad (1)$$

$$R = U^2 / P. \quad (2)$$

Блок Saturation необходим для устранения неопределенности при делении на ноль в начальный момент моделирования.

Маска параметров блока Saturation приведена на рис. 4.

В ней последовательно вводятся:

- предельное значение сигнала (inf - бесконечность);
- минимальное значение сигнала (безразмерная - 1).

Применение блока переключения сигнала управления источника тока обусловлено тем, что при задании нулевого значения мощности возникает математическая ошибка (деление на ноль). Существует вариант построения модели с применением дополнительного блока Saturation в цепь пересылки сигнала P . Однако следует учитывать, что при этом мощность нагрузки будет отличной от нуля, что может привести к искажению данных при исследовании энергосистемы с малой мощностью потребления.

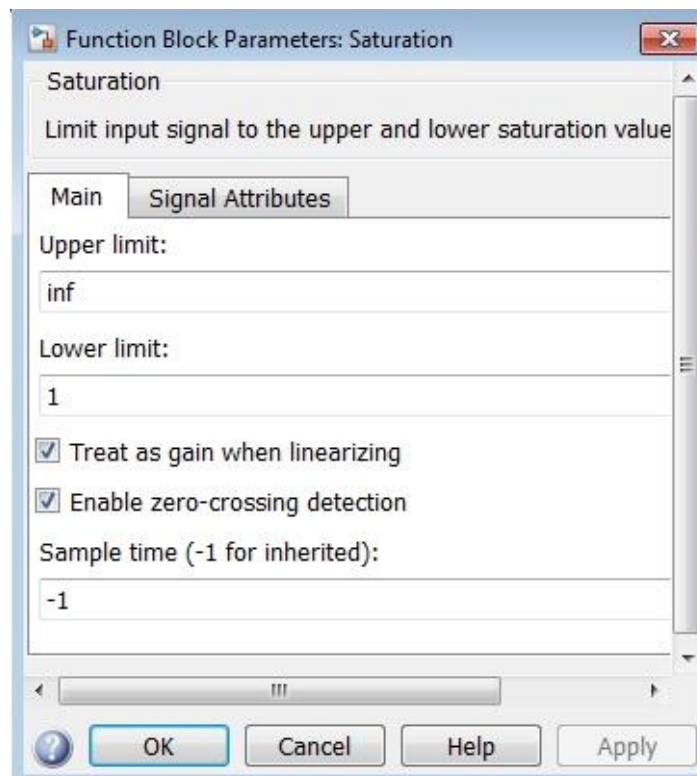


Рис. 4. Маска параметров блока Saturation

Подключение предлагаемого блока Load напрямую к идеальному источнику питания требует дополнения в виде резистивного элемента, подключенного параллельно к управляемому источнику тока с сопротивлением более 1 кОм.

Пример моделирования гибридного источника электропитания с ТОТЭ приведен на рис. 5. Параметры модели:

- время моделирования t - 15 с;

- мощность нагрузки - 1,5 кВт;

- номинальное напряжение питания стабилизированного преобразователя $U_{\text{сном DC/AC}}$ - 400 В.

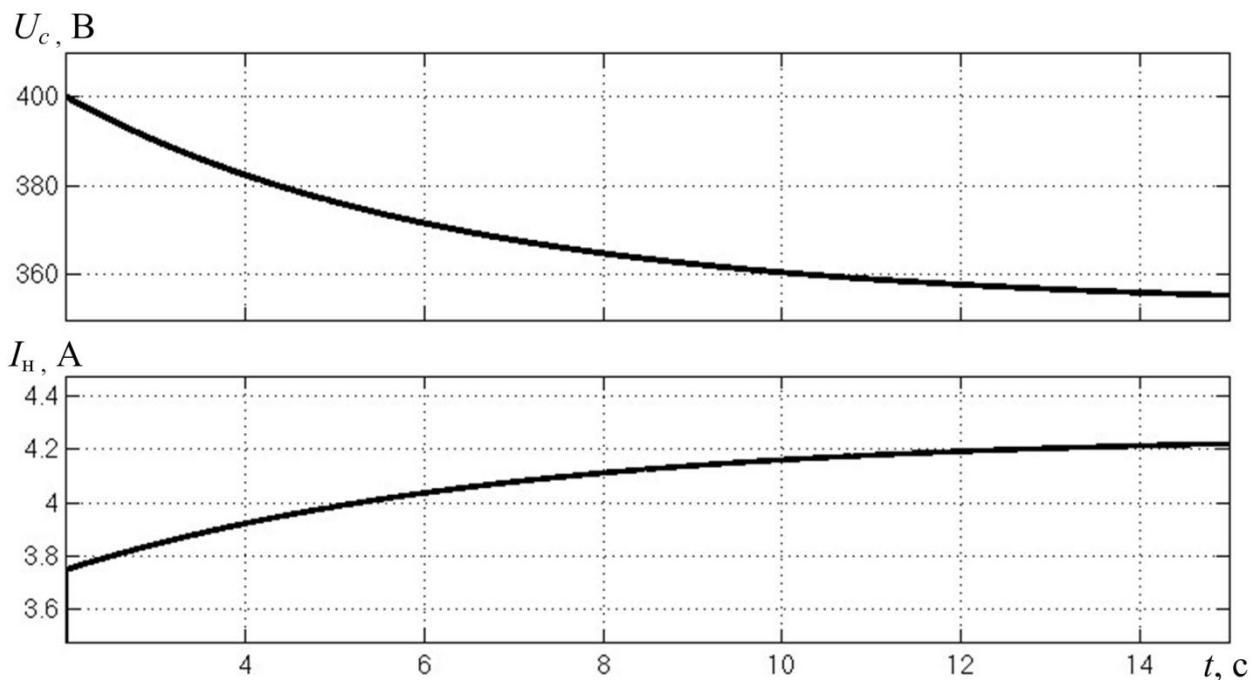


Рис. 5. Результаты моделирования

При снижении напряжения питания стабилизированного преобразователя DC/AC увеличивается ток потребления по закону обеспечения постоянства мощности нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0073 о предоставлении субсидии от 05.06.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0073).

Библиографический список

1. **Вихорев, Н.Н.** Система автономного электропитания с топливным элементом и буферным накопителем / Н.Н. Вихорев [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции / НГТУ. – Н.Новгород, 2014.
2. **Алтуниин, Б.Ю.** Электротехнические расчеты в системе компьютерной математики MATLAB SIMULINK: учеб. пособие / Б.Ю. Алтуниин [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2005. С. 31–33.

УДК621.319.53

Н.Г. ПАНКОВА, К.С. СТЕПАНОВ, Д.Ю. ТИТОВ

**ПОРТАТИВНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ АМПЛИТУДНО-
МОДУЛИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается схема и работа амплитудно-модулированного источника тока для портативных (носимых) приборов пролонгированного электрофореза лекарственных веществ.

Ключевые слова: источник тока, импульсный, портативный, электрофорез, амплитудная модуляция.

The article considers the design and operation of the amplitude-modulated current source for portable devices prolonged electrophoresis of medicinal substances.

Key words: source current, pulse, portable, electrophoresis, amplitude modulation.

Лечение при помощи физических воздействий (электрический ток, магнитное поле, лазерное излучение и т. п.) наиболее эффективно, если оно проводится с учётом индивидуальных особенностей пациента, в частности роста [1, 2].

Ещё Арндт–Шульц в своё время обнаружил закономерность, что часто поле меньшей интенсивности оказывает на живой организм более сильное влияние. В 1883 г. профессор-психиатр Грейфсвальдского университета Рудольф Арндт, на основании отвлеченных соображений, распространил положения закона Пфлюгера о влиянии на мышцу гальванического тока (восходящего), придав впоследствии этим положениям значение основного биологического закона, согласно которому слабые раздражения пробуждают деятельность живых элементов, средние - ее усиливают, сильные - тормозят, а очень сильные - парализуют.

Согласно модели А.Г. Телегиной, в росте человека, как и в размахе его рук, укладывается одна длина волны излучения, какое вырабатывается сердцем этого человека [3]. Как пишет автор: «сердце – поляризационный генератор, контурами которого служат поочередно главные артерия и вена, являющиеся четвертьволновыми отрезками диэлектрического волновода (линии с распределенными параметрами), по которым распространяется электромагнитная энергия как внутри, так и за пределами сосудов с уменьшением мощности в радиальном направлении. Высокое значение диэлектрической проницаемости крови, равное 81, вызывает диэлектрические потери, что приводит к нагреванию

тканей». Поэтому для повышения эффективности физиотерапевтического лечения целесообразно задавать частоту импульсов воздействия кратной основной частоте пациента.

Как показано в работе Н.А. Гаврикова, И.И. Дижениной, К.С. Степанова [4], пролонгированная терапия (24 - 48 - 72 ч) малыми количествами энергии (200 мкА, при плотности тока 6-8 мкА/см²) при меньших дозах лекарственных веществ является эффективной. Весьма эффективным является и применение импульсного электрофореза. Для этого должны использоваться малогабаритные (носимые) источники энергии, питающиеся от портативных батарей или аккумуляторов с напряжением 4-6 В.

Для носимых приборов импульсного электрофореза лекарственных веществ требуется источник импульсного тока, который потреблял бы ток от источника питания (аккумулятора) только в момент действия импульса. Такой источник можно выполнить, используя управляемый преобразователь тока. Для получения терапевтического среднего значения тока в 4 мА и сопротивлении нагрузки от 1 до 20 кОм требуется источник напряжения 4 до 80 В. Учитывая, что скважность импульсов равна 50%, то напряжение источника питания в импульсе должно быть в два раза больше:

$$U_{\text{и}} = 2U_{\text{ср}} + (U_{\text{кэ}} + U_{\text{э}})_{\text{вых тран}} = 2 \cdot 80 + (4 + 4) = 168 \text{ В.}$$

Функциональная схема такого источника приведена на рис. 1.

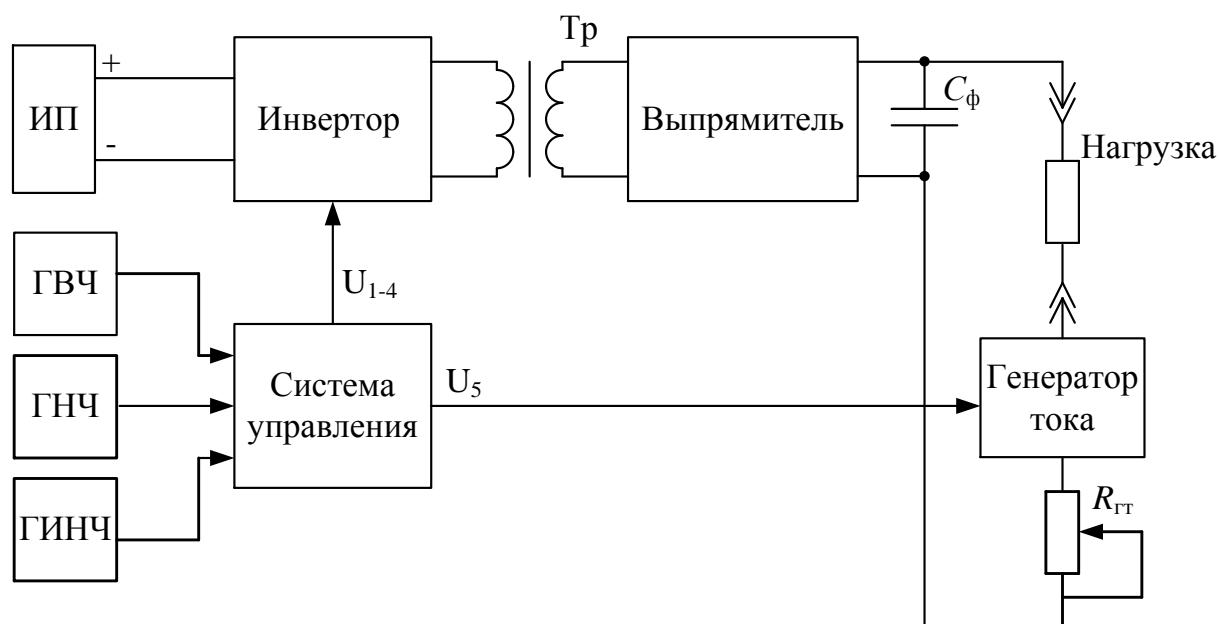


Рис. 1. Функциональная схема источника питания

На схеме обозначено: ИП – источник питания (аккумулятор); ГВЧ – генератор высокой частоты; ГНЧ – генератор низкой частоты; ГИНЧ – генератор инфранизкой частоты, Тр – трансформатор.

Схема работает следующим образом. С низковольтного источника питания (ИП) напряжение подаётся на инвертор, собранный на транзисторах VT1-VT4 (рис. 2). Переменное напряжение с выхода инвертора поступает на повышающий трансформатор Тр. Сигналы управления ключами VT1-VT4 формируются системой управления таким образом, чтобы инвертор работал только в момент импульса от ГНЧ. Импульсы от ГНЧ, модулированные по трапецеидальному закону, поступают также на генератор тока, собранный на транзисторе VT5 по схеме с общим коллектором.

Следует заметить, что транзистор VT5 должен выдерживать максимальное импульсное напряжение преобразователя в выключенном состоянии. Выпрямитель и ёмкость фильтра C_f предназначены для того, чтобы убрать высокочастотную составляющую из импульсов низкой частоты.

Для проверки работоспособности схемы была собрана модель (рис. 2).

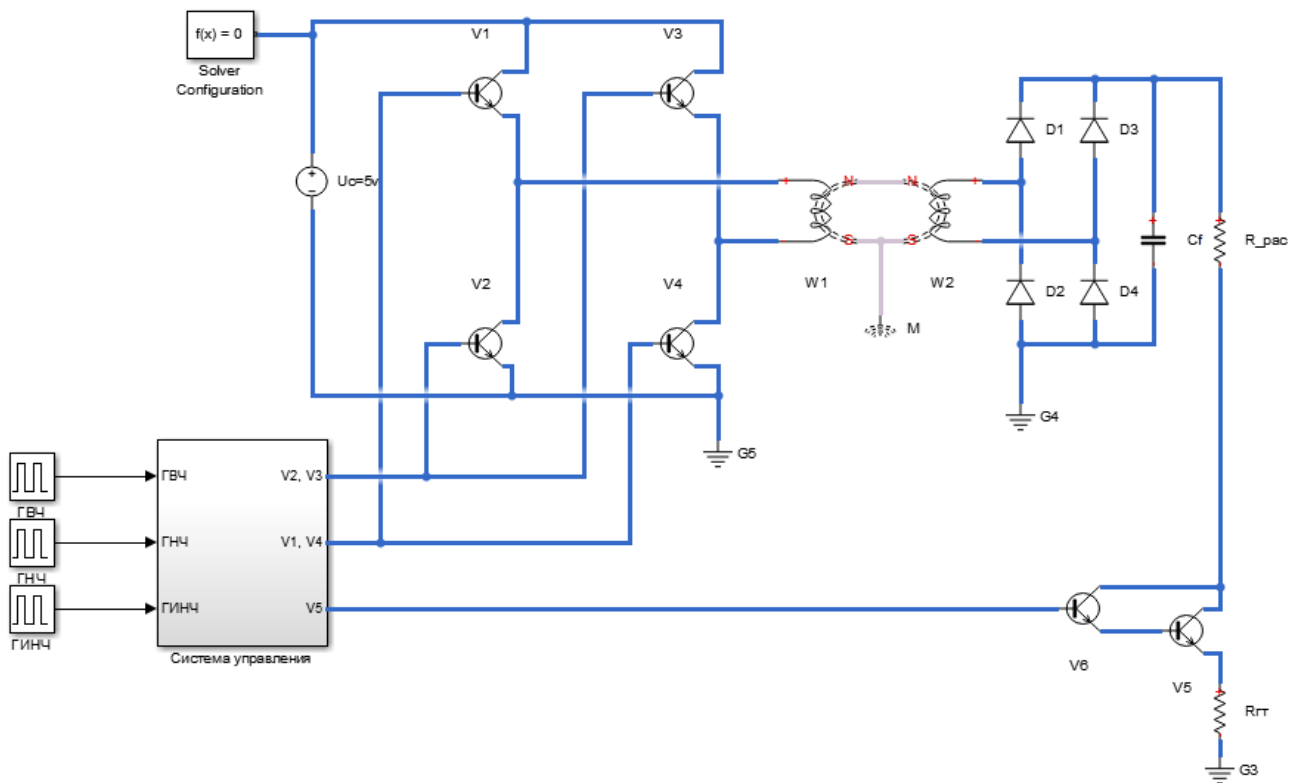


Рис. 2. Модель источника питания

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов с выхода ГВЧ и модулированные инфранизкочастотные импульсы.

На рис. 4, а показана осциллограмма напряжения на выходе инвертора за один период работы, а на рис. 4, б – развертка импульсов.

На рис. 5 и рис. 6 представлены осциллограммы напряжения на нагрузке и тока через нагрузку при различных значениях $R_{гт}$. На рис. 7 и рис. 8 показаны напряжение на нагрузке и ток через нагрузку при различной величине ее сопротивлений.

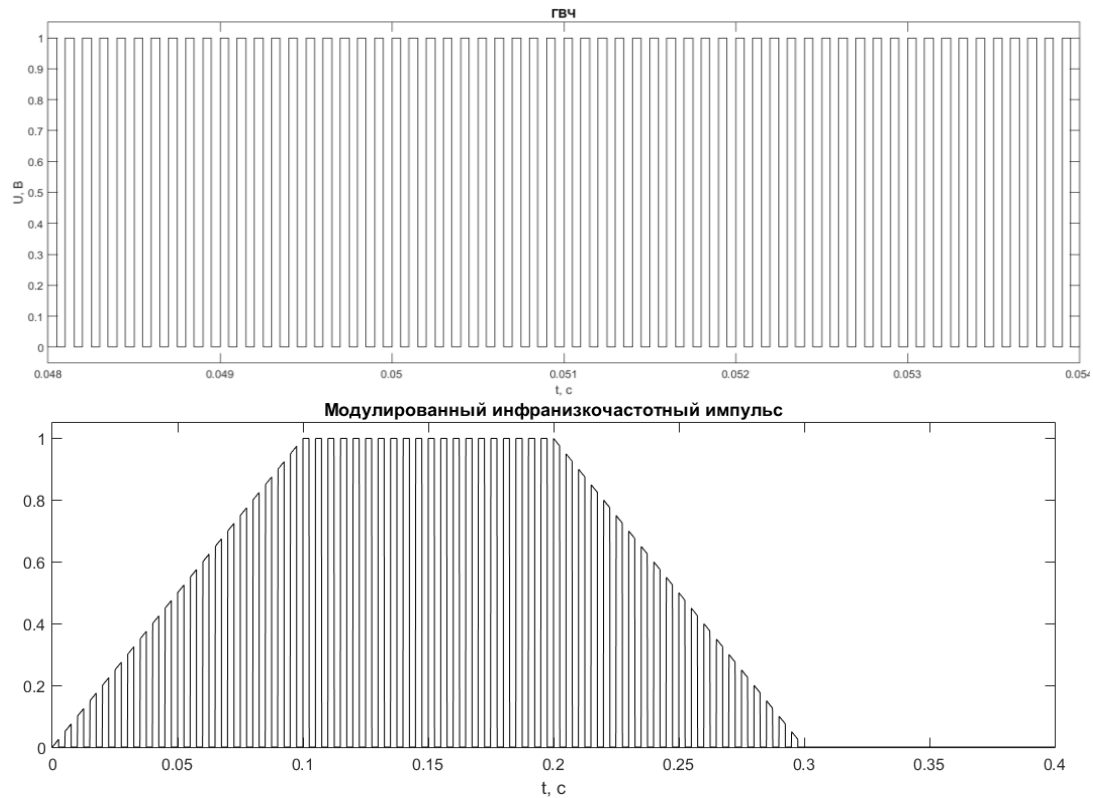
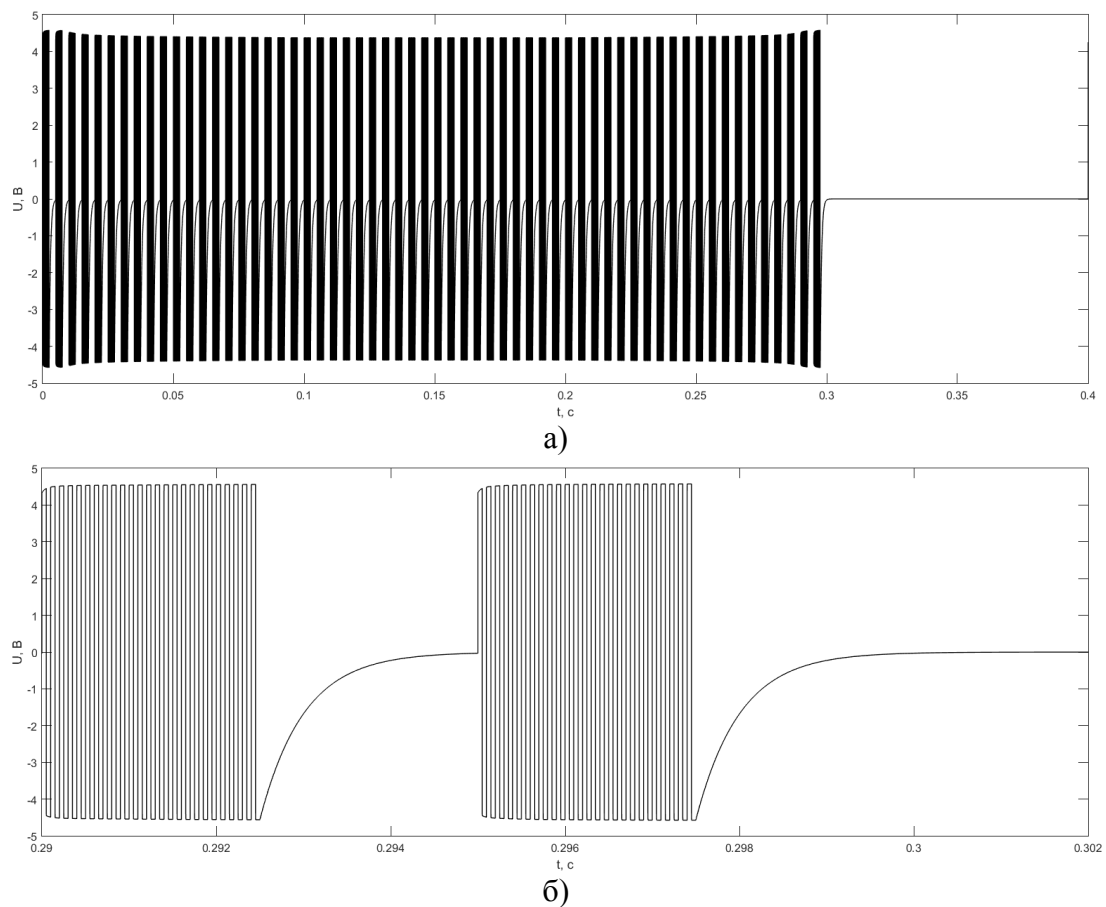


Рис. 3. Развертка высокочастотных и модулированных инфранизкочастотных импульсов



**Рис. 4. Напряжение на выходе инвертора:
а – 1-й период работы устройства; б – развертка импульсов**

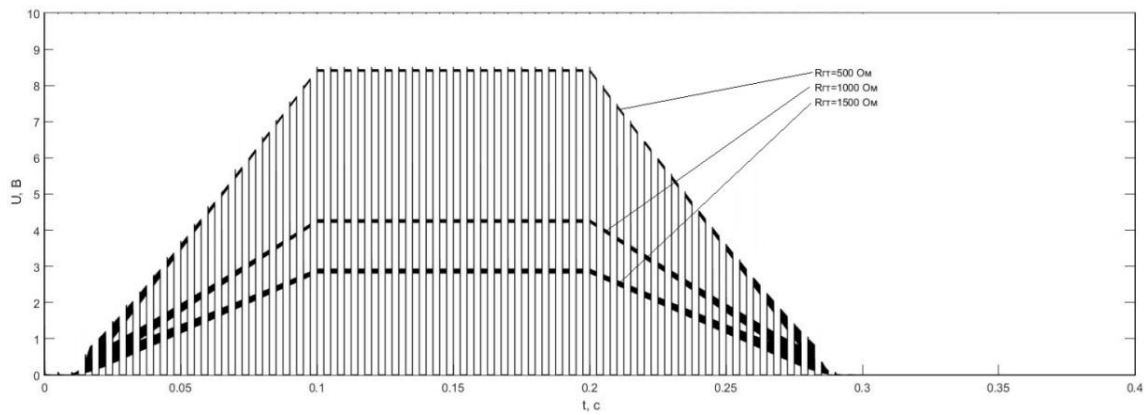


Рис. 5. Напряжение на нагрузке при различных значениях $R_{ГТ}$ (1 - 500 Ом, 2 - 1000 Ом, 3 - 1500 Ом) при $R_{нагрузки} = 1 кОм$

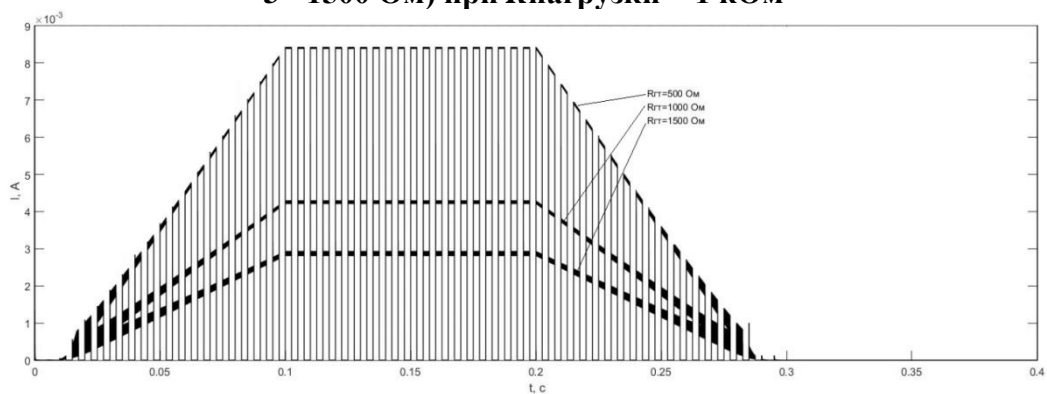


Рис. 6. Ток нагрузки при различных значениях $R_{ГТ}$ (1 - 500 Ом, 2 - 1000 Ом, 3 - 1500 Ом) при $R_{нагрузки} = 1 кОм$

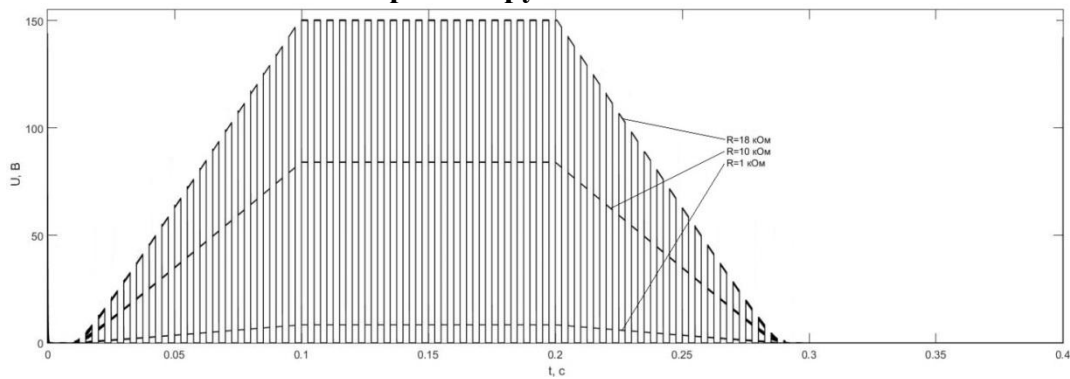


Рис. 7. Напряжение на нагрузке при различной величине ее сопротивления (1 – 1 кОм, 2 – 10 кОм, 3 – 18 кОм) и постоянном сопротивлении $R_{ГТ} = 500 Ом$

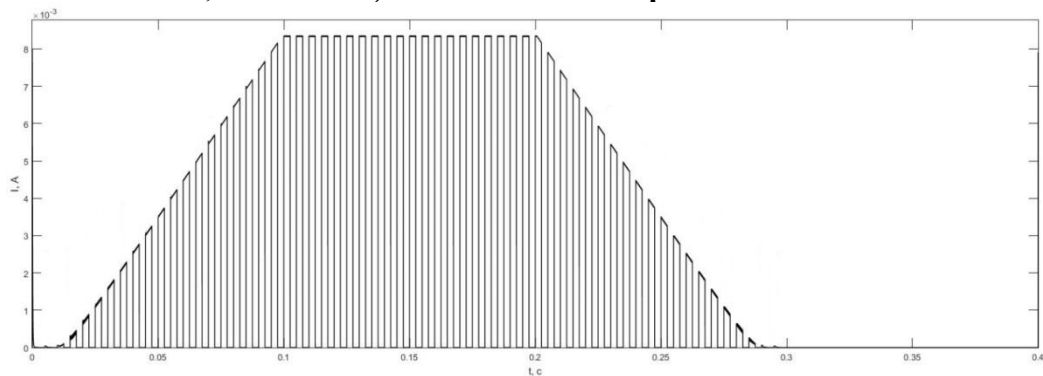


Рис. 8. Ток через нагрузку при различной величине ее сопротивления (1 – 1 кОм, 2 – 10 кОм, 3 – 18 кОм) и постоянном сопротивлении $R_{ГТ} = 500 Ом$

Таким образом, предложенная модель реализует работоспособность схемы, т.е. постоянство среднего значения тока через нагрузку при различном ее сопротивлении.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10026).

Библиографический список

1. **Алексеева, Н.В.** Использование методики индивидуального подбора частот при лечении гастродуоденальных язв низкоинтенсивным лазерным излучением / Н.В. Алексеева [и др.] // Лазеры в медицине: материалы НТК. Вильнюс. 1995. С. 29–34.
2. **Степанов, К.С.** К вопросу о выборе оптимального частотного режима электромагнитных воздействий на организм человека / К.С. Степанов, Н.В. Алексеева, И.П. Основина // Лазеры в медицине: материалы НТК. Вильнюс. 1995. С. 89–93.
3. Пат. 2193904 Рос. Федерация: МПК 7 А 61 N 5 / 02. Способ физиотерапевтического воздействия: / А.Г. Телегина; – №97111546/14; заявл. 02.07.1997; опубл. 10.12.2002.
4. **Гавриков, Н.А.** Аппараты и методы пролонгированного действия – новое направление в физиотерапии / Н.А. Гавриков, И.И. Диженина, К.С. Степанов // Краткие тезисы к научно-практической конференции, посвящённой 60-летию Ленинского декрета о курортах СССР: материалы НТК. Сочи. 1980. С. 20–22.

УДК 621.3

Е.Н. СОСНИНА, А.А. КРАЛИН, А.А. АСАБИН

МОДЕЛЬ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы моделирования вольтодобавочного трансформатора, входящего в состав фазоповоротного устройства. Модель трансформатора выполнена в пакете Simulink и состоит из схем замещения магнитной и электрической цепей. Модель позволяет исследовать важнейшие энергетические показатели трансформатора в динамических и статических режимах работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0098 о предоставлении субсидии от 26.08.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0098).

Ключевые слова: вольтодобавочный трансформатор, моделирование, схемы замещения, Simulink.

The article deals with modeling of the booster transformer that is part of the phase-shifting devices. The transformer model made in Simulink and consists of magnetic and electric circuits. The model allows us to research the most important energy properties of the booster transformer in the dynamic and static modes. This work was financially supported by the Ministry of Education and Science (№14.577.21.0098 agreement for a grant from the 26.08.2014, the unique identifier of the project RFMEFI57714X0098).

Key words: Booster transformer, modeling, equivalent circuits, Simulink.

Автоматизированный узел регулирования потоков мощности в распределительной электрической сети среднего напряжения (6-10-20 кВ) может быть выполнен на основе транзисторных или тиристорных фазоповоротных устройств (ФПУ). В состав тиристорного ФПУ, как правило, входят два трансформатора: шунтовой (параллельный) и серийный (последовательный).

Изучение электромагнитных процессов в данных трансформаторах целесообразно проводить с помощью имитационного моделирования.

В ходе выполнения прикладных научных исследований была разработана нелинейная модель двухобмоточного однофазного вольтодобавочного трансформатора с плоской магнитной системой в программе Matlab Simulink.

Основные допущения при разработке нелинейной математической модели трансформатора общеприняты [1]:

- магнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора представлена схемой замещения с нелинейными сосредоточенными магнитными сопротивлениями, определяемыми аппроксимацией основной кривой намагничивания;
- полные потокосцепления фаз представлены как суммы потокосцеплений от основного магнитного потока и потокосцеплений рассеяния обмоток фазы;
- потокосцепления рассеяния обмоток трансформатора, являются линейными функциями от токов;
- не учитываются емкостные связи между элементами обмоток, между обмотками и заземленными частями магнитопровода, а также токи утечки изоляции.

Схема замещения магнитной цепи (рис. 1), состоит из следующих элементов:

- $w_1 i_1 \div w_2 i_2$, – намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток;
- Φ_1 основной магнитный поток;
- $H_c l_c$, $H_{я} l_{я}$ – падения магнитных напряжений на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков [2].

Уравнения магнитной цепи вольтодобавочного трансформатора, составленные по схеме замещения рис. 1 имеют следующий вид:

$$w_1 i_1 - w_2 i_2 + 2H_c l_c + 2H_{я} l_{я} = 0. \quad (1)$$

Запишем уравнения электрической системы трансформатора.

Первичная обмотка:

$$u_1 = L_{s1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_1 R_1. \quad (2)$$

Вторичная обмотка:

$$u_2 = L_{s2} \frac{di_2}{dt} + w_c \frac{d\Phi}{dt} + i_2 R_2, \quad (3)$$

где u_1, u_2 – напряжения первичной и вторичной обмотки трансформатора; L_{S1}, L_{S2} – собственные индуктивности рассеяния обмоток; R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток; w_1, w_2 – числа витков обмоток.

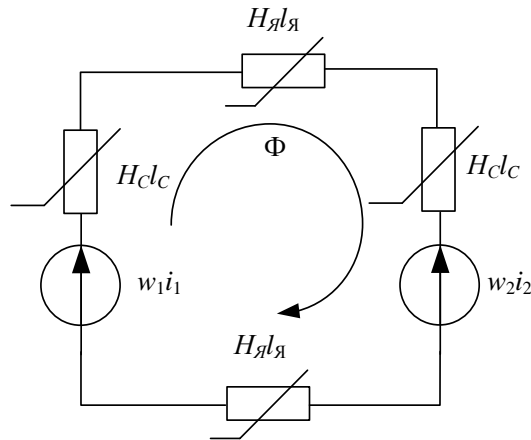


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи однофазного двухобмоточного вольтодобавочного трансформатора

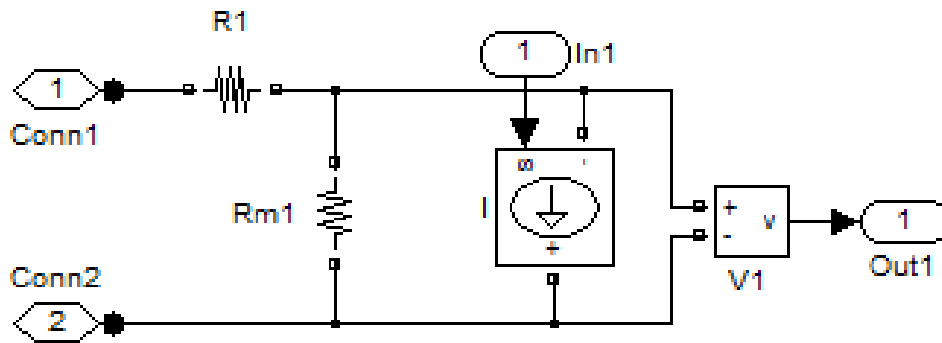


Рис. 2. Состав подсистем Primary winding и Secondary winding

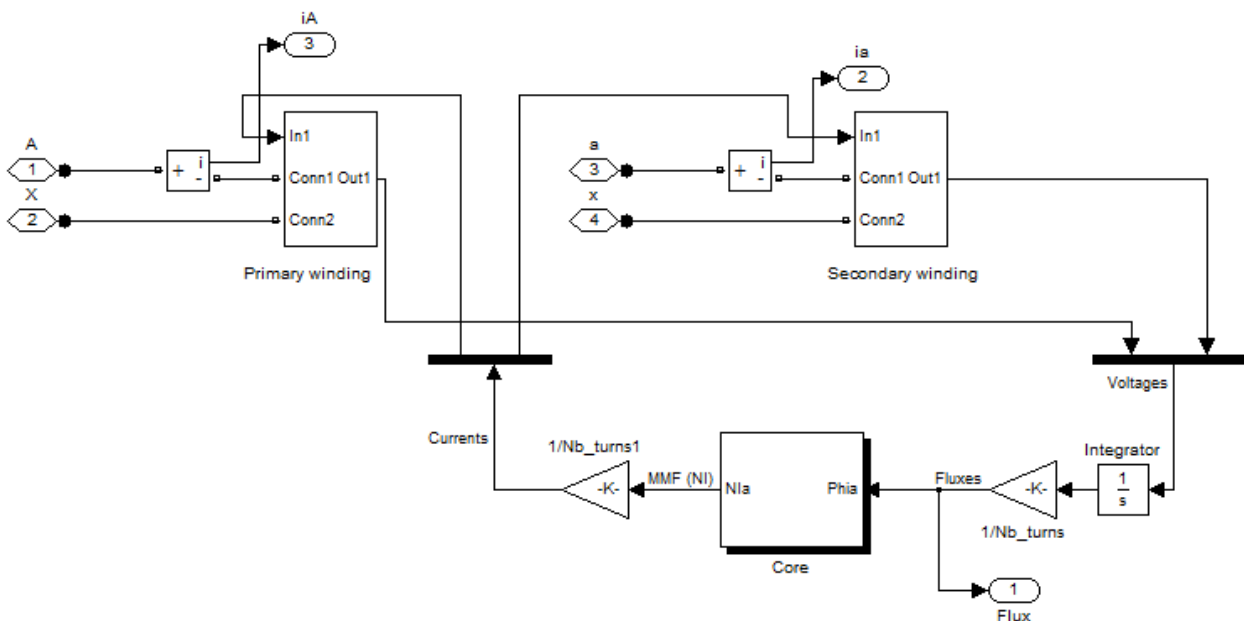


Рис. 3. Определение потоков

Модель вольтодобавочного трансформатора, составленная по уравнениям (1)–(3) является сочетанием двух моделей, отвечающих за электрические и магнитные процессы трансформатора.

Алгоритм работы модели трансформатора следующий. Напряжение, измеренное в блоках Primary winding и Secondary winding трансформатора (рис. 2) в подсистеме электрических связей трансформатора, поступает на блок integrator, который совместно с блоком Gain в соответствии с представленным далее уравнением вычисляет поток отдельных обмоток (рис. 3):

$$\Phi = \int \frac{u_n}{w_n} = -\Phi_m \cos \omega t + C, \quad (4)$$

где u_n – напряжение соответствующей обмотки; w_n – число витков соответствующей обмотки; Φ_m – амплитуда магнитного потока; C – постоянная интегрирования.

Начальными условиями для блока integrator являются значения потока в момент времени $t=0$. Задание начальных условий интегрирования в модели позволяет при необходимости исключить аperiodическую составляющую переходного процесса и сразу перейти к установившемуся режиму работы, что дает значительное сокращение времени моделирования.

Вычисление начального потока выполняется с помощью команд инициализации, написанных на языке Matlab. Данные команды записаны во вкладке Initialization маскированной подсистемы модели трансформатора Booster transformer.

Блок Gain выполняет деление интеграла от напряжения на число витков соответствующей обмотки. В результате данного действия определяется значение потока.

Далее значения потоков поступают на вход подсистемы, моделирующей магнитную цепь трансформатора (рис. 4).

Значения потоков стержней и ярм трансформатора поступают на вход подсистем представляющих нелинейные сопротивления, учитывающие геометрию и магнитные свойства магнитопровода трансформатора.

На рис. 4 это блоки 2L и 2Y. Состав данных блоков приведен на рис. 5. Здесь по величине потока с помощью блока Gain рассчитывается индукция на соответствующем участке:

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (5)$$

где S – сечение стержня или ярма. Далее с помощью блока Look-Up Table вычисляется напряженность магнитного поля. Данный блок реализует кусочно-линейную интерполяцию заданной табличной функции основной кривой намагничивания стали. Реализуя произведение напряженности магнитного поля H на соответствующую длину участка магнитопровода l , с помощью блока Gain определяются падения магнитного напряжения соответствующих участков магнитопровода (стержня или ярма).

Далее значения МДС обмоток поступают в подсистему верхнего уровня, в которой моделируются электрические связи обмоток.

Значения токов обмоток вычисляются через МДС с помощью блока Gain (рис. 3) по выражению

$$i = \frac{i_w}{w}. \quad (6)$$

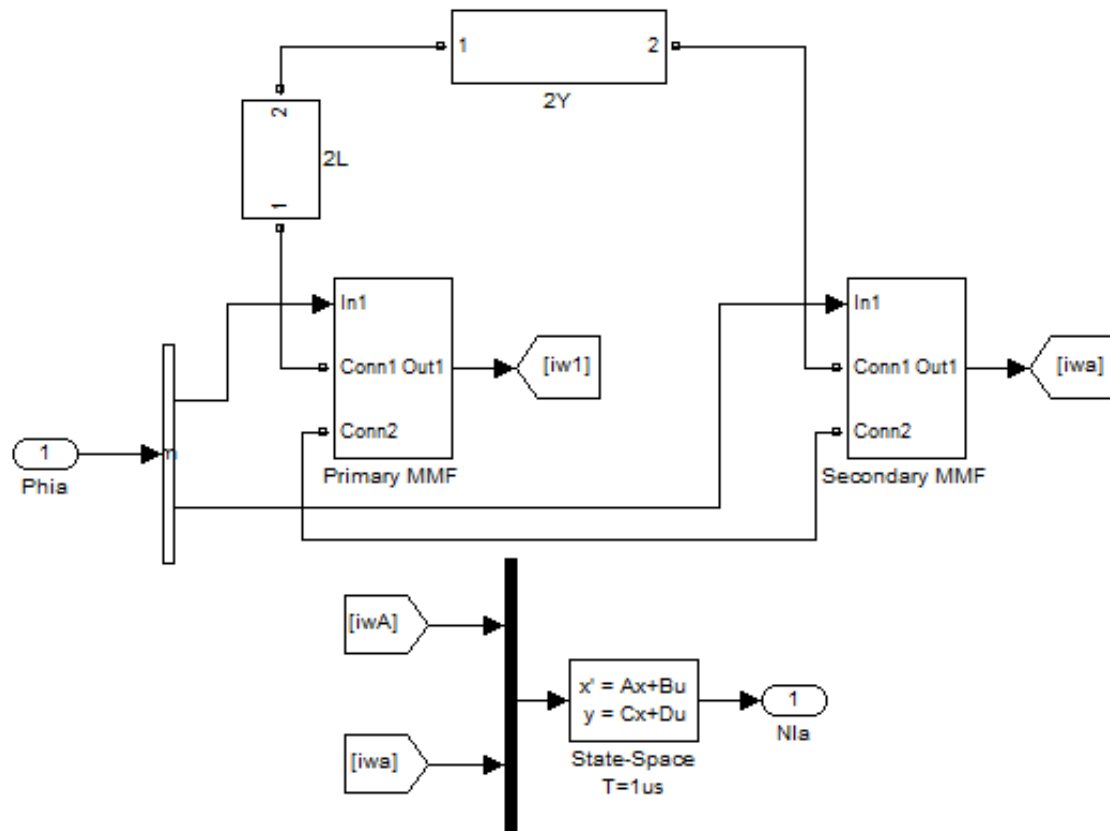


Рис. 4. Модель магнитной системы вольтодобавочного трансформатора

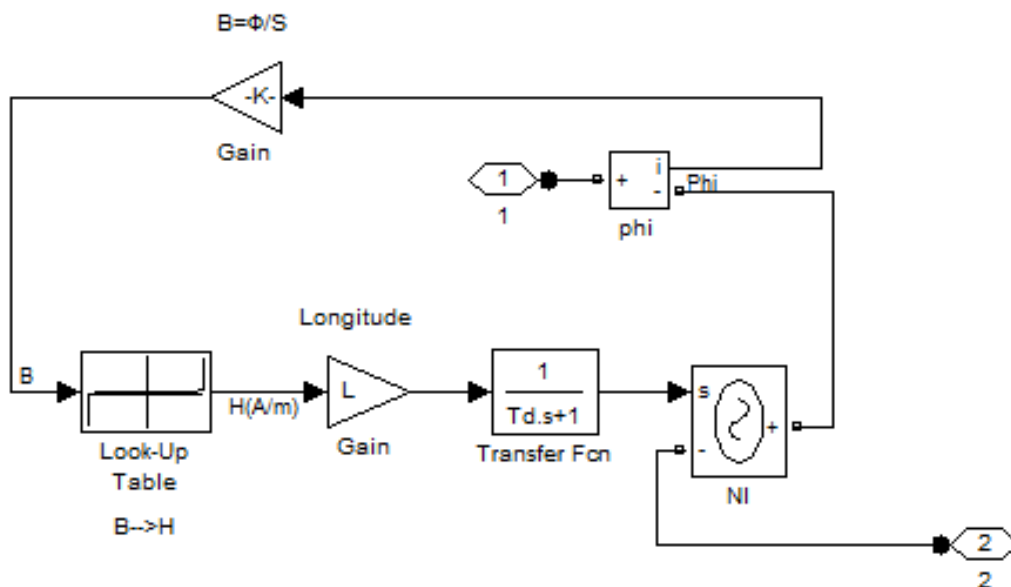


Рис. 5. Нелинейное магнитное сопротивление

Вычисленный ток поступает на входы подсистем Primary winding и Secondary winding (рис. 2) и далее на блок управляемого источника тока. Как видно, кроме блока управляемого источника тока, подсистемы содержат в своем

составе последовательное сопротивление $R1$, равное активному сопротивлению первичной обмотки трансформатора, параллельное сопротивление $Rm1$, учитывающее магнитные потери в сердечнике трансформатора и измеритель напряжения $V1$. Напряжение, измеренное с помощью $V1$, поступает на блок integrator, и далее процесс вычисления повторяется.

Разработанная модель вольтодобавочного трансформатора рассчитывает переходные значения электромагнитных величин, таких как ток, напряжение, магнитная индукция, магнитный поток трансформатора в различных режимах работы фазоповоротного устройства.

Библиографический список

1. Алтуниин, Б.Ю. Математическое моделирование тиристорных устройств РПН трехфазных трансформаторов / Б.Ю. Алтуниин, И.М. Туманов // Электротехника. 1996. №6. С. 22–25.
2. Алтуниин, Б.Ю. Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink / Б.Ю. Алтуниин, А.А. Кралин, В.В. Гуляев // Вестник волжской государственной академии водного транспорта. 2012. № 32. С. 195–198.

УДК 621.311.1

Р.Д. МНЕВ, П.В. СОКУР

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ НА БАЗЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО КОМПЕНСАТОРА

ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Для поддержания нормальной работы энергосистемы в ряде случаев требуется наличие быстродействующего регулятора активной мощности, т.е. накопителя энергии. Кроме того, в настоящий момент актуальна проблема нормализации уровней напряжения в системообразующих сетях. Для повышения качества электроэнергии и надежности электроснабжения предлагается маховичный накопитель энергии на базе асинхронизированной машины для компенсации активной и реактивной мощности.

Ключевые слова: асинхронизированная машина, компенсатор реактивной мощности, надёжность электроснабжения, устойчивость энергосистем, маховик, накопитель энергии.

For stabilizing and normal operating of energy systems is often useful to set up a fast-acting active power regulator, e.g. energy storage. In addition nowadays problem of stabilizing voltage levels is actual in system base grids. For increasing electrical supply quality and reliability flywheel energy storage based on asynchronized machine is offered for compensating active and reactive power.

Key words: asynchronized machine, reactive power compensator, reliability, power grid stability, flywheel, energy storage.

Для поддержания нормальной работы энергосистемы в ряде случаев требуется наличие быстродействующего регулятора активной мощности, т.е. накопителя энергии.

Задачи, решаемые таким накопителем, преимущественно следующие:

- стабилизация работы изолированных энергосистем;
- обеспечение бесперебойного питания особо ответственных потребителей;
- стабилизация работы подстанций со слабой связью с энергосистемой;
- сглаживание резкопеременной (импульсной) нагрузки на энергосистему;
- регулирование частоты в энергосистеме.

Таким накопителем может быть как статическое устройство, так и электромеханическое. Электромеханический накопитель энергии (ЭМНЭ) представляет собой агрегат, состоящий из трёх основных частей:

- маховик, являющийся накопителем кинетической энергии;
- электромеханическое устройство сопряжения с сетью электроснабжения – электрическая машина переменного тока;
- преобразователь частоты (ПЧ).

Выдача или потребление активной мощности ЭМНЭ происходит за счёт изменения частоты вращения маховика.

В зависимости от схемы подключения ПЧ к электрической машине переменного тока возможны две принципиально различные схемы ЭМНЭ:

- с ПЧ в цепи статора;
- ПЧ в цепи возбуждения.

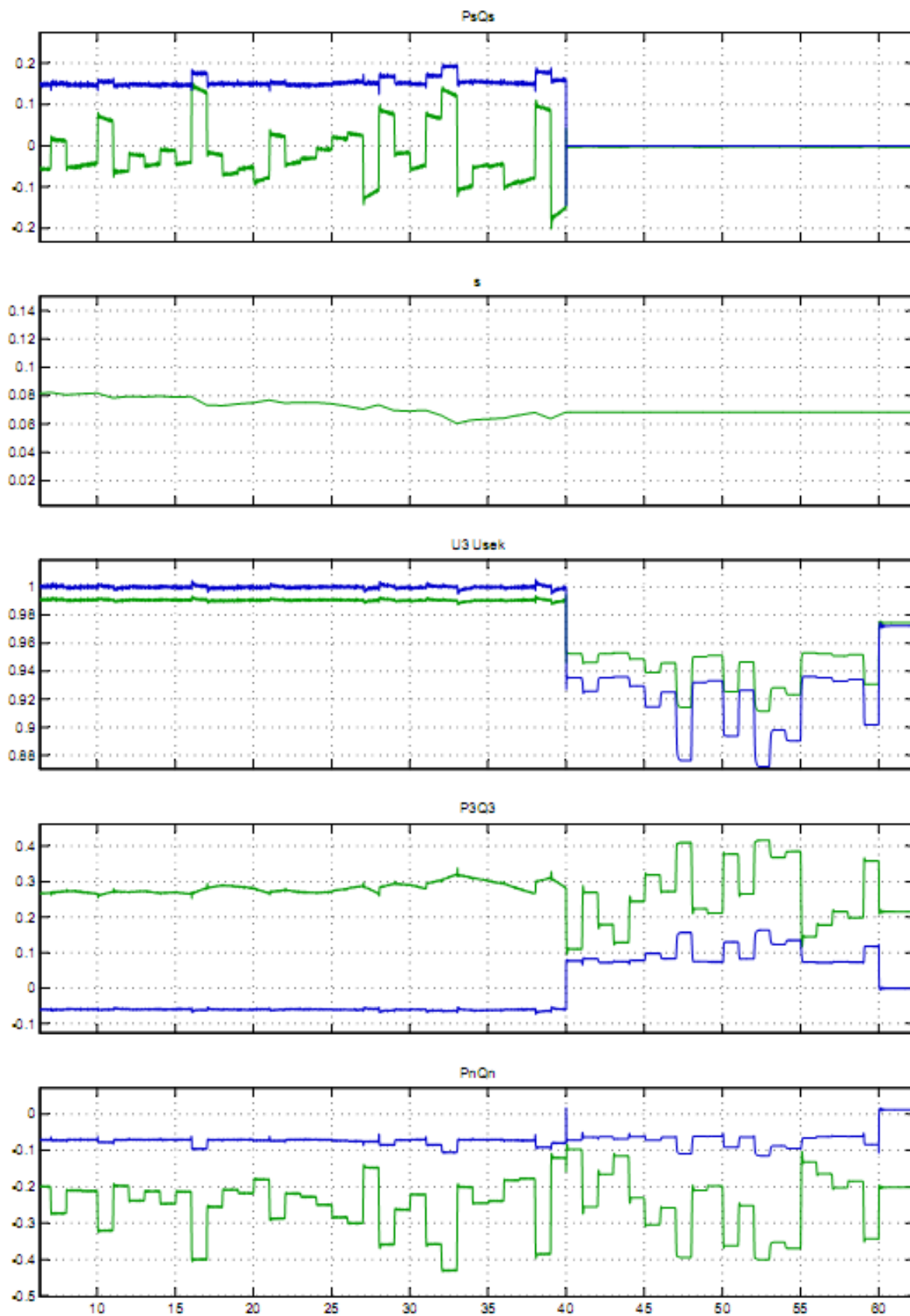
В случае включения ПЧ в цепь статора он становится основным звеном в составе ЭМНЭ и должен быть выбран на полную мощность машины (активную и реактивную). Включение ПЧ в цепь статора позволяет применить высокооборотную электрическую машину, а значит, снизить габариты накопителя в целом.

Вместе тем, ввиду ограничения максимальной мощности ПЧ, определяемой предельными параметрами мощных полупроводниковых ключей, и его значительного удорожания при приближении к верхней границе мощности, применение его в цепи статора технически и экономически оправдано только при относительно небольших мощностях ЭМНЭ, не превышающих ~ 20 МВт.

При применении накопителей больших мощностей (более 20-50 МВт) предпочтительным является такой подход к формированию ЭМНЭ, при котором ПЧ включается в цепь возбуждения и используется в качестве устройства управления электрической машиной, что позволяет возложить на нее основные функции накопителя. Это техническое решение позволяет практически уйти от ограничения по максимальной единичной мощности ЭМНЭ.

Реализация ЭМНЭ такого типа возможна, в частности, на базе асинхронизированного компенсатора с маховиком (АСКМ).

АСКМ представляет собой асинхронизированную машину, обмотка статора которой обычного исполнения включена в сеть, а ротор выполнен с симметричной трехфазной обмоткой для подключения к ПЧ, являющегося системой возбуждения. Регулирование активной и реактивной мощностей такого накопителя обеспечивается электрической машиной [1].



time offset: 0

Рис. 1. Дуговая сталеплавильная печь

Основными преимуществами АСКМ являются:

- высокое быстродействие (скорость изменения активной и реактивной мощности не связана с механическими процессами и ограничивается только постоянными времени обмотки возбуждения и системы возбуждения);
- высокая перегрузочная способность по току статора (до двукратной при кратковременном воздействии);
- независимое регулирование активной и реактивной мощностей;
- симметричность области допустимых режимов работы (возможны как полная выдача, так и полное потребление активной и реактивной мощностей).

Применение АСКМ в энергосистеме позволяет [2]:

- для мегаполисов:
 - решить проблему завышения уровня напряжения в распределительных сетях;
 - устранить колебания напряжения;
- для линий электропередач:
 - увеличить пропускную способность;
 - повысить устойчивость работы;
 - облегчить прохождение аварийных и послеаварийных режимов;
- для изолированных энергосистем (островные энергосистемы, удалённые регионы, удалённые добывающие предприятия и т.д.):
 - повысить устойчивость работы энергосистемы;
 - стабилизировать частоту напряжения;
 - стабилизировать уровень напряжения;
- для потребителей с резкопеременной нагрузкой (металлургические заводы, химическое производство):
 - сгладить колебания активной мощности;
 - снизить переток реактивной мощности в подводящей линии;
- для ответственных потребителей (АЭС, военные объекты):
 - обеспечить резервное питание;
 - обеспечить безопасное отключение при аварийной ситуации.

В качестве примера влияния АСКМ на рис. 1 приведены осциллограммы моделирования работы дуговой сталеплавильной печи (ДСП) при параллельной работе с АСКМ [3]. На осциллограммах сначала АСКМ введён в работу, затем отключается (при $t = 40$ с). Видно, что при работе АСКМ происходит почти полная компенсация влияния нагрузки на сеть. В качестве исходных данных для моделирования были взяты записи режима работы реально действующей ДСП с шагом отсчёта 1 с.

Выводы

Асинхронизированный компенсатор с маховиком (АСКМ) имеет достаточно обширную область применения как элемент FACTS в современных ин-

теллектуальных энергосистемах. Помимо регулирования реактивной мощности в диапазоне $\pm 100\%$ номинальной мощности он также является накопителем энергии со значительной активной мощностью. Это позволяет улучшить качество и надёжность электроснабжения:

- увеличить динамическую устойчивость энергосистем;
- снизить колебания активной мощности, вызванные импульсным характером нагрузки;
- являться источником питания для особо ответственных потребителей на время ввода резерва или безопасного отключения;
- улучшить качество поддержания частоты, особенно в островных энергосистемах.

Библиографический список

1. Шакарян, Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины / Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Лохматов, А.П. О применении маховичных асинхронизированных компенсаторов в энергосистеме / А.П. Лохматов, Р.Д. Мнев, П.В. Сокур // Электрические станции. 2011. №1. С. 48–50.
3. Мнев, Р.Д. Законы регулирования и режимы работы асинхронизированного компенсатора в энергосистеме: дисс. ... на соискание учёной степени канд. техн. наук, 2004.

УДК 621.316.722.1

В.Г. СУГАКОВ, Ю.С. МАЛЫШЕВ, А.А. ТОЩЕВ, И.И. ЯГЖОВ

СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕБАЛАНСА ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Волжский государственный университет водного транспорта

Проанализированы показатели качества электрической энергии, приведены последствия несимметрии и небаланса напряжения, а также приведено устройство коррекции небаланса фазных напряжений и способы устранения несимметрии напряжения.

Ключевые слова: напряжение, небаланс напряжения, несимметрия напряжения, качество электрической энергии.

We have analyzed certain qualitative characteristics of electrical power and resulted the consequences of asymmetry and voltage unbalance. Also we have described the operation principle of the unbalance correction device of phase voltages and some ways to eliminate voltage asymmetry.

Key words: voltage, unbalance voltage, voltage unsymmetry, power quality

В настоящее время в электротехнике применяются такие определения, относящиеся к качеству электрической энергии, как «небаланс» и «несимметрия» напряжения.

Согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость тех-

нических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», несимметрия напряжения - это состояние трехфазной системы энергоснабжения переменного тока, в которой среднеквадратические значения основных составляющих междуфазных напряжений или углы сдвига фаз между основными составляющими междуфазных напряжений не равны между собой [1]. В соответствии с ГОСТ 23875-88 «Качество электрической энергии. Термины и определения», небаланс напряжений (токов) - это отличие по модулю значения хотя бы одного из фазных или линейных напряжений (токов) многофазной системы электроснабжения от значений напряжений (токов) других фаз [2].

Под небалансом фазных (линейных) напряжений понимается неравенство фазных (линейных) напряжений в трехфазной системе, а также искажение симметрии напряжений трехфазной системы. Причиной искажения симметрии трехфазной системы могут служить асимметрия самого источника, а также несимметричное подключение потребителей электрической энергии по фазам, которые не отслеживает большинство современных систем автоматического регулирования напряжений [3].

Несимметричность трехфазной системы приводит к появлению факторов, негативно влияющих как на сам источник электрической энергии, так и на работу потребителей. К таким негативным факторам можно отнести:

- появление напряжений и токов обратной и нулевой последовательности;
- перевозбуждение генератора;
- перегрузку одной из фаз генератора;
- снижение качества электрической энергии [4].

Появление напряжений и токов обратной и нулевой последовательности приводит к дополнительным потерям мощности и энергии, а также потерям напряжения в сети [5]. Кроме того, отрицательно сказывается на рабочих и технико-экономических характеристиках вращающихся электрических машин. Ток прямой последовательности в статоре создает магнитное поле, вращающееся с синхронной частотой в направлении вращения ротора [6]. Токи обратной последовательности в статоре создают магнитное поле, вращающееся относительно ротора в направлении, противоположном вращению и создают тормозной фактор, отрицательно влияющий на работу источника электрической энергии. Кроме того, токи обратной последовательности снижают КПД двигателя [7]. В асинхронных двигателях возникают дополнительные потери в статоре. В синхронных машинах, кроме дополнительных потерь и нагрева статора и ротора, могут начаться опасные вибрации. Кроме того сокращается срок службы изоляции трансформаторов, синхронные двигатели и батарей конденсаторов уменьшают выработку реактивной мощности [8].

В частном секторе для питания электроприборов в основном используется однофазная система электроснабжения (СЭ). Так как СЭ изначально является трёхфазной, то возникает необходимость рассредоточивать все три фазы по различным потребителям электроэнергии. Для этого в определённом экономически и технически выгодном порядке распределяют фазы СЭ по потребителям

электроэнергии. При этом стоит заметить одну из технических сторон распределения энергии фаз по потребителям: стараются распределить так, чтобы нагрузка была в общем симметричной. Из-за того, что частный сектор является случайной нагрузкой, то возникают моменты времени, когда на одной из фаз потребление тока больше, чем на другой. В частном секторе используется трёхфазная сеть с нулевым проводом. Трёхфазная сеть с нейтралью менее подвержена небалансу напряжений при несимметричной нагрузке, так как в данной сети нулевой провод уравнивает фазные напряжения. Однако в связи с возникновением несимметричных токов возникает различное падение напряжений на сопротивлениях сети в каждой из фаз. При несимметричной нагрузке в трёхфазной сети с нейтралью потребляется не только прямая последовательность токов, но и токи обратной и нулевой последовательностей. Из-за наличия токов нулевой последовательности в нейтрали возникает ток, амплитуда которого в три раза больше амплитуды нулевой последовательности. Если не учитывать данный фактор, то при некоторой несимметрии этот ток может вызвать перегрузку нулевого провода, что может стать причиной его обрыва [9].

Небаланс и несимметрия напряжений оказывают практически одинаковое влияние на электрические машины, однако способы борьбы с ними в промышленных сетях и в автономных электростанциях различаются. Рассмотрим основные из них.

На данный момент для устранения возможности появления небаланса фазных напряжений (токов) могут применяться системы регулирования возбуждения синхронных генераторов [10], но использование подобных устройств не позволяет сохранять удовлетворительным коэффициент небаланса фазных напряжений при работе на несимметричную нагрузку, поскольку регулирование возбуждения производится для генератора в целом, а не для отдельных фаз¹.

Также для коррекции небаланса могут применяться линейные стабилизаторы напряжений. Преимуществом линейного стабилизатора являются простота, отсутствие помех и небольшое количество используемых деталей, что увеличивает надежность и срок службы элемента. Однако недостатком линейных стабилизаторов является их низкий КПД, причем чем меньше выходное напряжение источника питания, тем меньше становится его КПД [11].

Одним из способов удаления небаланса токов и напряжений в частном секторе, является использование компенсатора токов обратной и нулевой последовательностей (компенсатор токов небаланса – КТН) на базе параллельного активного фильтра. Все же подключение компенсатора необходимо осуществлять вблизи потребителя, так как ток компенсации обратной и нулевой последовательностей замыкается между нагрузкой и КТН, поэтому длину этих нагруженных токами небаланса проводов линии электропередач целесообразно уменьшить для снижения дополнительных потерь [9].

¹ ГОСТ Р ИСО 8528-1-2005. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 1. Применение, технические характеристики и параметры.

² ГОСТ Р 50783-95. Электроагрегаты и передвижные электростанции дизельные. Общие технические условия.

Для компенсации несимметрии напряжений в промышленной сети, образуемого в результате подключения однофазных потребителей электроэнергии, применяются управляемые и неуправляемые симметрирующие устройства, в зависимости от характера нагрузки.

Симметрирование системы линейных напряжений трехфазной сети сводится к компенсации тока обратной последовательности, потребляемого однофазными нагрузками и обусловленного им напряжения обратной последовательности. В настоящее время разработано большое число схем симметрирующих устройств с электрическими и с электромагнитными связями между элементами. Например схема Штейнметца, где компенсация тока обратной последовательности осуществляется с помощью конденсаторной батареи C и дросселя L .

Однако данные симметрирующие устройства компенсируют только реактивную составляющую тока и не влияют на активную составляющую, при этом следует иметь в виду, что всякое симметрирующее устройство влечет за собой дополнительные капиталовложения и эксплуатационные затраты [12].

Также в промышленной сети наличие потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой искажает форму кривой напряжения, что отрицательно сказывается на работе многих элементов системы электроснабжения.

Наибольшие дополнительные потери активной мощности и электроэнергии, обусловлены несинусоидальными токами имеют место в трансформаторах, двигателях и генераторах, для которых увеличение сопротивления обмоток происходит приблизительно в \sqrt{v} раз. В ряде случаев эти потери могут привести к недопустимому нагреву обмоток. При прохождении токов высших гармоник по элементам СЭС возникают дополнительные потери активной мощности:

$$\Delta P_{HC} = 3 \sum_{v=3}^n I_v^2 R_v,$$

где R_v - сопротивление по току v -й гармоники; I_v - ток v -й гармоники.

Известно несколько основных способов уменьшения несинусоидальности формы кривой напряжения:

Известно несколько основных способов уменьшения несинусоидальности формы кривой напряжения:

1. Увеличение фаз выпрямителя.

Согласно формуле $v = p \pm 1$, спектральный состав токов вентильных агрегатов определяется числом фаз выпрямителя – p . С увеличением p , форма первичного тока преобразователя приближается к синусоидальной, а количество гармоник, содержащихся в токе выпрямителя и, следовательно, в сети, уменьшается.

Увеличение числа фаз выпрямления является действительной мерой снижения содержания высших гармоник в кривых первичного тока преобразователей и напряжения сети. Однако анодные трансформаторы для большего числа фаз выпрямления получаются слишком сложными, дорогими и ненадежными.

Поэтому для мощных полупроводниковых преобразователей за рубежом и в России применяют, как правило, не более чем 12-фазный режим выпрямления.

2. Добавление фильтров высших гармоник.

Звено фильтра представляет собой контур из последовательно соединенных индуктивности и емкости, настроенных на частоту определенных гармоник. На частоте одной из гармоник индуктивное сопротивление реактора звена фильтра становится равным емкостному сопротивлению батареи конденсаторов и в цепи звена фильтра возникает резонанс напряжения и это звено шунтирует электрическую систему на частоте данной гармоники. На практике, как правило, применяют фильтры, состоящие из двух или четырех звеньев, настроенные на 5,7,11,13,23 и 25-ю гармоники.

Одновременно фильтр является источником реактивной мощности и может служить в качестве одного из средств для компенсации реактивных нагрузок.

Основными недостатками фильтров является их высокая стоимость, обусловленная, в основном, стоимостью батарей конденсаторов. Поэтому применение фильтров целесообразно лишь в тех случаях, когда требуется не только не допустить проникновения в электрическую систему токов некоторых гармоник, но и скомпенсировать реактивную мощность в рассматриваемом пункте СЭС.

Распространение фильтров ограничивает также большая их чувствительность к точности настройки.

При неточной настройке нагрузки звеньев фильтра эффективность его уменьшается и даже может иметь место увеличение гармоник напряжения на шинах [12].

Для снижения небаланса фазных напряжений при работе на переменную неоднородную несимметричную нагрузку предлагается устанавливать устройство коррекции небаланса фазных напряжений, которое представлено на рис. 1.

Устройство работает следующим образом: если, возникает разбалансировка фазных напряжений, то формируется код A амплитуды напряжения первой фазы. Через треть периода формируется код B амплитуды напряжения второй фазы, еще через треть периода – код C амплитуды напряжения третьей фазы. Если, например, имеет место соотношение $A > C > B$, то появится сигнал на первом выходе числового компаратора блока 7. Сигнал с выхода блока 7 поступает на второй вход вариатора 4-1. Когда завершается формирование очередного кода A , появляется импульс на выходе измерителя 5-1, который через открытый электронный ключ поступает на четвертый вход вариатора 4-1 и далее на вход измерителя амплитуды 5-1. Снижение проводимости вариатора 4-1 вызывает увеличение его сопротивления и падения напряжения Δu на нем, при этом на ступень снижается напряжение $u = u_0 - \Delta u$ первой фазы нагрузки, амплитуда которого максимальна.

С третьего выхода компаратора в блоке 7 подается сигнал на первый вход вариатора 4-2. В момент, когда в измерителе 5-2 завершается формирование кода B амплитуды второй фазы, появляется импульс на выходе $X5-1$, который

поступает на четвертый вход вариатора 4-2. Проводимость вариатора 4-2 возрастает на одну ступень, падение напряжения на нем уменьшается.

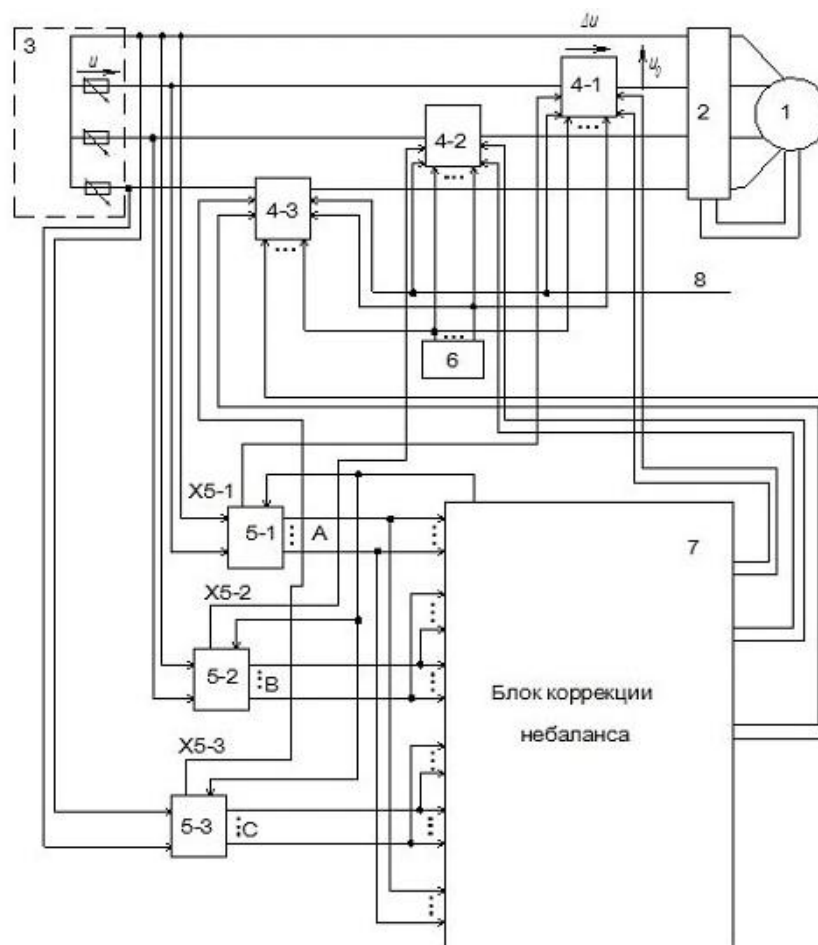


Рис. 1. Схема устройства коррекции небаланса фазных напряжений (токов):

1 – трехфазный генератор переменного тока; 2 – системой автоматического регулирования возбуждения; 3 – нагрузка; 4-1, 4-2 и 4-3- вариаторы; 5-1, 5-2 и 5-3- измерители амплитуды; 6 – задающий регистр; 7 – блок коррекции небаланса напряжений; 8 – шина ПУСК

Напряжение второй фазы нагрузки, амплитуда которого минимальна, возрастает на ступень. Если за счет однократной коррекции напряжения первой и второй фазы баланс не наступает, то продолжается, как описано ранее, сближение уровней напряжений путем ступенчатого снижения напряжения одной фазы и увеличения напряжения второй фазы.

Аналогичным образом осуществляется постоянный контроль и выравнивание напряжений по всем трем фазам.

В результате работы устройства происходит последовательное ступенчатое уменьшение наибольшего из фазных напряжений и увеличение наименьшего из напряжений до наступления баланса на уровне среднего значения.

Таким образом, применение устройства коррекции небаланса фазных напряжений приводит к снижению возможности появления напряжений и токов обратной и нулевой последовательности, перегрузки одной из фаз генератора,

перегрева генератора и повышения качества электрической энергии в целом. Кроме того, применение данного устройства приводит к увеличению срока службы, надежности и стабильности работы источника электроэнергии.

Устройство построенное по предложенной структуре может быть применено для устранения несимметрии фазных напряжений на промышленных предприятиях и при осуществлении питания небольших населенных пунктов.

Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный стандарт. Введен 01.07.2014 г. – М.: Стан-дартинформ, 2014г. – 16 с.
2. ГОСТ 23875–88. Качество электрической энергии. Термины и определения. Введ. 01.07.89. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.
3. **Коробко, Г.И.** Повышение качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах с использованием вольтодобавочных устройств / Г.И. Коробко, С.В. Попов, В.В. Лебедев, А.С. Макаев / Т. 78. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева / НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2012. №1 (94). – 366 с.
4. **Коробко, Г.И.** Влияние высших гармоник на работу судового электрооборудования и способы их снижения / Г.И. Коробко, В.В. Лебедев / Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Т. 2. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – 382 с.
5. **Магазинник, Л.Т.** Оценка величины дополнительных потерь мощности, обусловленных несимметрией токов / Л.Т. Магазинник, Н.Ю. Егорова // Современные наукоемкие технологии. 2006. № 4. С. 44–45.
6. **Полянский, В.Ф.** Электрооборудование судов и предприятий: учебник для вузов / В.Ф. Полянский, А.В. Попов. – М.: Транспорт, 1989. С. 233–236.
7. **Чивенков, А.И.** Математическая модель тиристорного контактора с пофазным регулированием преобразовательных трансформаторов / А.И. Чивенков, Б.Ю. Алтунин // Проблемы преобразовательной техники: тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции / Институт Электродинамики АН УССР – Киев, 1991. Часть IV. С. 151–154.
8. Авторское свидетельство 964850. Устройство для симметрирования напряжения и компенсации реактивной мощности в трехфазной сети Б.И. / И.М. Туманов, В.Г. Рогоцкий, А.Н. Левин, А.И. Чивенков. №37. 1982.
9. **Киселев, М.Г.** Компенсатор токов небаланса / М.Г. Киселев. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
10. Пат. 2523005 RU, МПК Н 02 Р9/14 Система возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Ю.С. Малышев, А.А. Тощев. 2013108756/07; заявл. 27.02.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. №20. – 8 с.
11. **Сугаков, В.Г.** Системы автоматического регулирования параметров электрической энергии судовых электростанций. Ч. 2. Автоматическое регулирование напряжения судовых источников электрической энергии : учеб. пособие / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов. – Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2011. С. 47–57.
12. **Распопов, Е.В.** Электрические системы и сети. Качество электрической энергии и его обеспечение: конспект лекций / Е.В. Распопов. – Л.: СЗПИ, 1990. – 48 с.

УДК 621.313

А.А. БАШЕВ

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ФАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В системе предложено решение уравнения фазовой следящей системы в виде ряда Вольтерра и определяются условия его сходимости.

Ключевые слова: ряд Вольтерра, фазовое пространство, импульсная переходная функция, метод итераций, сходимость.

A solution to the equation of a tracking phase system in the form of a Volterra series is proposed. The conditions of its convergence are determined.

Key words: Volterra series, phase space, transfer function, convergence, iteration method.

Большой класс систем с фазовым управлением: систем ФАПЧ, следящих систем с фазовым управлением двигателем и т.д. – описываются уравнением типа

$$p\varphi^* + K(p)\sin\varphi^* = px. \quad (1)$$

Имеется большое количество методов исследования уравнения такого типа [1–3]. В настоящей работе для его исследования использован функциональный подход [4, 5].

Будем решать это уравнение при $K(p) = \frac{k_0}{(Tp+1)}$ и входном сигнале

$$x = kt. \quad (2)$$

Фазовая следящая система имеет несколько режимов работы. Если выходной сигнал системы повторяет входной сигнал, параметры которого изменяются, то такой режим называется *режимом синхронизма*.

С понятием режима синхронизма неразрывно связано понятие полосы синхронизма, т.е. область некоторых параметров входных сигналов, при которых возможен режим синхронизма.

Второе состояние системы – *режим биений* – наблюдается в тех случаях, когда коэффициент k во входном сигнале $x = kt$ превышает общий коэффициент усиления k_0 . При этом скорость вращения выходного вала системы отличается от заданной скорости определяемой величиной k . Переходное состояние, при котором режим биений переходит в режим синхронизма, называется *режимом захвата*.

Под полосой захвата понимают область параметров входных сигналов, в которой при любых начальных условиях устанавливается режим синхронизма.

Задача определения полосы захвата связана с переходом от устойчивого предельного цикла, соответствующего режиму биений, к полуустойчивому. Неустойчивые предельные циклы, хотя и не имеют физического смысла, но они

являются границами областей начальных значений, начиная с которых система приходит к определенному стационарному режиму.

Качественное исследование уравнения рассматриваемой системы позволяет разделить пространство параметров системы на области, для точек которых система имеет качественное различные режимы работы. На фазовой поверхности существует два типа предельных циклов: предельные циклы второго рода, охватывающие цилиндр.

Для фазовой системы особые траектории на цилиндрической фазовой поверхности имеют следующее физическое истолкование.

Устойчивое состояние равновесия – это стационарный режим работы при постоянной разности фаз (режим синхронизма). Устойчивый предельный цикл 1-го рода – это стационарный режим биений в системе около постоянной разности фаз (режим биений 1-го рода). Устойчивый предельный цикл 2-го рода – это стационарный режим биений в системе, при котором происходит периодическое повторение некоторой разности колебаний при неограниченно увеличивающейся разности фаз.

Подставляя (2) в (1) и делая замену переменной $\varphi = \varphi^* - kt$, получим

$$p\ddot{\varphi} + K(p)\sin(\varphi+kt) = 0,$$

или

$$T\ddot{\varphi} + \varphi + k_0(\sin\varphi\cos kt + \cos\varphi\sin kt) = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) будем искать в виде ряда Вольтерра [2]:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i. \quad (4)$$

Можно легко показать, что ряд Вольтерра, построенный для системы, описываемой уравнением (1), является сходящимся для значений $k < k_0$, т.е. система в этом случае устойчива. При $k > k_0$ этот ряд расходится. Но известно [2], что при значениях $k > k_0$ в системе возникает режим биений. В этом случае в системе могут существовать биения второго рода, что соответствует предельным циклам второго рода вокруг фазового цилиндра, являющегося фазовым пространством рассматриваемой системы [1].

Следовательно, в области биений должно существовать решение уравнения (1), разрешенное относительно такого вынуждающего воздействия, при котором решение имеет периодический характер.

Подставляя (4) в (1), представляя нелинейные функции степенными рядами и приравнивая члены одинакового порядка слева и справа, получим бесконечную систему линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для составляющих ряда (4):

$$\begin{cases} T\ddot{\varphi}_1 + \varphi_1 + k_0 \cos kt \cdot \varphi_1 = -k_0 \sin kt \\ T\ddot{\varphi}_2 + \varphi_2 + k_0 \cos kt \cdot \varphi_2 = -k_0 \varphi_1 \cos kt \\ T\ddot{\varphi}_3 + \varphi_3 + k_0 \cos kt \cdot \varphi_3 = k_0 \varphi_1 \varphi_2 \sin kt. \\ \dots \end{cases} \quad (5)$$

Решение этой системы найдем, применяя интеграл свертки. Для этого определим импульсную переходную функцию $y(t, \tau)$ линейной части, которая является решением уравнения

$$T\ddot{y}(t, \tau) + \dot{y}(t, \tau) + k_0 \cos kt \cdot y(t, \tau) = \delta(t - \tau), \quad (6)$$

или

$$\ddot{y}(t, \tau) + \frac{1}{T}\dot{y}(t, \tau) = -\frac{k_0}{T}y(t, \tau) \cos kt + \delta(t - \tau).$$

Рассматривая правую часть (6) как входной сигнал некоторой стационарной системы, составим интегральное уравнение для $y(t, \tau)$:

$$y(t, \tau) = \lambda(t - \tau) - \frac{k_0}{T} \int_{\tau}^t \lambda(t - \xi) \cos k\xi \cdot y(\xi, \tau) d\xi, \quad (7)$$

где $\lambda(t - \tau)$ - импульсная переходная функция системы с усредненными во времени параметрами, т.е. решение левой части (9) при входном воздействии $\delta(t - \tau)$.

В качестве нулевого приближения выберем

$$y_0(t, \tau) = \lambda(t - \tau) = T(e^{-\frac{1}{T}(t - \tau)} - 1),$$

тогда следующее приближение будет

$$y_1(t, \tau) = \lambda(t - \tau) - \frac{k_0}{T} \int_{\tau}^t \lambda(t - \xi) \cos k\xi \cdot y_0(\xi, \tau) d\xi.$$

Продолжая итерационный процесс, можно убедиться, что остальные части малы и можно считать, что

$$y(t, \tau) \approx y_1(t, \tau).$$

Последовательно решая уравнения системы (5), отметим, что в выражениях для φ_1, φ_2 , и т.д., которые здесь не приводятся из-за чрезмерной громоздкости, можно выделить множитель k_0/k в первой, второй и т.д. степенях соответственно и можно показать, что ряд Вольтерра (4) сходится при $k > k_0$.

Запишем уравнение (3) в виде

$$T\ddot{\varphi} + \dot{\varphi} + k_0 \cos kt \cdot \varphi = -k_0 \sin kt - k_0 \times \left(\frac{\sin kt}{2!} \cdot \varphi^2 - \frac{\cos kt}{3!} \cdot \varphi^3 + \frac{\sin kt}{4!} \varphi^4 + \dots \right) \quad (8)$$

Пусть $|k_0 \sin kt| < k_0$, тогда решение (8) можно записать в виде ряда Вольтерра:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_1(t) + \varphi_2(t) + \varphi_3(t) + \dots = \\ &= a_1(t)k_0 + a_2(t)k_0^2 + a_3(t)k_0^3 + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

Пусть $y(t, \tau)$ удовлетворяют условию

$$|y(t, \tau)| \leq Ae^{\nu(t-\tau)},$$

где $A > 0$, $\nu < 0$ постоянные и не зависящие от параметра фильтра.

Рассмотрим уравнение

$$\dot{f} + \nu f = Ak + 2A(e^f - f - 1). \quad (10)$$

Решение этого уравнения $f \equiv 0$ при нулевых начальных условиях и $k = 0$ будет асимптотически устойчиво, тогда ряд Вольтерра

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots = b_1(t)k_0 + b_2(t)k_0^2 + \dots, \quad (11)$$

представляющий решение всегда сходится при $k_0 \leq r$ ($r \neq 0$). Применяя свертку, $f_i(t)$ можно представить в виде:

$$f_i(t) = \int_0^t Ae^{\nu(t-i)} \Phi_i[f_1(\tau), f_2(\tau), \dots, f_{i-1}(\tau)] d\tau. \quad (12)$$

Можно показать, что для рядов (9) и (11) справедливо

$$|b_i(t)| \geq |a_i(t)| \quad (13)$$

для всех $0 \leq t \leq \infty$ и всех значений параметров. Покажем это:

$$|f_1| = \left| \int_0^t Ae^{\nu(t-\tau)} k_0 d\tau \right| \geq \left| \int_0^t |y(t, \tau)| k_0 d\tau \right| = |\varphi_1|$$

$$|f_2| = \left| \int_0^t Ae^{\nu(t-\tau)} \left(\int_0^\tau Ae^{\nu(\tau-\xi)} k_0 d\xi \right)^2 d\tau \right| \geq$$

$$\geq \left| \int_0^t |y(t, \tau)| \left(\int_0^\tau |y(t, \xi)| k_0 d\xi \right)^2 d\tau \right| = |\varphi_2|$$

и т.д.

Можно отметить, что ряд $f(t)$ является мажорирующим для ряда $\varphi(t)$ и при $k_0 \leq r$ оба ряда сходятся.

Сходимость ряда Вольтерра (6) свидетельствует об устойчивости биений второго рода при $k > k_0$ или о существовании устойчивых предельных циклов второго рода на поверхности фазового цилиндра.

Решением же уравнения (1) в области биений будет φ^* , которое в рассматриваемом случае будет расходящимся.

Библиографический список

1. Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Физматгиз, 1959.
2. Шахгильдян, В.В. Фазовая автоподстройка частоты / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин. – М.: Связь, 1966.

3. Капланов, М.В. Полоса захвата при фазовой автоподстройке частоты // Радиотехника, 1956. Т. 11. №5.
4. Ван Трис, Г. Синтез оптимальных нелинейных систем управления / Г. Ван Трис. – И.Л., М., 1964.
5. Башев, А.А. Об исследовании одной нелинейной следящей системы с фазовым управлением / А.А. Башев, С.Г. Сапфиров // Труды ГНИ им. А.А. Жданова. Т. XXVІІ, Вып. 2. 1972.
6. D'Angelo, H. Determination of the impulsive response of two classes of linear time – varying systems / H. D'Angela, T. Higgins // IEEE Ynt.: Conv. Record, 1965. P. 7.

УДК 681.51

А.А. БАШЕВ

ОПЕРАТОРЫ И ЯДРА ВОЛЬТЕРРА ОДНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены методы анализа нелинейных систем переменного тока на основе рядов Вольтерра и синтеза ядер Вольтерра корректирующих звеньев.

Ключевые слова: ряд Вольтерра, ядра Вольтерра, многомерное преобразование Лапласа.

Consider the method of the analysis of the nonlinear systems AC on the basis of the Volterra series and the synthesis of the Volterra kernels of the corrective units.

Key words: Volterra series, kernels of the Volterra, multi-dimensional Laplace transform.

Рассматривается следящая система с фазовым управлением асинхронным двухфазным двигателем, функциональная схема которой представлена на рис. 1, описываемая уравнением [1], [6]:

$$\varphi + \Phi(p)[K'(p, \omega)\{\sin\varphi\} + K''(p, \omega)L\{\cos\varphi\}] = \theta_1, \quad (1)$$

где $\varphi = \theta_1 - \theta_2$ - угол рассогласования между осью датчика и приемника; $\Phi(p) = \frac{1}{p(Tp+1)}$ - передаточная функция двигателя; $K'(p, \omega) = Re_j K(p + j\omega)$ и $K''(p, \omega) = Im_j K(p + j\omega)$ - соответственно реальная и мнимая части комплексной передаточной функции корректирующего звена.

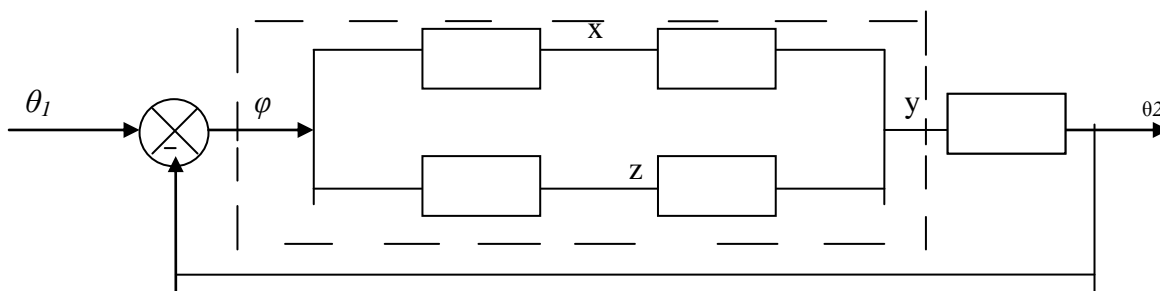


Рис. 1

Выходной сигнал системы, описываемой уравнением (1), можно представить как результат воздействия нелинейного оператора H на входной сигнал θ_1 (рис. 2), т.е.

$$\varphi = H[\theta_1]. \quad (2)$$

Эта связь между входом и выходом системы с достаточной степенью точности может быть выражена в виде ряда Вольтерра [2]

$$\varphi(p) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n[H_n(p_1, \dots, p_n) \prod_{i=1}^n \theta_1(p_i)], \quad (3)$$

где $H_n(p_1, \dots, p_n)$ – многомерные передаточные функции или ядра нелинейной системы; F_n – операция сведения n -мерного преобразования Лапласа в одномерное.

Следовательно, набор ядер $H_1, H_2, \dots, H_n, \dots$ полностью характеризует нелинейную систему. Общий нелинейный оператор ее будет

$$H = H_1 + H_2 + \dots + H_n + \dots \quad (4)$$

Представляя нелинейные функции в (1) в виде степенных рядов, подставляя туда (2) и (3) и приравнивая члены одинаковых порядков, получим следующие выражения для определения ядер:

$$H_1 = I - \Phi * K_1' * H_1 - \Phi * K_1'' \quad (5)$$

$$H_2 = -\Phi * K_1' * H_2 - \Phi * K_2' * H_1 - \Phi * K_2'' + \frac{1}{2} \Phi * K_1'' * H_1'' \quad (6)$$

$$H_3 = -\Phi * K_1' * H_3 - \Phi * K_3' * H_1 - \Phi * K_3'' + \frac{1}{6} \Phi * K_1'' * H_1''' - \Phi * K_1'' * (H_1 * H_2) \quad (7)$$

и т.д.

Здесь символ (*) означает каскадное соединение звеньев системы, I – единичная матрица [3].

С использованием теорем о каскадном включении [2], [7], [8] ядра в изображениях примут вид

$$H_1(p) = 1 - \Phi(p)K_1'(p)H_1(p) - \Phi(p)K_1''(p) \quad (8)$$

$$H_2(p_1, p_2) = -\Phi(p_1 + p_2)K_1'(p_1 + p_2)H_2(p_1, p_2) - \Phi(p_1 + p_2)K_2'(p_1 + p_2)H_1(p_1)H_1(p_2) - \Phi(p_1 + p_2)K_2''(p_1, p_2) + \frac{1}{2!} \Phi(p_1 + p_2)K_2''(p_1 + p_2)H_1(p_1)H_1(p_2). \quad (9)$$

Откуда

$$H_1 = \frac{I - \Phi * K''}{I + \Phi * K'}, \quad (10)$$

$$H_2 = \frac{1}{2!} \frac{\Phi * K' * H_1^2}{I + \Phi * K'} \quad (11)$$

и т.д.

Из выражений для операторов (10), (11) и т.д. могут быть легко получены выражения для ядер системы (рис. 2).

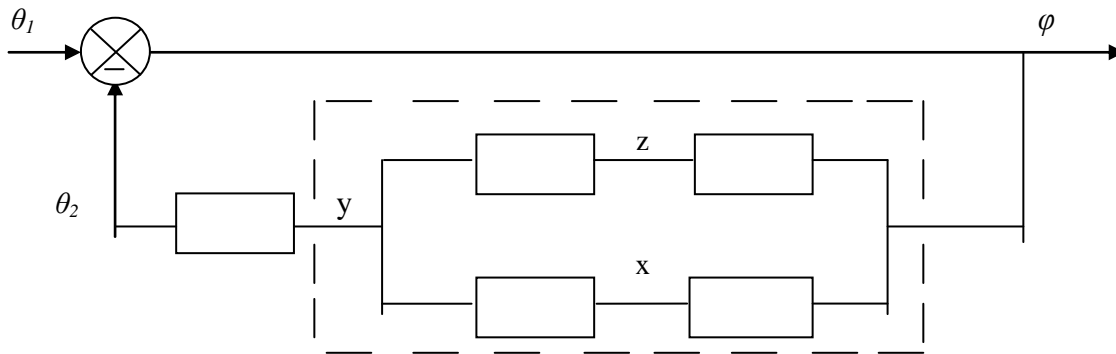


Рис. 2

$$H_1(p) = \frac{1 - \Phi(p)K''(p)}{1 + \Phi(p)K'(p)}. \quad (12)$$

$$H_2(p_1, p_2) = \frac{1}{2!} \frac{\Phi(p_1 + p_2)K''(p_1 + p_2)H_1(p_1)H_1(p_2)}{1 + \Phi(p_1 + p_2)K'(p_1 + p_2)} \quad (13)$$

и т.д.

Выходной сигнал системы в изображениях будет

$$\varphi(p) = H_1(p)\theta_1(p) + F_2[H_1(p_1, p_2)\theta_1(p_1)\theta_1(p_2)] + \dots + F_n[H_n(p_1, \dots, p_n)\theta_1(p_1) \dots \theta_1(p_n)] + \dots = \quad (14)$$

Подставляя сюда найденные ядра системы и переходя к одномерным изображениям и далее к оригиналам, определяется реакция системы на заданное входное воздействие.

Этот аппарат может быть использован для определения ядер корректирующего звена.

Сигнал на выходе корректирующего звена, в общем случае нелинейного, представим в виде ряда Вольтерра

$$Y(p) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n [K'_n(p_1, \dots, p_n, \omega) \prod_{i=1}^n X(p_i) + K''_n(p_1, \dots, p_n, \omega) \prod_{i=1}^n Z(p_i)], \quad (15)$$

где $K'_n(p_1, \dots, p_n, \omega)$ и $K''_n(p_1, \dots, p_n, \omega)$ - ядра реальной и мнимой частей корректирующего звена, $Y(p)$ - выходной суммарный сигнал корректирующего звена, $X(p)$ и $Z(p)$ - входные сигналы реальной и мнимой частей корректирующего звена.

Общий нелинейный оператор корректирующего звена тогда будет

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_n + \dots = (K'_1 + jK''_1) + (K'_2 + jK''_2) + \dots + (K'_n + jK''_n) + \dots \quad (16)$$

Мы хотим найти последовательность ядер корректирующего звена $K_1, K_2, \dots, K_n, \dots$ такую, чтобы система имела заданное соотношение между входом и выходом в виде (3) или, что тоже самое, задаваясь выходом системы в виде ряда Вольтерра, по заданным ядрам $H_1, H_2, \dots, H_n, \dots$ найти ядра корректирующего звена.

Пусть синтезируется линейное корректирующее звено, ядро которого есть аналитическая функция двух переменных p и ω

$$K(p, \omega) = K'(p, \omega) + jK''(p, \omega), \quad (17)$$

для которого выполняется условия Коши - Римана:

$$\frac{\partial K'}{\partial p} = \frac{\partial K''}{\partial \omega}, \quad \frac{\partial K'}{\partial \omega} = -\frac{\partial K''}{\partial p}. \quad (18)$$

В случае аналитической функции $K(p)$ функции K' и K'' являются гармоническими функциями переменных p и ω , т.е. удовлетворяют уравнению Лапласа [4]. Зная гармоническую функцию, например K' , можно с точностью до постоянного слагаемого определить сопряженную с ней гармоническую функцию K'' из условий Коши - Римана

$$K''(p, \omega) = \int \frac{\partial K'}{\partial p} d\omega + \psi(p), \quad (19)$$

где

$$\frac{d\psi}{dp} = -\left(\frac{\partial K'}{\partial \omega} + \frac{\partial}{\partial p} \int \frac{\partial K'}{\partial p} d\omega \right).$$

Аналогично по K'' можно определить K' .

Подставляя в (8) соотношение (19) при $\psi(p) = 0$ и дифференцируя обе части (8) по ω , получим уравнение

$$H_1(p) \frac{\partial K'}{\partial \omega} + \frac{\partial K'}{\partial p} = 0. \quad (20)$$

Это линейное однородное уравнение в частных производных для определения $K' = K'(p, \omega)$ [5].

Библиографический список

1. Сапфиров, С.Г. Электромеханика / С.Г. Сапфиров [и др.] // Известия вузов, 1970. №10.
2. Ку, И.Х. Техническая кибернетика за рубежом / И.Х. Ку, А.А. Вольф. – М.: Машиностроение, 1968.
3. Ван – Трис, Г. Синтез оптимальных нелинейных систем управления / Г. Ван – Трис. – М.: Мир, 1964.
4. Тихонов, А.М. Уравнения математической физики / А.М. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1966.
5. Степанов, В.В. Курс дифференциальных уравнений / В.В. Степанов. – М.: Физматгиз, 1959.
6. Ивей, К.А. Системы автоматического регулирования на несущей переменного тока / К.А. Ивей. – М.: Машиностроение, 1968.

Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.34: 62-50

С.К. ЛЕБЕДЕВ, Н.Е. ГНЕЗДОВ, А.Р. КОЛГАНОВ

**МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПО БЕССЕЛЮ ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ
ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

Рассмотрен выбор формы и параметров распределения корней характеристического уравнения, определяющего модель динамики электромехатронных модулей позиционирования. Показано, что распределение корней по Бесселю дает преимущества перед другими распределениями по быстродействию и монотонности, а также обеспечивает минимальные искажения при реализации сигналов управления.

Ключевые слова: электромехатронные модули, системы управления, характеристическое уравнение, среднегеометрический корень, стандартные распределения корней.

The choice of the form and parameters of root distribution of the characteristic equation which define dynamic model of positioning electromechatronic modules is considered. It is shown that Besselian root distribution gives advantages on speed and monotony before other distributions and provides the minimum distortions at realisation of control signals also.

Key words: electromechatronic modules, control systems, characteristic equation, root mean square; standard root distribution.

При синтезе систем управления электромехатронными модулями часто используют компоненты с модальными свойствами: регуляторы и наблюдатели состояния, полиномиальные регуляторы, фильтры [1, 2]. Это предполагает применение стандартных форм распределения корней характеристического уравнения [3, 4], среди которых наибольшее распространение получили распределения по Бесселю, биному Ньютона, Баттерворту и Баттерворту-Томсону.

Выбор формы распределения корней и его параметров определяет модель динамики системы: качественные (характер динамических процессов) и количественные (величина перерегулирования, быстродействие, время запаздывания сигнала) показатели переходных процессов. В специальной литературе рекомендуют выбирать, например, значение среднегеометрического корня ω_0 по нормированным переходным характеристикам фильтров стандартных форм (номограммам) [4]. Также есть рекомендации, учитывающие влияние упругих

связей, параметрической чувствительности системы [5]. Однако этот вопрос изучен недостаточно: использование номограмм (графический метод) даёт погрешность, выбор ω_0 по заданной полосе пропускания не описан. В результате при стендовой отладке систем приходится корректировать параметры регуляторов, иногда в разы, чтобы достичь желаемых показателей.

Как следует из анализа систем с электромехатронными модулями [2], следует рассмотреть характеристики распределений со 2-го по 5-й порядок. В предыдущих работах авторов описана процедура определения параметров распределения корней по нормированным переходным характеристикам [2, 7]. В среде *Mathcad* создан ряд программ, позволяющих по заданным времени регулирования t_p и коридору отклонения переходной характеристики от установившегося значения Δh получать значения ω_0 и коэффициентов характеристических полиномов Бесселя, Ньютона, Баттерворта и Баттерворта-Томсона до 5-го порядка включительно.

Анализ результатов расчетов показал, что распределение Бесселя показывает наилучшие показатели по быстродействию при отсутствии колебательности. Монотонные процессы обеспечивает бином Ньютона, но при одинаковом t_p требуются большие, чем в распределении Бесселя, значения ω_0 . В любом случае, определение ω_0 по нормированным переходным характеристикам существенно зависит от заданной величины статической ошибки Δh , а в астатических системах, где $\Delta h=0$, решение задачи отсутствует, и сравнение различных форм распределения корней характеристических полиномов затруднено.

Более универсальным требованием к динамике электроприводов является обеспечение полосы пропускания f_{np} . Кроме того, и среднегеометрический корень имеет размерность частоты и находит свое отражение в частотных характеристиках динамических звеньев.

Анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ различных распределений выполнен при относительной частоте

$$\omega' = \omega / \omega_0, \quad (1)$$

$$\omega_0 = \omega_{np} / \omega'_{np} \text{ и } \omega'_{np} = \min \{ \omega'_{-3dB}; \omega'_{-90^\circ} \}, \quad (2)$$

где ω'_{-3dB} , ω'_{-90° – относительные частоты пересечения границ полосы пропускания.

Характеристики показывают, что нормирование по уровню - 3дБ соответствует полосе пропускания только для систем 2-го порядка, для систем 3-го порядка и выше полосу пропускания системы определяют по ЛФЧХ.

Далее для примера возьмем $f_{np}=10$ Гц, достаточно высокую для систем позиционирования [2].

Рассмотрено время группового запаздывания, постоянство которого в полосе пропускания характеризует минимальное искажение сигналов управления [3]:

$$t_z = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}. \quad (3)$$

Для всех распределений получены характеристики нормированного вре-

мени группового запаздывания (например, рис 1). Для оценки равномерности характеристик выполнен расчёт относительного отклонения времени группового запаздывания t_z (табл. 1):

$$\Delta t_z = \left| \frac{t_z(0,01) - t_{z \max}}{t_z(0,01)} \right| \cdot 100\% \quad (4)$$

где $t_z(0,01)$ – начальное значение времени группового запаздывания; $t_{z \max}$ – максимальное отклонение.

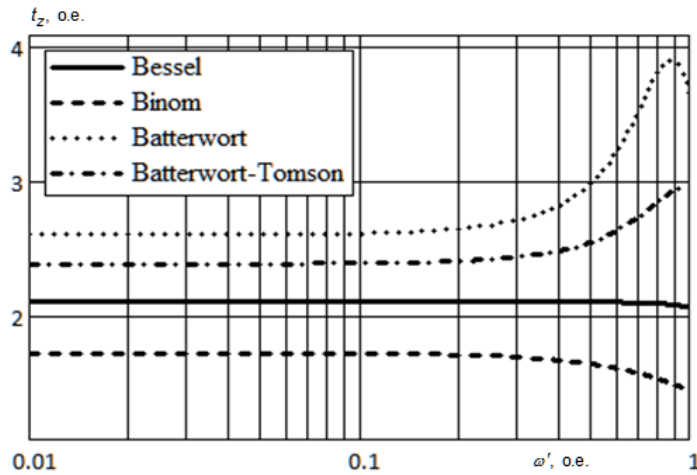


Рис. 1. Нормированное время группового запаздывания ($f_{np}=10$ Гц, $n=4$)

Таблица 1

Отклонение времени группового запаздывания

Распределение корней	Порядок полинома			
	2	3	4	5
по Бесселю	19,06	6,516	1,812	0,395
по биному Ньютона	29,17	20,56	15,85	12,91
по Баттерворту	20,69	37,13	49,58	48,19
по Баттерворту-Томсону	9,27	13,91	23,40	84,09

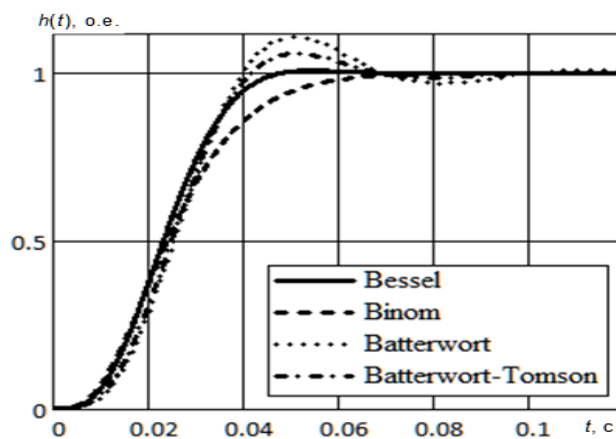


Рис. 2. Переходные характеристики, приведенные к полосе пропускания ($f_{np}=10$ Гц, $n=4$)

Таблица 2

**Параметры переходных характеристик, приведенных к полосе пропускания
($f_{np}=10$ Гц, $n=4$)**

Распределение корней	Параметры	
	δ , %	t_p при $\Delta h=1\%$, с
по Бесселю	0,83	0,045
по биному Ньютона	0	0,066
по Баттерворту	11,08	0,095
по Баттерворту-Томсону	5,30	0,085

По значениям ω_0 , соответствующим заданной полосе пропускания, рассчитаны переходные характеристики для оценки динамических свойств и параметры переходных характеристик (рис. 2 и табл. 2).

Исследования подтверждают предпочтительность выбора в качестве критерия настройки динамики электроприводов полосы пропускания, а не времени регулирования, которое как критерий имеет неопределенность с точки зрения ошибки регулирования.

Анализ результатов показывает, что максимальные результаты по монотонности и быстродействию при порядках систем от второго до пятого показывает распределение Бесселя. В случае жестких требований к отсутствию перерегулирования при синтезе систем управления следует выбирать распределение по биному Ньютона, оно незначительно проигрывает Бесселю только в быстродействии.

Что же касается характеристики группового времени запаздывания, максимальные результаты по ширине зоны постоянства в полосе пропускания и минимальное относительное отклонение при рассмотренных порядках систем имеет распределение Бесселя.

Таким образом, настройка динамики электроприводов на распределение корней характеристического уравнения замкнутой системы, по Бесселю, не только дает преимущества перед другими распределениями по быстродействию и монотонности, но и обладает уникальными свойствами, обеспечивающими минимальные искажения при реализации сигналов управления.

В табл. 3 представлены абсолютные характеристические полиномы Бесселя, приведенные к заданной полосе пропускания.

Таблица 3

Полиномы Бесселя, приведенные к полосе пропускания

ω_0	Характеристические полиномы Бесселя
ω_{np}	$s^2+2,203\omega_0s+1,619\omega_0^2$
$\omega_{np}/0,9$	$s^3+3,417\omega_0s^2+4,867\omega_0^2s+2,771\omega_0^3$
$\omega_{np}/0,74$	$s^4+4,730\omega_0s^3+10,069\omega_0^2s^2+11,114\omega_0^3s+5,258\omega_0^4$
$\omega_{np}/0,65$	$s^5+6,179\omega_0s^4+17,820\omega_0^2s^3+29,360\omega_0^3s^2+21,210\omega_0^4s+11,210\omega_0^5$

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).

Библиографический список

1. **Тютиков, В.В.** Робастное модальное управление технологическими объектами / В.В. Тютиков, С.В. Тарарыкин; Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина. – Иваново, 2006. – 256 с.
2. **Колганов, А.Р.** Современные методы управления в электромеханотронных системах. Разработка, реализация, применение /А. Р. Колганов, С. К. Лебедев, Н. Е. Гнездов; Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина. – Иваново, 2012. – 256 с.
3. **Кузовков, Н.Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976.
4. **Мошиц, Г.** Проектирование активных фильтров / Х. Мошиц, П. Хорн. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
5. **Борцов, Ю.А.** Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. –2-е изд., перераб. и доп.– СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992.– 288 с.
6. **Лебедев, С.К.** Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов / С.К. Лебедев, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2008. №3. С. 14–16.

УДК 621.314

А.Б. ДАРЬЕНКОВ, И.С. ПОЛЯКОВ, С.А. ГУЗЕВ

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проводится технико-экономический анализ аппаратной реализации дизель-генераторной системы переменной частоты вращения с точки зрения оптимального потребления топлива на основе задатчика экономичного режима работы ДВС.

Ключевые слова: единая электростанция, электродвижение, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения.

In the article the feasibility study a hardware implementation of a diesel generator system variable rotational speed from the point of view of optimal fuel consumption on the basis of the setpoint operating mode economical ice

Key words: unified electric power station, electric propulsion, variable speed diesel generator set.

Существующие дизель-генераторы (ДГ) работают с постоянной (номинальной) частотой вращения вала во всем диапазоне изменения нагрузки. Од-

нако работа двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при постоянной частоте вращения, но при переменной нагрузке, характеризуется неоптимальным расходом топлива, т.е. пониженным КПД.

Следовательно, разработка и создание дизель-генераторной установки, работающей при переменной, в зависимости от нагрузки генератора, частоте вращения приводного ДВС, обеспечивающей существенную экономию топлива, является актуальной народно-хозяйственной задачей.

Одним из вариантов построения дизель-генераторной системы, обеспечивающий оптимальный режим ее работы с точки зрения потребления топлива, является система ДГ на базе преобразователя частоты (ПЧ) со звеном постоянного напряжения и задатчика экономичного режима работы ДВС (рис. 1), описанная в [2].

Расчет топливной экономичности электростанции на базе ДВС переменной частоты вращения проведен для дизель-генераторной установки переменной частоты вращения (ДГПЧВ) ДГ ДГМА-100МЗ-3 мощностью 95 кВт. В качестве ДВС используется дизель типа К-169МЗ. Расчеты расхода топлива ДВС проводились для нагрузки в диапазоне мощности от 10 до 100 кВт с шагом расчета 10 кВт.

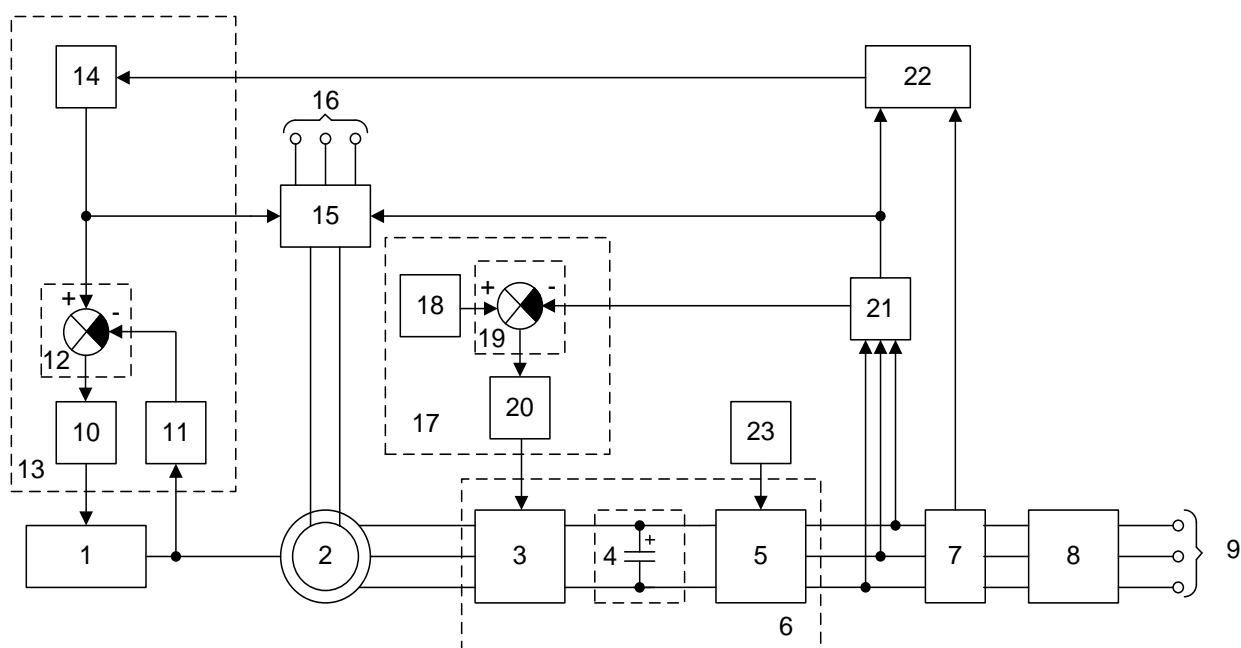


Рис. 1. Функциональная схема системы ДГПЧВ

- 1 – ДВС; 2 – СГ; 3 – управляемый выпрямитель; 4 – конденсаторная батарея;
 5 – инвертор напряжения; 6 – ПЧ; 7 – датчик тока; 8 – повышающий трансформатор;
 9 – выходные выводы; 10 – регулятор частоты вращения вала дизеля; 11 – датчик частоты вращения вала дизеля; 12, 19 – сумматоры; 13 – блок формирования оптимальной частоты вращения вала дизеля; 14 – блок задания экономичной частоты вращения вала дизеля;
 15 – блок возбуждения СГ; 16 – выводы подключения питания блока возбуждения СГ;
 17 – блок стабилизации напряжения; 18 – задатчик напряжения; 20 – регулятор напряжения;
 21 – датчик напряжения; 22 – блок вычисления мощности нагрузки;
 23 – задатчик частоты выходного напряжения

На основании результатов расчета построены сравнительные характери-

стики удельного и абсолютного расхода топлива ДВС в составе электростанции переменной частоты вращения (рис. 2, 3) для двух режимов работы: с регулированием частоты вращения ДВС в зависимости от мощности нагрузки и с постоянной частотой вращения ДВС.

Установлено, что в режиме регулирования скорости ДВС экономия топлива по удельному расходу топлива, измеряемому в г/кВт·ч, меняется от 18,8 до 9,6% при изменении частоты вращения ДВС по сравнению с режимом постоянной частоты вращения ДВС.

По абсолютному расходу топлива, измеряемому в г/ч, экономия топлива в исследуемой электростанции меняется от 37,3 до 15,0% (рис. 2).

Проведенные расчеты показывают высокие энергетические характеристики ДППЧВ с регулированием скорости ДВС в диапазоне малых и средних нагрузок.

Регулирование частоты вращения вала ДВС в зависимости от мощности нагрузки целесообразно осуществлять ступенчато, поскольку это существенно упрощает систему управления ДППЧВ. Произведен расчет влияния ступенчатого регулирования на топливную экономичность ДВС (рис. 4). Из представленных результатов видно, что при переходе от бесступенчатого регулирования к ступенчатому топливная экономичность снижается. В частности, при регулировании в 5 ступеней увеличение потребления топлива, по сравнению с плавным регулированием, составляет от 28 в диапазоне малых нагрузок до 9,4 % в диапазоне максимальной нагрузки.

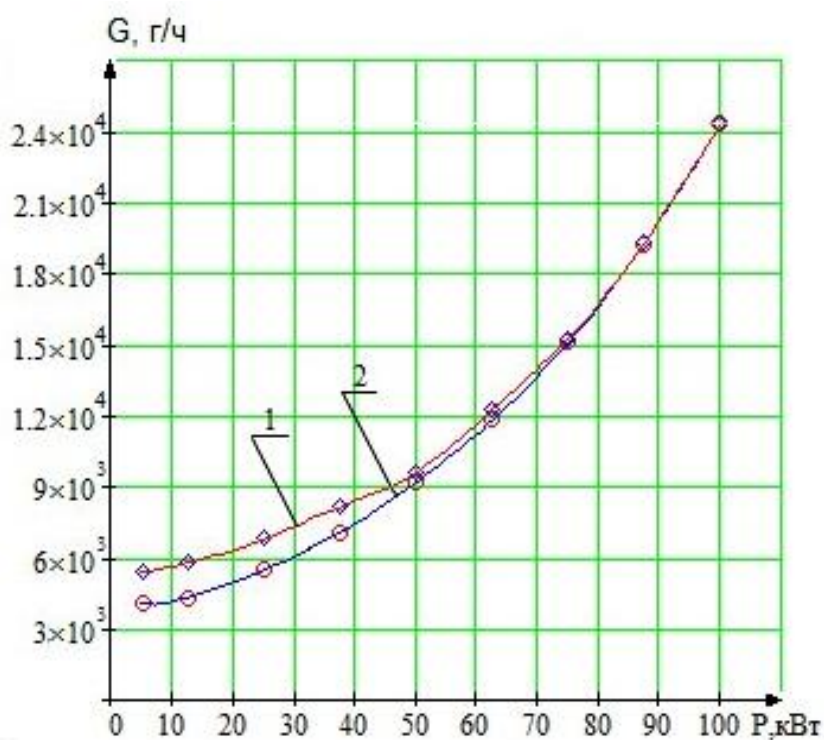


Рис. 2. Зависимость абсолютного расхода топлива ДВС от мощности нагрузки:

- 1 – без регулирования частоты вращения ДВС;
- 2 – с регулированием частоты вращения ДВС

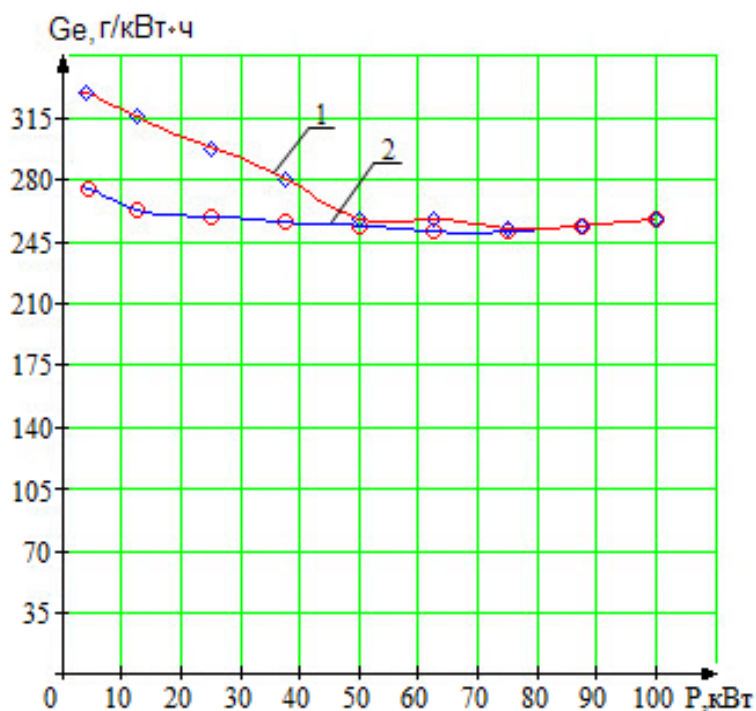


Рис. 3. Зависимость удельного расхода топлива ДВС от мощности нагрузки:
 1 – без регулирования частоты вращения ДВС;
 2 – с регулированием частоты вращения ДВС

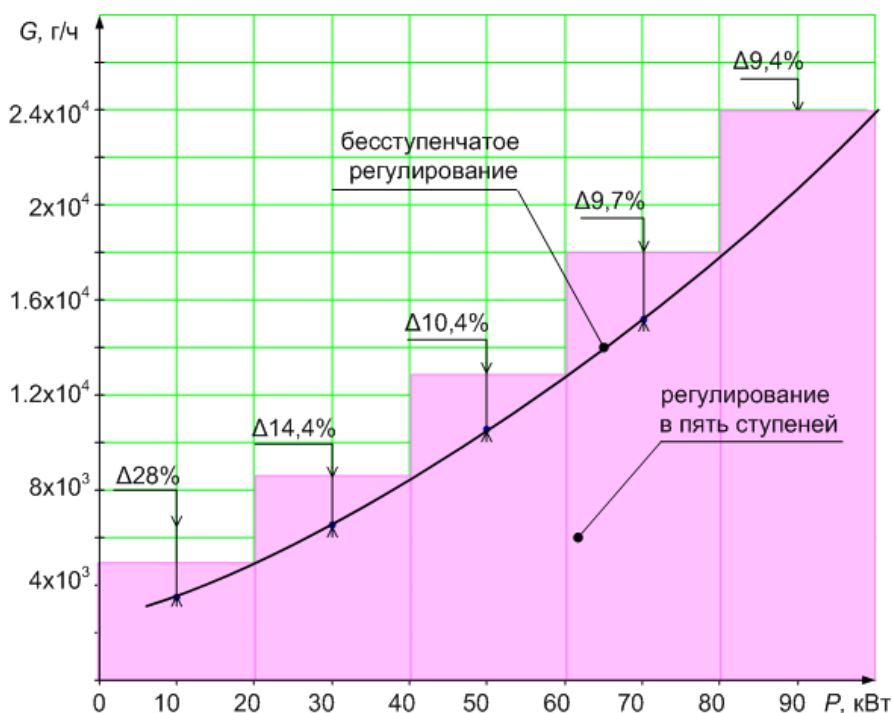


Рис. 4. Сравнительная диаграмма потребления топлива при регулировании скорости в 5 ступеней и бесступенчатом регулировании

Таким образом, ступенчатое регулирование частоты вращения вала ДВС позволит сэкономить топливо и одновременно снизить стоимость всей дизель-генераторной системы. Однако стоимость системы может быть заметно ниже, если

использовать в качестве генератора 2 (рис. 1) машину, генерирующую требуемое напряжение при скоростях 20% от номинальной. Тогда исчезает необходимость в использовании повышающего трансформатора 8, что увеличивает массогабаритные показатели. Более того, можно исключить и преобразователь частоты 6, в состав которой входит конденсаторная батарея 4, если вместо генератора 2 использовать электрическую машину, позволяющую генерировать напряжение фиксированной частоты на каждой ступени регулирования частоты вращения вала ДВС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10026).

Библиографический список

1. **Алешков, О.А.** Повышение топливной экономичности первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима: автореферат дисс. ... канд. техн. наук 05.04.02. АлтГТУ / О.А. Алешков. – Барнаул, 2009. – 16 с.
2. **Поляков, И.С.** Дизель-генераторная установка переменной частоты вращения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / И.С. Поляков; ВГАВТ. – Н. Новгород, 2013. – 155 с.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. СМИРНОВ, Т.Н. УСНУНЦ-КРИГЕР, Е.А. ЕРШОВА

СРАВНЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЯВНОПОЛЮСНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РЕАКТИВНЫМ РОТОРОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Рассматриваются две схемы замещения одного полюсного деления статора двигателя с реактивным ротором, составленные с учётом ответвления потока на краях полюсных наконечников статора только в радиальном направлении и с ответвлением его только в тангенциальном направлении.

На основании сопоставления расчётных и экспериментальных результатов определения момента сделан вывод о большей достоверности схемы с учётом тангенциального потока.

Ключевые слова: реактивный двигатель, шаговый двигатель, синхронная машина, ротор, магнитная цепь.

Two substitution schemes for one pole pitch of stator of the motor with a reluctance rotor are considered in the report. The schemes are made in consideration of magnetic flux branching at the edges of the stator pole tips either in the radial direction or in the tangential direction, respectively.

The comparison of calculated and experimental results of torque determination allows to make a conclusion about the greater reliability of the scheme with the tangential magnetic flux.

Key words: reluctance motor, step motor, synchronous machine, rotor, magnetic circuit.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой двигателей, предназначенных для работы в разомкнутом частотном (шаговом) приводе, является уг-

ловая (статическая). Она представляет собой форму угловой характеристики синхронной машины, которая определяет изменение электромагнитного момента при отклонении угла поворота ротора от оси неподвижного поля статора, созданного при одном из дискретных сочетаний уровней тока в фазах обмотки якоря [1]. За счёт перехода уровней тока в фазах из одного дискретного состояния в другие дискретные состояние осуществляется вращение ротора в шаговом приводе.

Глубокое влияние на момент шаговых двигателей с реактивным, без постоянных магнитов и обмотки, ротором оказывает насыщение, периодически изменяющееся с поворотом ротора. Для учёта влияния неравномерного насыщения на электромагнитный момент выделим в расчётной модели однополюсное деление машины, для которого составим схему замещения магнитной цепи.

Модель магнитной цепи одного полюсного деления двигателя с реактивным ротором может быть представлена элементами, замещающими ферромагнитные участки одного полюса статора и зубца ротора, и воздушные пути для потока, их соединяющего.

Для исследования этого фрагмента магнитной цепи машины воспользуемся методом проводимостей зубцовых контуров [2] и приравняем скалярные магнитные потенциалы ярем статора и ротора, замкнув их внешним магнитопроводом, по схеме замещения (рис. 1). Проводимость ферромагнитных участков магнитной цепи $\Lambda_{Fe}(\Phi)$ на ней составляют последовательно включённые элементы, замещающие полюс статора и зубец ротора. Проводимости элементов ярем статора и ротора считаем бесконечными. Проводимость воздушных путей представлена $\Lambda_{\delta}(\theta)$ соответствующими величинами для магнитного потока, пересекающего зазор и для потока рассеяния. Ярмы статора и ротора относим к внешнему замкнутому магнитопроводу. Их магнитным сопротивлением пренебрегаем.

Такая модель (назовём её униполярной) воспроизводит поле в области неравномерного зазора посредством скалярного магнитного потенциала поверхности зубца (полюса), охваченного контуром с током.

Для определения проводимости зазора $\Lambda_{\delta}(\theta)$ отобразим выделенный фрагмент зубцовой зоны на верхнюю полуплоскость комплексной плоскости t (конформное преобразование). При односторонней зубчатости уравнение конформного преобразования координат [2] может быть записано в виде

$$z = 2 \cdot S \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{a}} \operatorname{arctg} \frac{\eta}{\sqrt{a}} + \frac{1}{2} \ln \frac{1+\eta}{1-\eta} \right], \quad (1)$$

где $\eta = \sqrt{\frac{t-a}{t+1}}$, $a = \left(\frac{\delta}{d}\right)^2$, $S = \frac{\delta}{\pi}$ (δ - воздушный зазор, d - половина ширины от-

крытия паза). Искомая функция $\Lambda_{\delta}(\theta)$ при для ряда отстоящих друг от друга значений угла между осью полюса статора и осью полюса ротора определяется интегрированием (1) по вещественной координате $x = \operatorname{Re}(z)$, отсчитываемой на принимаемой за гладкую поверхности статора. Зубчатость статора учитывается последующей корректировкой найденной кривой посредством эквивалентного зазора, найденного под каждым из пазов статора (левым и правым). С учётом

асимметрии расположения проводов в пазах и приблизительного равенства полюсных делений τ статора и ротора

$$\Lambda_{\delta}(\theta) = \int_0^{\tau} \lambda_p(x) dx - \int_a^{d+X+1,5\delta_{\text{экв}1}} (\lambda_p - \lambda) dx - \int_{\tau-d-1,5\delta_{\text{экв}2}}^{\tau-a} (\lambda_p - \lambda) dx, \quad (2)$$

где a – смещение центра провода зубцового контура от оси паза; x – линейная координата, отсчитываемая вдоль окружности зазора, соответствующая повороту ротора на угол θ ; $\delta_{\text{экв}1}$, $\delta_{\text{экв}2}$ – эквивалентный равномерный зазор под левым и правым проводами зубцового контура, рассчитанные при односторонней зубчатости зазора (при зубчатом роторе).

Для учёта неравномерности насыщения полюсных наконечников статора вдоль окружности зазора выделим в них зоны, которые на схемах замещения в области границ с пазами в отдельные элементы $\lambda_{\text{гр}1}$ и $\lambda_{\text{гр}2}$ (рис. 1). Они являются концентраторами магнитного потока, ответвляющегося с боковых поверхностей полюсов. Предполагаем, что, несмотря на насыщение, сохраняется эквипотенциальность их границ с немагнитными областями.

Графы схем с обозначением номеров узлов показаны на рис. 1, в, г, где номерам ветвей присвоены номера узлов, к которым они направлены. Элементы, замещающие воздушный зазор и пазовое рассеяние отнесены на них к y – ветвям. Элементы дерева (показаны утолщёнными линиями), замещающие ферромагнитные участки статора, ротора и зон проплавления отнесены к z – ветвям.

В соответствии с выбранными положительными направлениями потока в ветвях и контурах, граф схемы замещения (рис. 1, в) узловые и контурная матрицы для z - и y -ветвей первой схемы замещения, имеют следующую структуру (потенциал узла, относящегося к внешне замкнутому магнитопроводу, заземляем)

$$\begin{aligned} \Pi_y = \begin{Bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}; \quad \Pi_z = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{Bmatrix}; \\ P_z = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

где Π_y и Π_z – узловые матрицы для y - и z -ветвей, соответственно, P_z – контурная матрица для z ветвей.

Источник F_m на обеих схемах замещения представлен двумя проводами в основных пазах магнитопровода статора, между которыми расположены два фиктивных дополнительных “паза”, разделяющих полюсный наконечник статора и его зоны $\lambda_{\text{гр}1}$ и $\lambda_{\text{гр}2}$ в области границ с пазами. Правый, по схемам замещения, паз, охваченный внешнезамкнутым магнитопроводом с контурным потоком четвёртого контура, является общим для статора и ротора. При таком описании пазовых токов матрица преобразования токов ветви к токам пазов приобретает структуру

$$G^T = [2 \ 0 \ 0 \ -2], \quad (4)$$

(T – знак транспонирования), а матрица преобразования токов пазов к токам зубцовых контуров

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Узловые и контурная матрицы, аналогичные матрицам (3), для второй схемы замещения имеют вид (6) (проводимости для потока через границы зон полюсных наконечников вынесены в z -ветви).

$$\Pi_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Pi_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

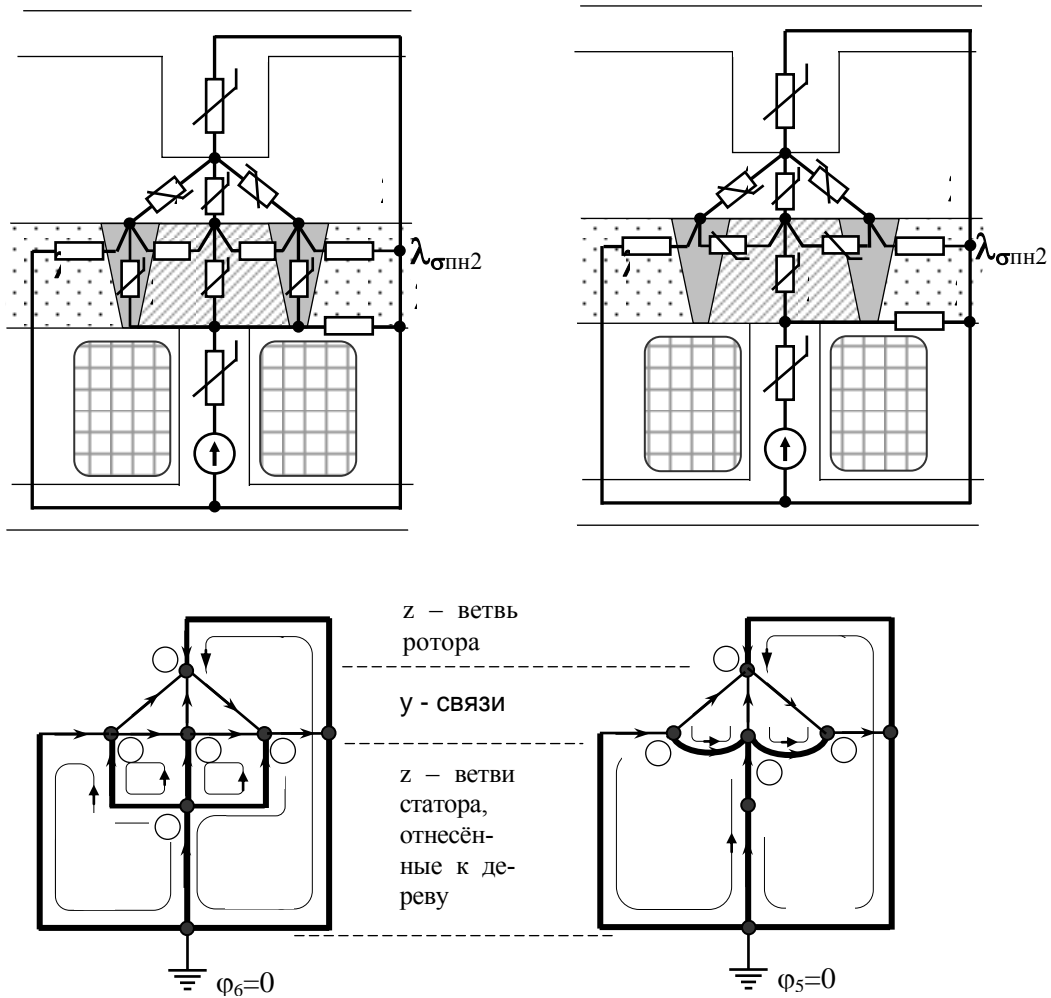


Рис. 1. Схемы замещения одного периода дискретной структуры (а, б) и графы схем замещения (дерево и связанные y -ветви) униполярной модели двигателя с реактивным ротором

После определения скалярных магнитных потенциалов узлов $\Phi_1 - \Phi_4$ посредством итерационных процедур расчёта магнитной цепи, при каждом угловом положении ротора и токе отыскивается электромагнитный момент $M_{\text{э}}$:

$$M_{\text{э}} = \frac{1}{2} \cdot [\varphi]^T \cdot \left[\frac{d\Lambda}{d\theta} \right] \cdot [\varphi], \quad (7)$$

где $\left[\frac{d\Lambda}{d\theta} \right]$ – матрица производных проводимостей у-ветвей в схемах замещения рис. 1 по углу поворота ротора. Нелинейные магнитные сопротивления в этих схемах определялись по предварительно рассчитанным кривым намагничивания соответствующих участков. Лучшую сходимость расчётных и экспериментальных результатов (рис. 2) обеспечивает расчёт по второй из исследованных схем замещения, в соответствии с которой учитывается преимущественно тангенциальное направление потока в участках полюсных наконечников статора, отделяющих их от междупазового пространства.

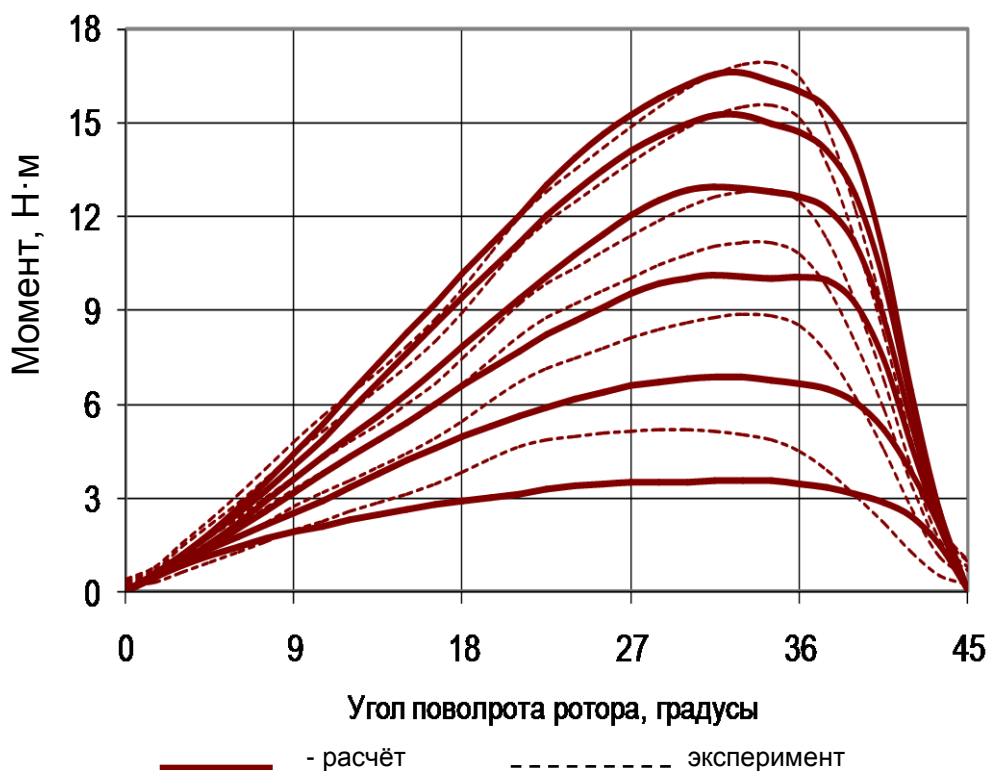


Рис. 2. Статические характеристики шагового двигателя с реактивным ротором

Данный вывод, важный при проведении упрощённых поверочных расчётов синхронных двигателей с реактивным ротором, можно распространить на все машины с зубчатым ротором без обмотки, с относительно протяжённым, по отношению к воздушному зазору, полюсным делением статора и зубцовым делением ротора, составляющим от 80 единиц и более.

Библиографический список

1. **Смирнов, А.Ю.** Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): учеб. пособие для вузов / А.Ю. Смирнов. – М.: Изд-во Форум, – 2015. – 192 с.
2. Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах/ А.В. Иванов-Смоленский, Ю.И. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов; под ред. А.В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.

УДК 621.314

О.С. ХВАТОВ, А.Б. ДАРЬЕНКОВ, И.С. САМОЯВЧЕВ

**ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ
ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ПЕРЕМЕННОЙ
ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Волжский государственный университет водного транспорта

Обоснована актуальность разработки и исследования электростанций транспортных объектов с электродвижением на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения.

Приведено описание функциональной и структурной схем единой электростанции судна на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения. Описана методика расчета коэффициента полезного действия рассматриваемой единой электростанции. Приведены результаты расчета топливной экономичности единой электростанции мощностью 100 кВт.

Ключевые слова: единая электростанция, электродвижение, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения.

The urgency of research and development electric power stations with electric propulsion based on a variable speed diesel generator sets.

The description of the functional and structural schemes of unified electric power station of ship based on a variable speed diesel generator set. A technique for calculating the efficiency of the considered unified electric power station. The results of the calculation of fuel efficiency unified electric power station output of 100 kW.

Key words: unified electric power station, electric propulsion, variable speed diesel generator set.

На водном, автомобильном и железнодорожном транспорте все большее распространение получают системы электродвижения. При этом тяговые (гребные) электродвигатели могут питаться вместе с другими потребителями от единой электростанции автономного объекта (ЕЭС). Применение ЕЭС позволяет повысить надежность и упростить обслуживание энергосистемы автономного

объекта за счет уменьшения количества составляющих ее компонентов. В качестве первичных двигателей ЭЭС широко используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

Как правило, ЭЭС строится на базе дизель-генераторных установок (ДГУ) постоянной частоты вращения. Повышение экономичности электростанции возможно за счет применения ДГУ переменной частоты вращения. Экономия топлива достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной частоты вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива [1].

Исследование и разработка ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения является относительно новым техническим направлением в малой энергетике. Работы в данной области проводят ряд известных зарубежных фирм (Fubag, Honda, Hyundai, Kupor, ABB, Wartsila и др.). Известны исследования по данной тематике и в России – ОАО «НТЦ ФСК ЭЭС» (г. Москва), ОАО "Звезда" (г. Санкт-Петербург), ОАО "Сигма" (г. Ковров), ВГАВТ и НГТУ (г. Н.Новгород). Перечень отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных данной тематике достаточно мал. Анализ показал, что особенно это относится к исследованиям динамических режимов работы, разработке математической модели ЭЭС с системой электродвижения на базе ДГУ переменной частоты вращения, синтезу систем регулирования каналов электродвижения, электроснабжения, расчету топливной экономичности ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения.

Предложена концепция построения электростанций транспортных объектов с электродвижением на базе ДГУ, отличающихся повышенной топливной экономичностью, которая достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной частоты вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива [2].

Разработана структура ЭЭС транспортного объекта (судна) на базе ДГУ переменной частоты вращения, защищенная патентом на изобретение РФ (рис. 1) [3]. ЭЭС построена на базе ДВС 1, приводящего во вращение синхронный генератор (СГ) 2. Гребной винт 6 приводится во вращение синхронным двигателем (СД) 5. Система работает следующим образом. Блок 14 формирования оптимальной частоты вращения (БОЧ) ДВС 1 задает частоту вращения вала, оптимальную с точки зрения потребления топлива. Блок 14 формирует выходной сигнал, согласно заложенной в его памяти многопараметровой характеристике ДВС, в зависимости от выходных сигналов блока 15 вычисления мощности нагрузки (БМН) и датчика 8 частоты вращения ДВС. Многопараметровая характеристика представляет собой зависимость эффективной мощности ДВС от частоты вращения вала дизеля при наименьшем удельном расходе топлива. Блок 15 определяет мощность нагрузки на основе сигналов от датчиков тока 9, 10 и датчиков напряжения 11, 12.

В соответствии с требуемой скоростью движения судна, задатчик частоты 16 формирует сигнал задания частоты выходного напряжения преобразователя частоты (ПЧ) 3, и, тем самым, определяет скорость вращения гребного электро-

двигателя 5. Блок регулирования частоты 17 формирует сигнал управления частотой ПЧ 3 на основе сигналов от задатчика частоты 16 и датчика 13 частоты вращения гребного электродвигателя.

Таким образом, ПЧ 3 является согласующим элементом между СД 5 и СГ 2, работающими с разными частотами вращения. Для питания электропотребителей судна на выходе СГ включен ПЧ 4, который обеспечивает стабильные значения амплитуды и частоты напряжения бортовой сети. Таким образом, ЕЭС можно условно разделить на два канала: электродвижения и электроснабжения.

Наиболее экономичная частота вращения вала ДВС может быть определена по его универсальной (многопараметровой) характеристике.

Для исследования динамических режимов, разработана математическая модель ЕЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения [4].

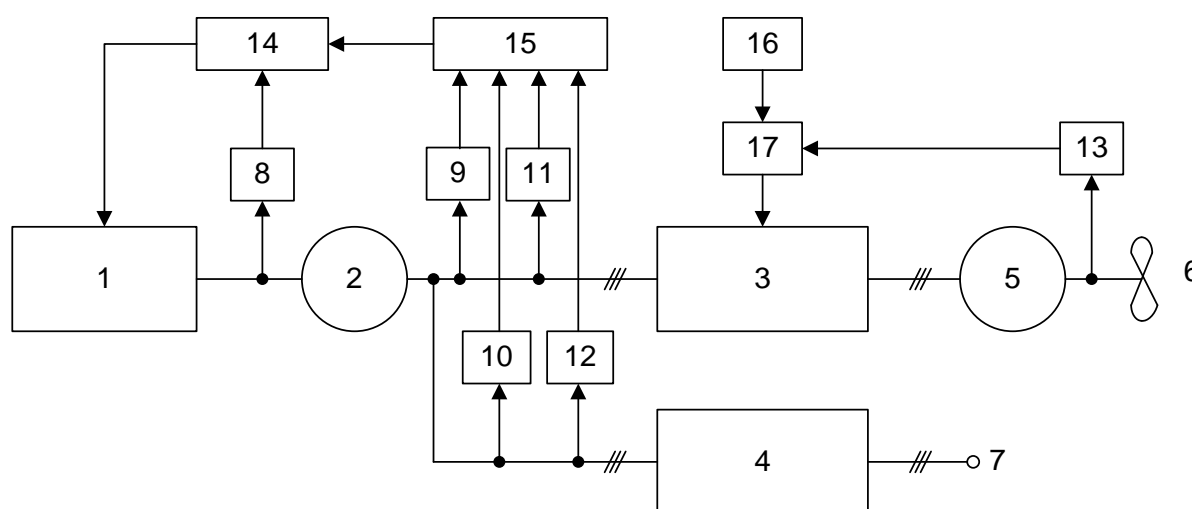


Рис. 1. ЕЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения:

1 – ДВС; 2 – синхронный генератор; 3, 4 – преобразователи частоты; 5 – гребной синхронный двигатель; 6 – гребной винт; 7 – выходы для подключения потребителей судовой сети; 8 – датчик частоты вращения ДВС; 9, 10 – датчики тока; 11, 12 – датчики напряжения; 13 – датчик частоты вращения гребного винта; 14 – блок формирования оптимальной частоты вращения; 15 – блок вычисления мощности нагрузки; 16 – задатчик частоты; 17 – блок регулирования частоты

На основе математической модели разработана структурная схема ЕЭС транспортного объекта (на примере судна) с электродвижением на базе ДГУ переменной частоты вращения. На рис. 2 представлена структурная схема канала электродвижения вышеуказанной ЕЭС.

На основе математической модели и структурной схемы в программном пакете MatLab Simulink разработаны имитационные модели, позволяющие производить анализ динамических режимов работы каналов электродвижения и электроснабжения ЕЭС с учетом величины и характера нагрузки, а также формируемой с целью оптимизации расхода топлива скоростной характеристикой дизеля [5].

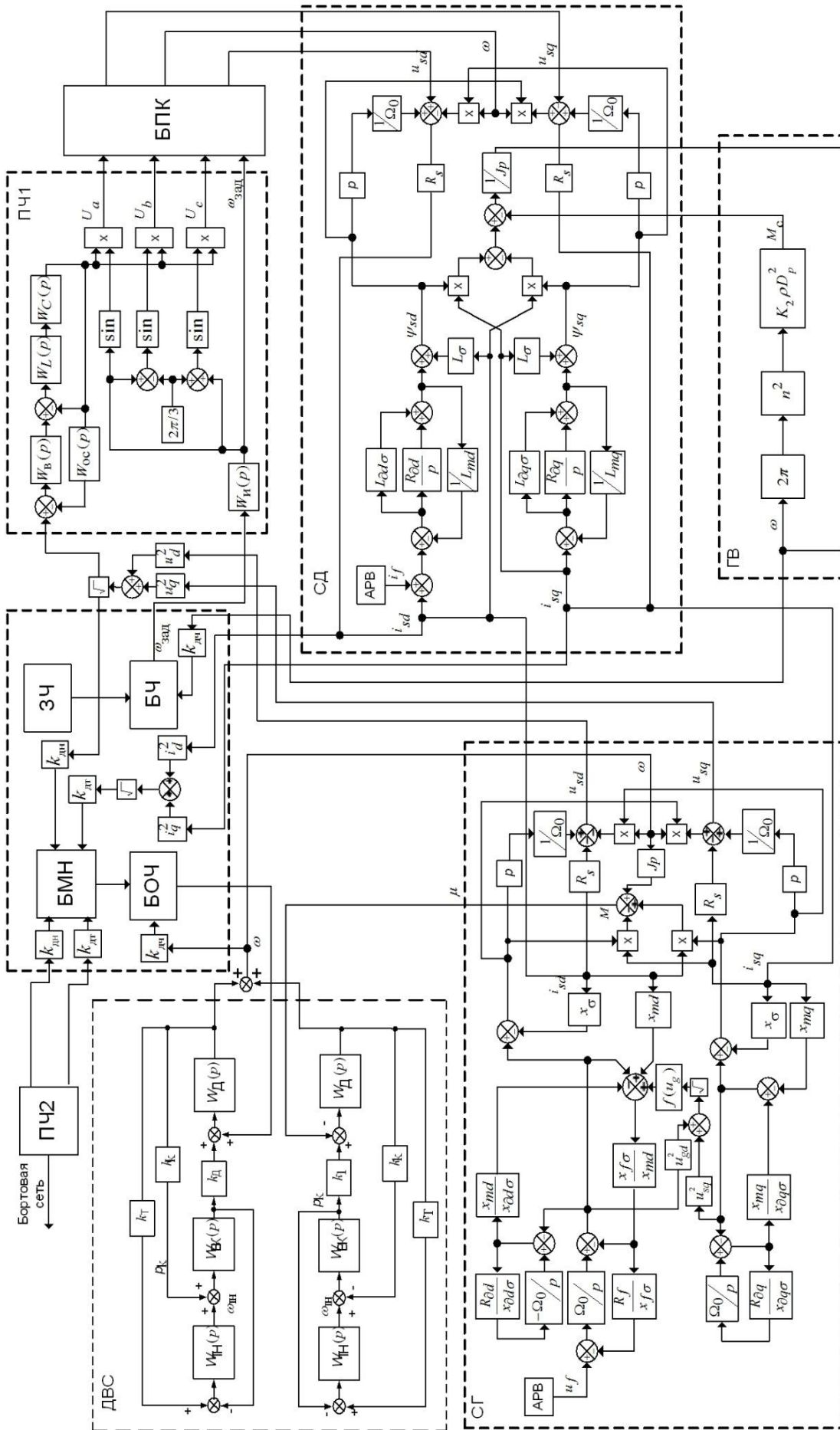


Рис. 2. Структурная схема канала электропривода БЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения:
 W_в(p), W_{ос}(p), W_L(p), W_C(p), W_и(p) – передаточные функции выпрямителя ПЧ, обратной связи, индуктивности и емкости фильтра, инвертора, АРВ, ПЧ2, ГВ – соответственно, автоматический регулятор возбуждения, преобразователи частоты, гребной винт; ω_{зад}, M_c – заданная частота вращения СД, момент сопротивления на валу СД

На основе разработанной имитационной модели, произведен сравнительный анализ результатов моделирования режимов плавного пуска гребного электродвигателя канала электродвижения для ЭЭС мощностного ряда 85-200-500-700-1000 кВт по линейной, S-образной и экспоненциальной характеристикам. Установлено, что наименьшие колебания электромагнитного момента M_{\max} и длительность пуска $t_{\text{пуск}}$ соответствуют S-образной пусковой характеристике гребного электродвигателя.

Произведено моделирование режимов наброса и сброса нагрузки в канале электродвижения для ЭЭС мощностного ряда 85-200-500-700-1000 кВт.

Например, для ЭЭС мощностью 500 кВт максимальная амплитуда колебаний электромагнитного момента при сбросе нагрузки до $M_c=0$ (оголение винта) достигает 1,7 о.е. Также проведено моделирование режимов наброса и сброса нагрузки в канале электроснабжения ЭЭС.

Разработана методика расчета коэффициента полезного действия ЭЭС автономного объекта с электродвижением на базе ДГУ переменной частоты вращения [6, 7].

При изменении мощности нагрузки ЭЭС происходит изменение частоты вращения вала ДВС, момента на его валу, соответственно меняется частота вращения ротора генератора, частота и амплитуда генерируемого напряжения, частота и амплитуда напряжения на входе и выходе (для канала электродвижения) преобразователя частоты, трансформатора, частота и амплитуда питающего напряжения, частота вращения ротора, момент на валу гребного (тягового) двигателя, а также мощность, потребляемая бортовой сетью автономного объекта. Таким образом, методика расчета должна учитывать изменение всех перечисленных параметров.

Каждому значению частоты вращения гребного винта (колеса) соответствует определенный момент и мощность нагрузки на валу гребного (тягового) двигателя. Гребной (тяговый) двигатель является нагрузкой для трансформатора (Тр). ПЧ является нагрузкой для СГ. Согласно разработанной методике, рассчитывается общий КПД цепи СГ - ПЧ - Тр - СД. Алгоритм расчета КПД учитывает, что элементы электрооборудования, входящие в состав ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения (СГ, СД, Тр, ПЧ) работают при переменной частоте и амплитуде напряжения. Расход топлива ДВС при конкретных значениях мощности нагрузки и частоты вращения вала определяется по многопараметровым характеристикам ДВС.

Разработана методика расчета КПД (потерь мощности) синхронной машины, преобразователя частоты и трансформатора при переменных мощности нагрузки и частоте напряжения. Построены графики зависимостей КПД от частоты напряжения для синхронной машины (СМ), трансформатора и ПЧ.

Произведен расчет коэффициента полезного действия СМ в пакете MathCad. В расчете учитывается закон регулирования $U/f = \text{const}$, т.е. при снижении частоты напряжения, амплитуда напряжения также будет снижаться. На рис. 6, 7 представлены графики зависимости КПД от частоты напряжения и потребляемой мощности для синхронных машин МСК91-4 ($P_n=75\text{кВт}$, $n=1500\text{ мин}^{-1}$), МСК1250-

1500 ($P_n=1000$ кВт, $n=1500$ мин⁻¹). Кривые соответствуют определенным мощностям $P_1 = 0,25, 0,5, 0,75, 1 P_n$. Графики отражают зависимость КПД от частоты напряжения при переменных амплитуде напряжении, токе и постоянной мощности нагрузки. Так как расчет произведен для кривых соответствующих определенной, постоянной мощности нагрузки, при снижении частоты и амплитуды напряжения, ток будет обратно пропорционально увеличиваться.

Таким образом, для кривой соответствующей номинальной мощности ($P_1 = P_n$), при номинальной частоте напряжения $f=50$ Гц, напряжение и ток статора соответствуют номинальным значениям $U=U_n, I=I_n$, при снижении частоты до $f=40$ Гц, $U=0,8*U_n, I=I_n/0,8=1,25*I_n$. При превышении номинального значения тока, нагрев электрической машины превышает максимально допустимый для длительного режима работы. Графики зависимости КПД (рис. 3, 4) ограничены кривой соответствующей току статора $I=1,25*I_n$.

С помощью разработанной методики, произведен расчет топливной экономичности ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения на примере ЭЭС мощностью 100 и 1000 кВт. На основании результатов расчета, построены сравнительные характеристики удельного и абсолютного расходов топлива для двух режимов работы: с регулированием частоты вращения ДГУ в зависимости от мощности нагрузки и с постоянной частотой вращения ДГУ. Например, для ЭЭС мощностью 100 кВт экономия топлива достигает 31% по абсолютному расходу.

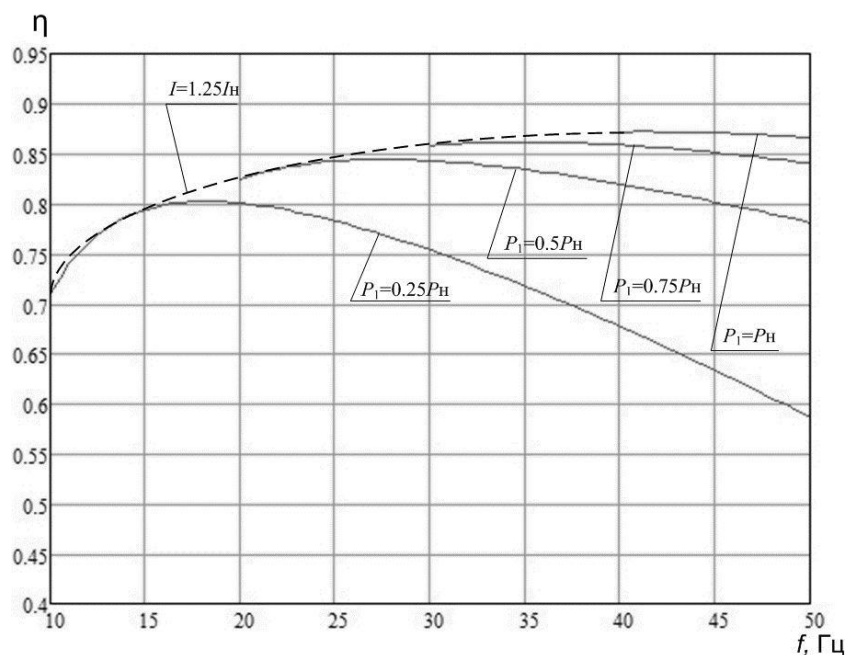


Рис. 3. Зависимость КПД СМ МСК91-4 η от частоты f питающего напряжения при переменной мощности P_1

Применение ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения позволяет добиться существенной экономии топлива, что является крайне важным показателем в современных условиях растущих цен на энергоносители и повышающихся требованиях к снижению уровня вредных выбросов в атмосферу. Обеспечение оптимального режима ДВС требует нового подхода к управлению

топливоподачей, который возможно реализовать на базе интеллектуальной системы управления нейросетевого типа [8].

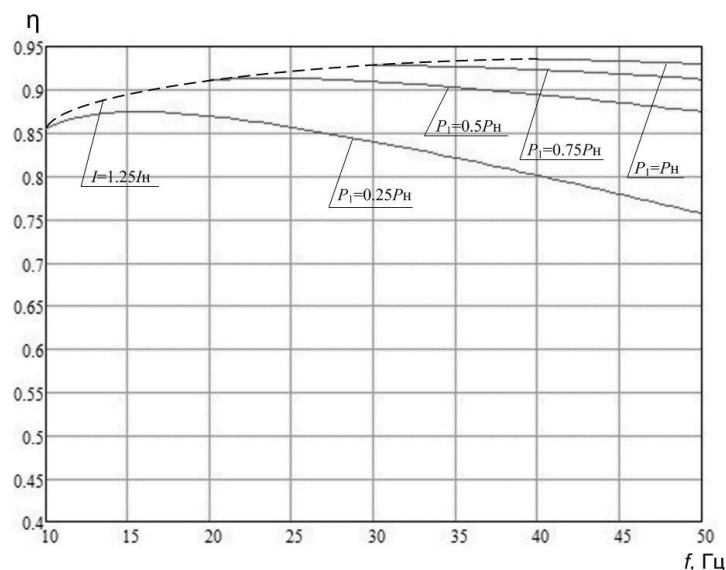


Рис. 4. Зависимость КПД СМ МСК1250-1500 η от частоты f питающего напряжения при переменной мощности P_1

Библиографический список

1. Дарьенков, А.Б. Автономная высокоэффективная электрогенерирующая станция / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Труды Нижегородского государственного технического университета. – Н. Новгород, 2009. Т. 77. С. 68–72.
2. Самоявчев, И.С. Единая электростанция автономного объекта на базе ДВС переменной частоты вращения / И.С. Самоявчев, О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков / Тезисы докладов IX Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ. Н. Новгород, 2010. С. 62–63.
3. Пат. на изобретение № 2436691, В60L 11/08, В60W 20/00, В60W 10/08. Система электродвижения автономного объекта / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, И.С. Самоявчев // Опубликовано Бюл. № 35, 20.12.2011.
4. Хватов, С.В. Математическая модель единой электростанции автономного объекта на базе ДВС с переменной скоростью вращения. / С.В. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, О.С.Хватов // Материалы научно-технической конференции Актуальные проблемы электроэнергетики / НГТУ. Н.Новгород. 2010. С. 58–63.
5. Хватов, О.С. Имитационная модель единой судовой электростанции на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Вестник Ивановского государственного технического университета. – Иваново. 2011. №4. С. 50–54.
6. Хватов, О.С. Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Эксплуатация морского транспорта. – СПб. 2013. №1(71). С. 47–50.
7. Хватов, О.С. Оценка топливной экономичности в единых электростанциях автономных объектов на базе двигателей внутреннего сгорания переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. №3.
8. Хватов, О.С. Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Ч. 4. –Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 126–131.

УДК 621.314

А.Н. КУЗМЕНКОВ, В.Г. ТИТОВ, Г.М. МИРЯСОВ

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Цель: разработка трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником газового нагнетателя мощностью 16 МВт.

Методология проведения работы: для расчета регуляторов используется метод передаточных функций. Анализ переходных процессов в трехконтурной системе управления проводился в программном комплексе MatlabSimulink.

Результаты: в результате моделирования системы управления электромагнитным подшипником получены переходные процессы по управляющему и возмущающему воздействиям.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, система автоматического управления, имитационное моделирование, пропорционально-интегральный регулятор.

Purpose: construction of the three-loop control system of the electromagnetic bearing for gasblower with the capacity of 16 MW.

The methodology of the work: to calculate the regulators used the method of transfer functions. Analysis of the transition process of a three-loop control system was performed in the software package «Matlab Simulink».

Results: the results of modeling of electromagnetic bearing control system transients obtained by to a step change at the input. and a step change a disturbance input

Key words: electromagnetic bearings, automatic control system, simulation, a proportional-integral controller.

Известны различные подходы к построению систем управления электромагнитным подвесом ротора. Возможна реализация одно- [1], двух- [2] или трехконтурной систем управления.

В любом случае при создании систем управления электромагнитным подвесом ротора преследуется цель обеспечения высокого быстродействия, точности поддержания в центральном положении ротора машины, демпфирования возможных вибраций. Отличительная особенность электромагнитного подшипника как объекта управления заключается в колебательном характере переходных процессов, наличии положительной обратной связи по перемещению и нелинейности [2].

Синтез трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником проводится по принципу системы подчиненного регулирования координат. Применение такого подхода требует выделения в объекте управления ряда координат (положение, скорость, ток), по которым будут замкнуты соответствующие контуры регулирования. Структурная схема системы управления представлена на рис. 1.

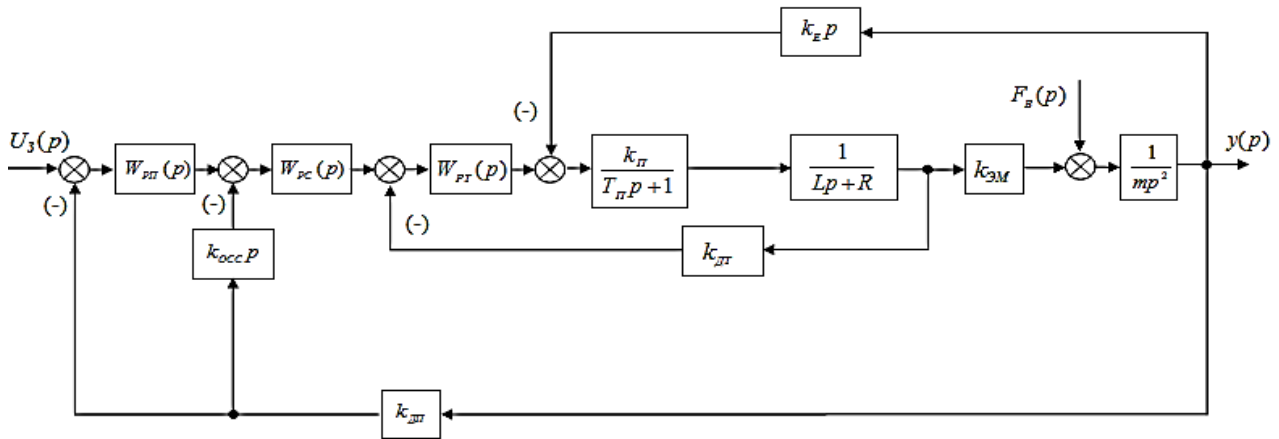


Рис. 1. Структурная схема трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

Разработка системы управления начинается с внутреннего контура регулирования тока питания электромагнитов, структура которого представлена на рис. 2.

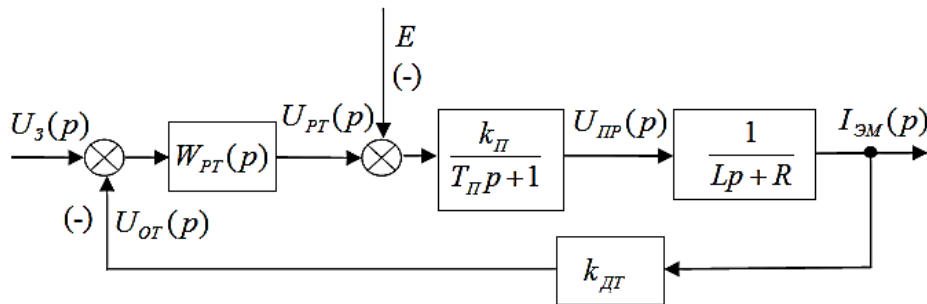


Рис. 2. Структурная схема внутреннего контура тока

Регулятор тока должен компенсировать большую постоянную времени $T_{\text{Э}} = L/R$. При рассмотрении процессов во внутреннем контуре тока, не учитывается влияние ЭДС, наводимой в обмотках электромагнитов при движении ротора.

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования тока при настройке на модульный оптимум

$$W_{\text{ркт}}(p) = \frac{W_{\text{РТ}}(p) \cdot \frac{k_{\text{П}}}{T_{\text{П}} + 1} \cdot k_{\text{ДТ}}}{[L \cdot p + r]},$$

где $T_{\text{П}}$ – постоянная времени преобразователя; $k_{\text{П}}$ – коэффициент передачи силового преобразователя; $k_{\text{ДТ}}$ – коэффициент передачи датчика тока; L, r – индуктивность и активное сопротивление магнитного подшипника.

Следовательно, передаточная функция регулятора тока, придающего модульный оптимум замкнутому контуру тока, имеет вид

$$W_{\text{РТ}}(p) = \frac{[L \cdot p + r]}{2 \cdot k_{\text{П}} \cdot k_{\text{ДТ}} \cdot T_{\mu} \cdot p}.$$

Таким образом, в качестве регулятора тока в системе подчиненного регу-

лирования электромагнитного подвеса ротора должен быть использован пропорционально-интегральный регулятор с коэффициентом усиления

$$k_{PT} = \frac{L}{2 \cdot k_{\Pi} \cdot k_{ДТ} \cdot T_{\mu}}$$

и постоянной времени интегрирования.

$$T_{и} = \frac{r}{2 \cdot k_{\Pi} \cdot k_{ДТ} \cdot T_{\mu}}$$

Техническая реализация пропорционально-интегрального регулятора возможна как средствами аналогового операционного усилителя, так и программно на микропроцессорном устройстве. Для анализа переходных процессов построена компьютерная модель внутреннего контура тока с ПИ-регулятором (рис. 2).

Параметры компьютерной модели контура тока: $U_3=1$ В; $k_{PT}=113,6$; $T_{и}=5000$ с; $k_{\Pi}=22$; $T_{\Pi}=0,0001$ с; $L=0,05$ Гн; $r=2,2$ Ом.

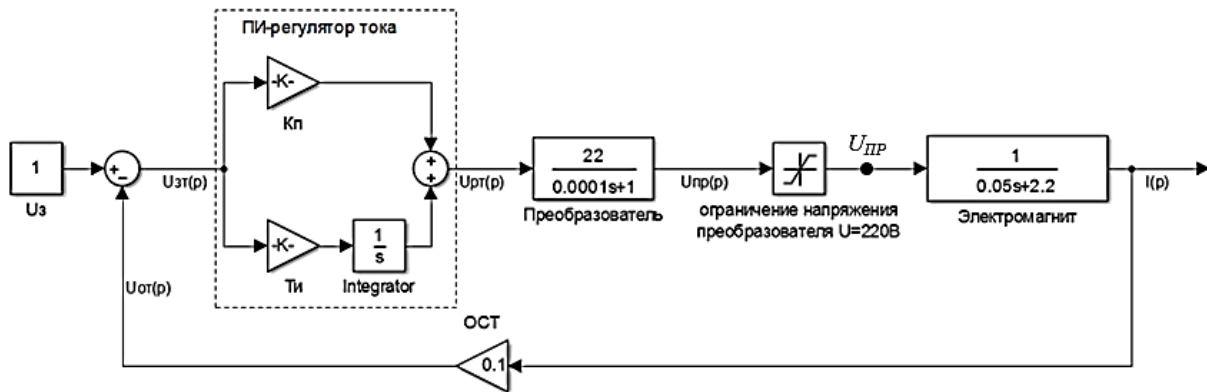


Рис. 3. Компьютерная модель контура тока с ПИ-регулятором

Получены следующие результаты моделирования: переходные процессы тока и напряжения во внутреннем контуре тока (рис. 4, 5).

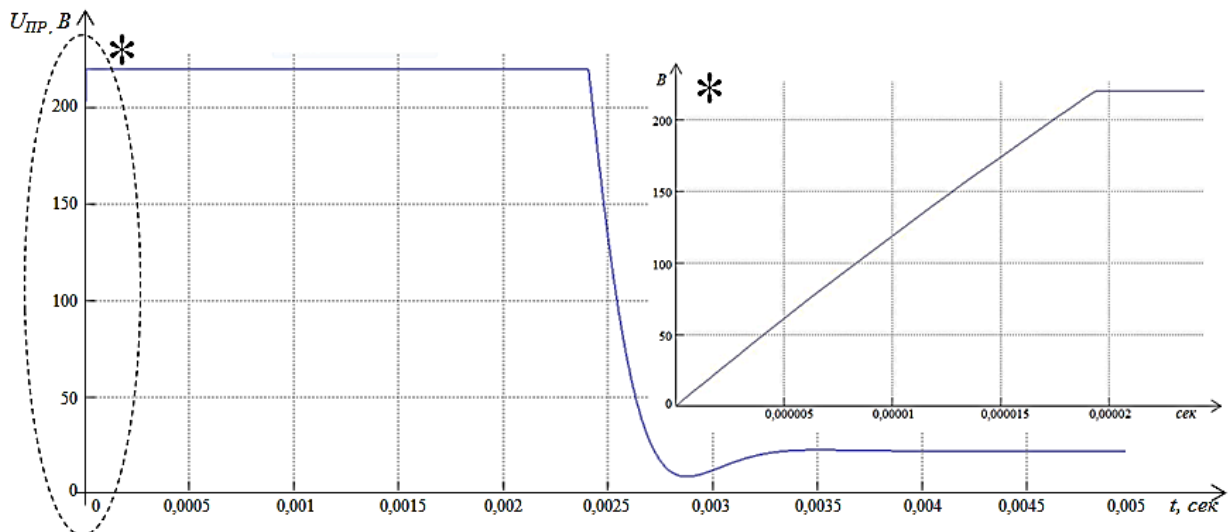


Рис. 4. График изменения напряжения силового преобразователя (установлено ограничение выходного напряжения преобразователя $U=220$ В)

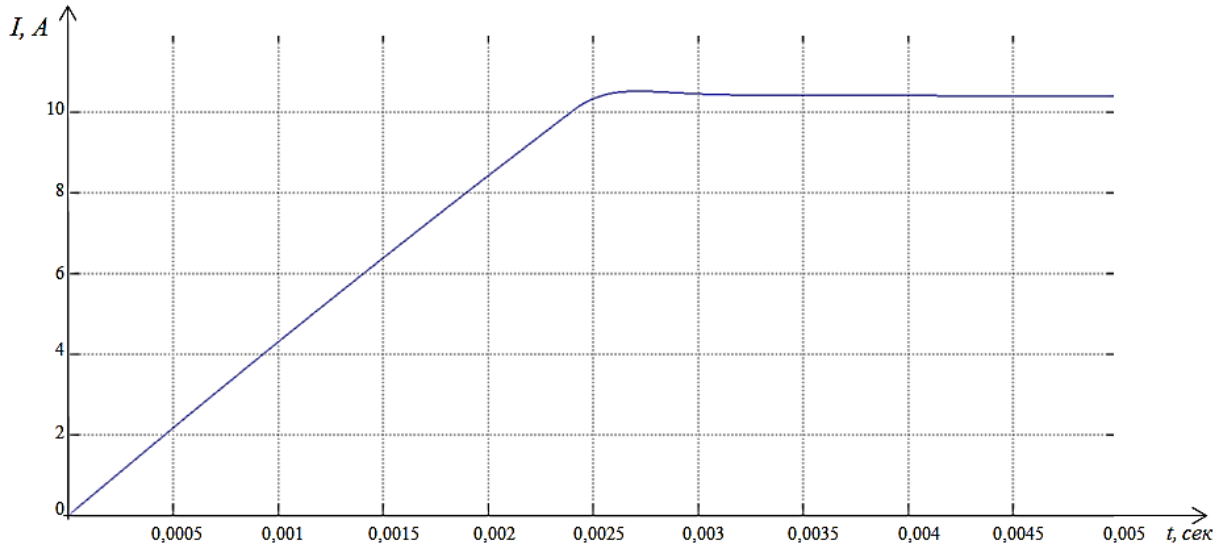


Рис. 5. График изменения тока в системе с ПИ-регулятором

С пропорционально-интегральным регулятором контур тока является астатическим как по заданию, так и по возмущению. Перерегулирование при оптимизации на модульный оптимум составляет 4.3% (рис. 5).

Следующим шагом является оптимизация контура скорости. Для синтеза регулятора скорости передаточная функция внутреннего замкнутого контура тока имеет вид

$$W_{зкт}(p) = \frac{1}{k_{дт} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)} = \frac{1}{k_{дт} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}.$$

Для выделения сигнала обратной связи по скорости перемещения дифференцируется сигнал датчика положения ротора и вводится в систему с коэффициентом передачи $k_{осс} = 1$ [2]. Передаточная функция разомкнутого контура скорости имеет вид

$$W_{ркс}(p) = \frac{W_{рс} \cdot k_{эм} \cdot k_{осс} \cdot p}{k_{дт} \cdot m \cdot p^2 \cdot (2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)},$$

тогда передаточная функция регулятора скорости, придающего модульный оптимум замкнутому контуру скорости:

$$W_{рс}(p) = \frac{k_{дт} \cdot m \cdot p^2 \cdot (2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}{k_{эм} \cdot k_{осс} \cdot p \cdot 2 \cdot T_{\mu 2} \cdot p \cdot (T_{\mu 2} \cdot p + 1)}.$$

Следовательно, для настройки контура скорости на модульный оптимум требуется пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи

$$k_{рс} = \frac{k_{дт} \cdot m}{k_{эм} \cdot k_{осс} \cdot 2 \cdot T_{\mu 2}}.$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости для настройки внешнего контура положения имеет вид

$$W_{зкc}(p) = \frac{1}{k_{occ} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\mu 2}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu 2} \cdot p + 1)} = \frac{1}{k_{occ} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\mu 2} \cdot p + 1)}$$

В качестве датчика обратной связи во внешнем контуре положения будет использоваться бесконтактный датчик с коэффициентом передачи $k_{дп}$, измеряющий положение ротора в поле электромагнитов. Передаточная функция разомкнутого контура положения при настройке на модульный оптимум имеет вид

$$W_{pкп}(p) = \frac{W_{рп} \cdot k_{п}}{k_{occ} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\mu 2} \cdot p + 1)},$$

соответственно передаточная функция регулятора положения, придающего модульный оптимум замкнутому контуру положения:

$$W_{рп}(p) = \frac{k_{occ} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\mu 2} \cdot p + 1)}{k_{п} \cdot 2 \cdot T_{\mu 3} \cdot p \cdot (T_{\mu 3} \cdot p + 1)}$$

Следовательно, для настройки контура положения ротора на модульный оптимум требуется пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи

$$k_{рп} = \frac{k_{occ}}{k_{п} \cdot 8 \cdot T_{\mu}}$$

Проведено моделирование системы управления в программной среде Matlab Simulink, анализ переходного процесса показал, что система управления электромагнитным подвесом обладает статической ошибкой в поддержании ротора в определенном положении. Для исключения этого недостатка необходимо ввести интегрирующее звено в контур положения. Преобразованная структурная схема системы управления представлена на рис. 6.

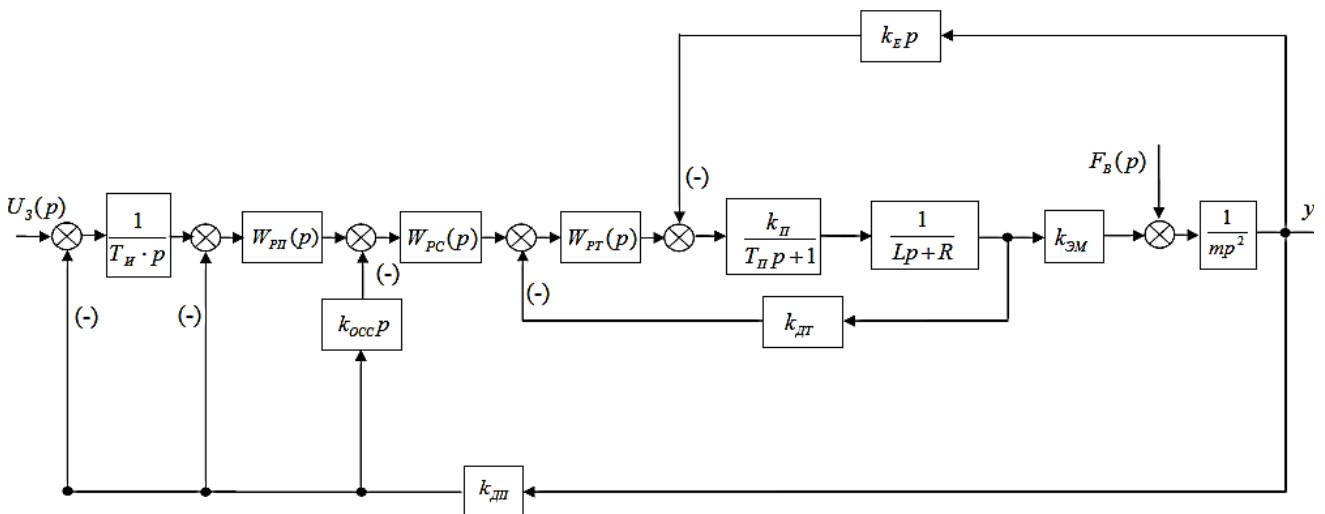


Рис. 6. Структурная схема трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником с интегральной частью во внешнем контуре положения

Система управления содержит интегральный регулятор с постоянной интегрирования $T_I=8 \cdot T_\mu$ во внешнем контуре, который исключает статическую ошибку, возникающую в системе при внешнем воздействии. Проведено моделирование системы управления в программной среде Matlab Simulink. Компьютерная модель трехконтурной системы управления представлена на рис. 7, рассчитаны параметры компьютерной модели для газового нагнетателя перекачивающей станции «Помарская»: мощность нагнетателя 16 мВт; масса ротора $m=1000$ кг; $U_3=1В$; $k_{рП}= 0,025$; $k_{рС}=20$; $k_{рТ}=113,6$; $T_I=5000$ с; $k_{П}=22$; $T_{П}=0,0001с$; $L=0,05Гн$; $r=2,2$ Ом; $m=1000$ кг; $k_{ЭМ}=12500Н \cdot А$; $k_E=12,5В \cdot с/м$; $k_F=3125000000Н/м$;

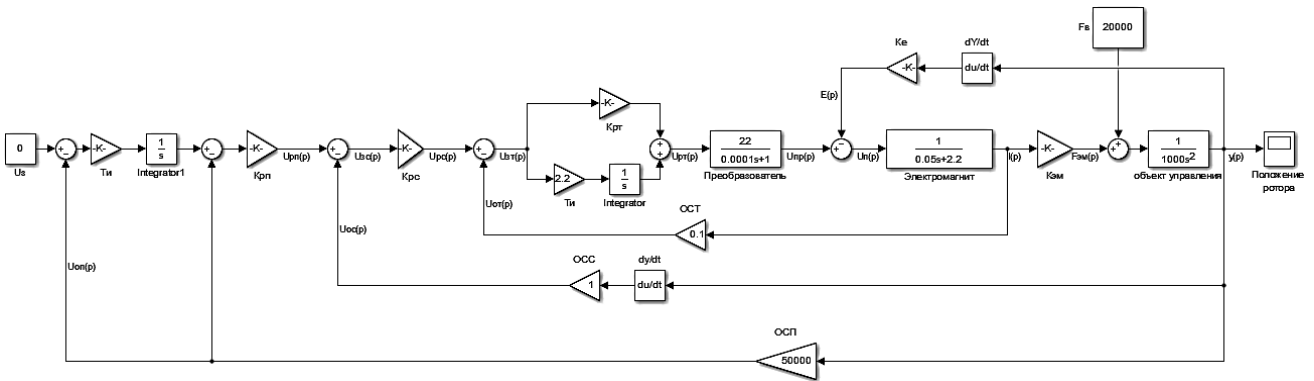


Рис. 7. Компьютерная модель трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником с интегральной частью во внешнем контуре положения

При выбранных параметрах электромагнитов, преобразователя и регуляторов переходный процесс перемещения ротора в поле электромагнитов будет иметь вид, представленный на рис. 7, 8.

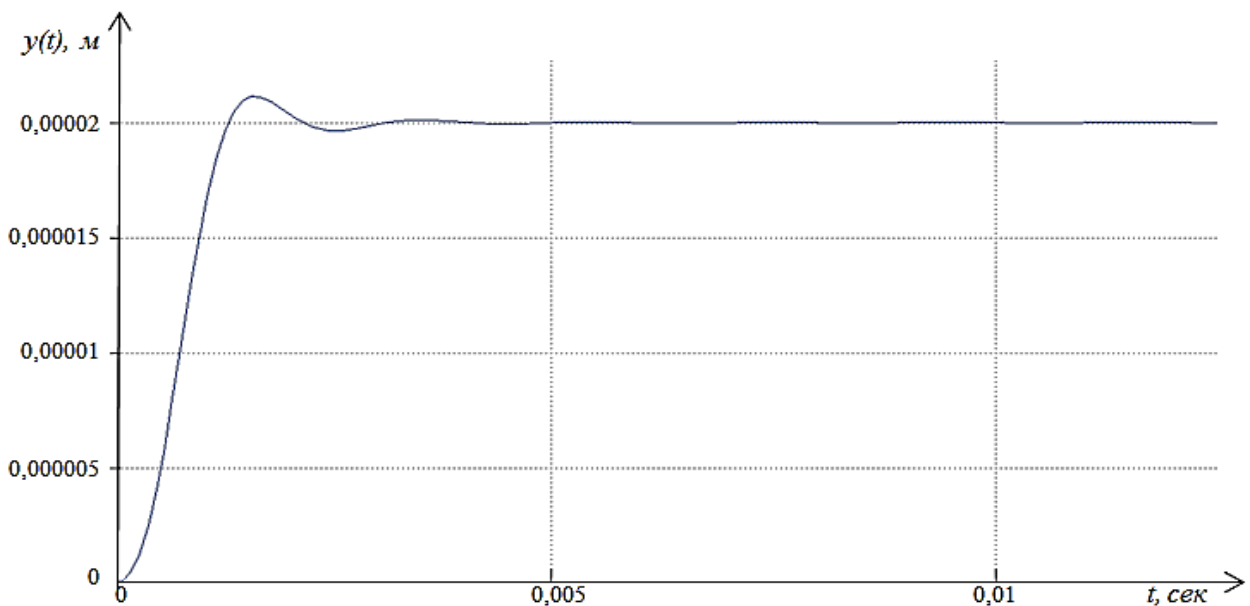


Рис. 8. График переходного процесса по управляющему воздействию при единичном задании

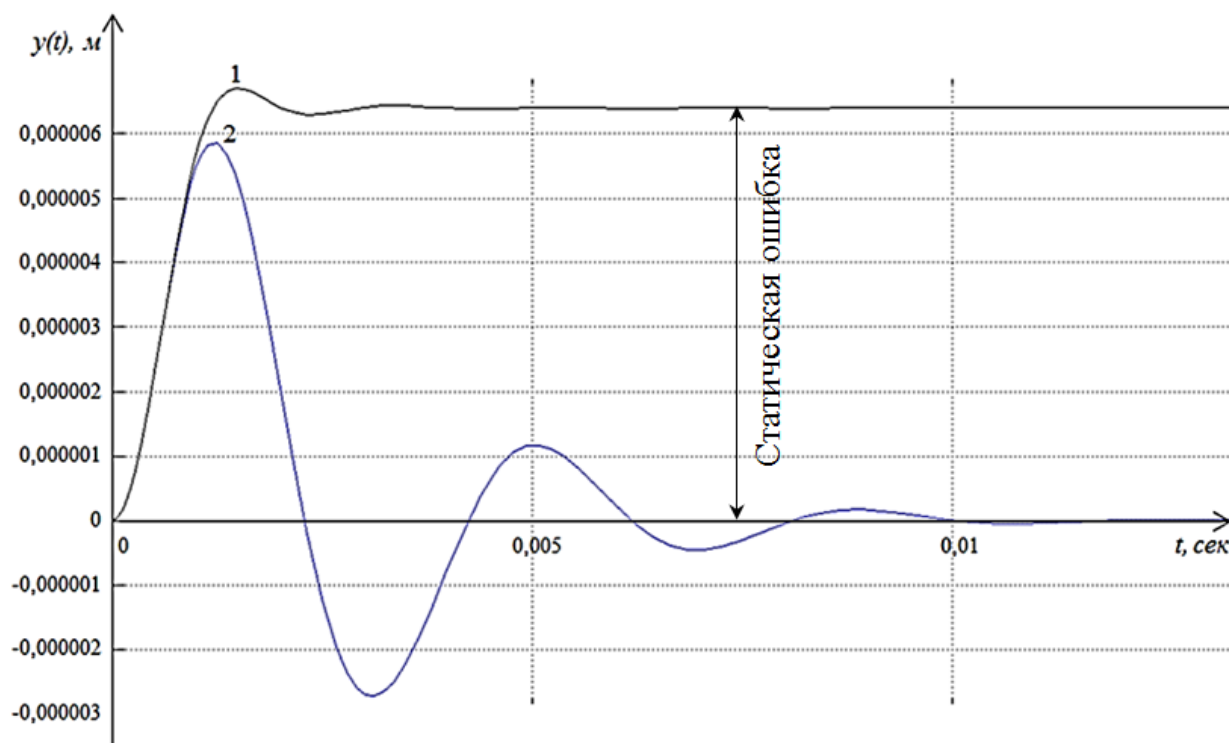


Рис. 9. График переходного процесса по возмущению при $F_B = 20000$ Н:

1 - система без интегральной части в контуре положения;

2 - система управления с интегральной частью во внешнем контуре

Анализ переходного процесса показывает, что электромагнитные подшипники, оснащенные трехконтурной системой управления, обладают большой статической жесткостью и высоким быстродействием. Провалы ротора под действием внешних возмущающих сил позволяют вести речь о зависимости динамической жесткости электромагнитного подшипника от постоянной времени T_{II} во внешнем контуре положения.

Выводы

Полученные характеристики переходных процессов САУ подтверждают правильность выбранных алгоритмов управления активным магнитным подшипником.

Библиографический список

1. **Журавлев, Ю. Н.** Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
2. **Макаричев, Ю.А.** Синтез системы подчиненного регулирования электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, И.С. Ткаченко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки», 2007. – Самара: СамГТУ, 2007. №1 (14). С. 143–148.

УДК 621.314

А.Б. ДАРЬЕНКОВ, Д.Б. КУРИЦЫН, И.В. ХОДЫКИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВДЭС НА ОСНОВЕ ДВС ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ (постановка задачи)

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Приведены структурные схемы гибридных ветроэлектростанций. Авторами разрабатывается усовершенствованный вариант подобных электростанций. Поставлены основные задачи исследования в области переходных режимов работы гибридных ветроэлектростанций на основе ДВС переменной частоты вращения.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветро-дизель-электрическая станция, переходный процесс, генератор, переменная частота вращения.

The article shows the block diagram of hybrid wind power plants. Improved version of similar power plants is developing by the authors. The main objectives of the research in the field of transitional operating modes of hybrid wind power plants based on internal combustion engine with alternating frequency rotation has been posed.

Key words: wind power, wind diesel power plant, transient response, generator, alternating frequency rotation.

Экономический потенциал возобновляемых источников энергии и масштабы его использования в мире с каждым годом увеличиваются. В настоящее время всё большее внимание привлекает к себе ветроэнергетика. При этом необходимо отметить, что широко применяются ВЭС (ветроэлектрические станции) мощностью более 100 кВт. Данное направление в энергетике является перспективным и для России. Распределение значений среднегодовых скоростей ветра на высоте 10 м в нашей стране представлено на рис. 1 [1].

К преимуществам использования ветроэнергетики можно отнести следующее:

- ветер является возобновляемым (практически неисчерпаемым) источником энергии;
- ветроэнергетика экологически безопасна (ВЭС не производят угарного газа (СО), углекислоты (СО₂) и окислов азота и серы, пылевых загрязнителей и других вредных отходов);
- существуют обширные территории для размещения ВЭС, позволяющие создавать энергонезависимые регионы.

Существенным недостатком ветроэнергетики является непостоянство ветров. Вследствие этого одной из важнейших задач ветроэнергетики является обеспечение бесперебойности электроснабжения. Данная задача решается с помощью комбинированных ВЭС на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – ветро-дизель-электрических станций (ВДЭС).



Рис. 1. Распределение значений среднегодовых скоростей ветра на высоте 10 м в России

Простейший вариант структурной схемы ВДЭС представлен на рис. 2.

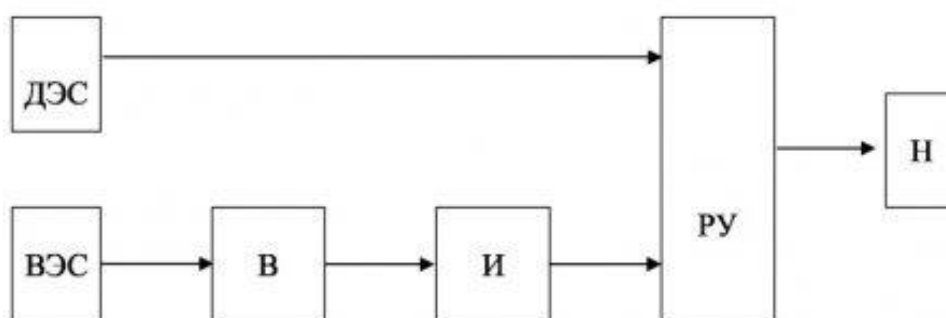


Рис. 2. Структурная схема ВДЭС

ВДЭС, представленная на рис. 2, включает в свой состав дизельную (ДЭС) и ветровую электростанции (ВЭС), выпрямитель (В), инвертор (И), распределительное устройство (РУ) и нагрузку (Н). В зависимости от ветровых условий, ВЭС в энергокомплексе может использоваться как вспомогательный источник энергии, если ветровой потенциал недостаточен для эффективного энергоснабжения потребителя. ВЭС и ДЭС могут работать параллельно или поочередно на общую нагрузку за исключением периодов безветрия и ураганов, когда ВЭС отключается.

В диапазоне рабочих скоростей ветра от минимальной пусковой до расчетной ВЭС работает с переменной частотой вращения ветрогенератора, что обеспечивает выработку максимальной мощности. При увеличении скорости ветра вплоть до максимального значения, ВЭС работает в режиме постоянства мощности с переменным значением коэффициента использования ветра. ДЭС

вырабатывает недостающую часть энергии, необходимую потребителю в соответствии с его графиком нагрузки.

Соотношение мощностей ВЭС и ДЭС может быть различным при соблюдении очевидного условия: мощность ВЭС не должна превышать мощность ДЭС [6]. В зонах с большим ветровым потенциалом мощность ВЭС и ДЭС могут быть близки или равны. Кроме совместной работы на общую нагрузку ДЭС и ВЭС, предусматривается возможность отключения ДЭС на периоды полного покрытия мощности нагрузки ВЭС.

Отечественные и зарубежные компании строят гибридные системы на основе ДВС постоянной частоты вращения.

Существенными недостатками большинства выпускаемых промышленностью гибридных ВЭС является:

- отсутствие режима параллельной работы ветро- и дизель-электрического каналов;
- частота вращения ДВС не регулируется при изменении мощности нагрузки, поэтому расход топлива у таких гибридных ВЭС неоптимален [2].

Авторами разрабатывается гибридная ВЭС с интеллектуальной системой управления на основе нейронных сетей, для которой характерны следующие особенности [3]:

- частоты вращения ДВС регулируется в зависимости от мощности нагрузки в соответствии с многопараметровой характеристикой;
- обеспечивается параллельный режим работы ветро- и дизель-электрического каналов.

В результате проектируемая гибридная ВЭС будет обладать следующими достоинствами [3] – это:

- пониженный расход топлива (до 20–30%) по сравнению с электростанциями с постоянной частотой вращения [5];
- пониженный выброс выхлопных газов в атмосферу (до 20–30%) по сравнению с электростанциями с постоянной частотой вращения;
- повышенный моторесурс ДВС по сравнению с электростанциями с постоянной частотой вращения;
- повышенная надежность электроснабжения потребителей.

Использование статических преобразователей частоты позволяет строить гибридные электростанции, предусматривающие совместную работу ВЭС и ДЭС, равной или близкой мощности (рис. 3).

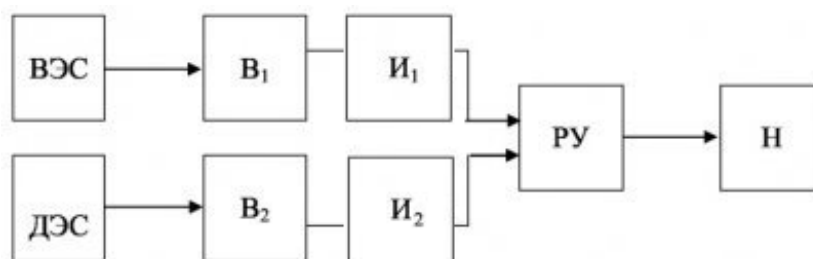


Рис. 3. Вариант ВДЭС, предусматривающий параллельную работу ВЭС и ДЭС

Работа схемы (рис. 3) строится на максимальном использовании энергии ВЭС с целью экономии топлива ДЭС, генерирующей недостающую мощность для обеспечения потребителей.

Актуальным является вопрос исследования переходных процессов гибридной ВЭС в следующих режимах работы:

- при включении ветро- и дизель-электрических каналов на параллельную работу;
- при изменении скорости ветрового потока и/или изменении мощности нагрузки в режиме параллельной работы.

Данные режимы работы вызывают особый интерес ввиду их большой роли при определении степени бесперебойности электроснабжения потребителей и распределении мощности нагрузки между ВЭС и ДЭС.

Исследование переходных процессов гибридной ВЭС проводится на основе уравнений Парка-Горева, описывающих электрические машины [4]. В них связаны мгновенные значения токов, магнитных потоков, напряжений в осях координат (d, q) , жестко связанных с ротором (рис. 4) [7].

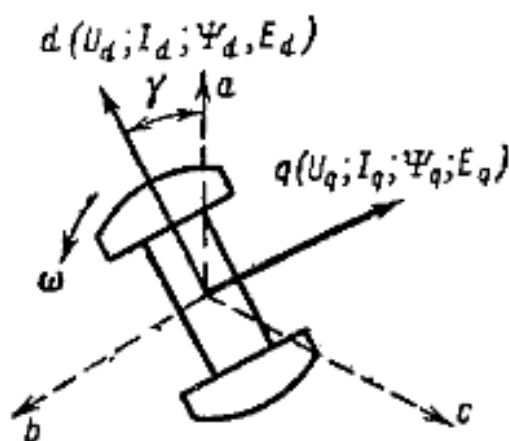


Рис. 4 Принятые направления осей для системы уравнений Парка - Горева для синхронной машины в операторной форме,

a, b, c – оси времени фаз; d, q – продольная и поперечная оси соответственно; U_d, U_q – напряжения продольного и поперечного контуров статора соответственно; I_d, I_q – токи продольного и поперечного контуров статора соответственно; Ψ_d, Ψ_q – полные потокоцепления продольного и поперечного контуров статора соответственно; E_d, E_q – Э.Д.С. продольного и поперечного контуров статора соответственно; $\gamma = \gamma_0 + \omega t$ – угол между осью d и осью фазы обмотки статора; ω – скорость изменения γ

Дифференциальные уравнения синхронных машин дают возможность проводить анализ переходных процессов в электрических системах с учетом наибольшего количества влияющих факторов:

- изменений угловой скорости ротора;
- апериодических составляющих токов статора;
- периодических составляющих токов ротора;
- активного сопротивления в цепи статора генератора.

При аналитических расчетах по уравнениям Парка-Горева целесообразно пользоваться их упрощенной формой:

$$U_d = -p\Psi_d - \Psi_q\gamma p - I_d r; \quad (1)$$

$$U_q = -p\Psi_q + \Psi_d\gamma p - I_q r; \quad (2)$$

$$U_0 = -p\Psi_0 - I_0 r_0, \quad (3)$$

$$\omega_0 = 1; \quad p\gamma = 1 + p\delta; \quad U_q = -\sin \delta; \quad U_d = U \cos \delta. \quad (4)$$

Уравнения (1) - (3) полностью описывают переходный процесс машины, работающей на шины неизменного напряжения. Для анализа переходного процесса в сложной системе уравнения составляются для каждого элемента (генераторы, нагрузка и др.) и решаются совместно. Благодаря этому можно получить уравнения (5) и (6), описывающие изменения составляющих напряжения и тока генератора при пуске электродвигателя соизмеримой мощности (рис. 5), а также уравнения (7) и (8) – для исследования переходных процессов при сбросе номинальной нагрузки (рис. 6), уравнение (9) - для исследования влияния на систему удалённого короткого замыкания (рис. 7) [5].

$$U_q(t) = 1 - \Delta U_{q0} e^{-\frac{t}{T'_{dД}}}, \quad (5)$$

где $\Delta U_{q0} = 1 - U_{q0}$.

$$i_d(t) = \frac{1}{X_D} U_q(t), \quad (6)$$

где X_D – индуктивное сопротивление генератора.

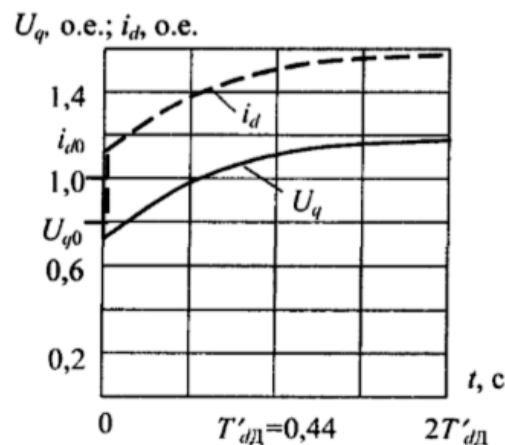


Рис. 5. Графики изменения составляющих напряжения и тока генератора МДС -500 мощность 500 кВт при пуске асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором АМ-32-2 мощностью 150 кВт:

i_d, i_q - токи продольного и поперечного контуров статора соответственно;
 $T'_{dД}$ – постоянная времени обмотки ротора при замкнутой обмотке статора через внешнее сопротивление накоротко

$$U(t) = \left(i_{B,y} + \Delta i_B e^{-\frac{1}{T_{d0}}} \right) \sin \omega t; \quad (7)$$

$$i_B(t) = i_{B,y} + \Delta i_B e^{-\frac{1}{T_{d0}}}, \quad (8)$$

где $\Delta i_B = i_{B,0} - i_{B,y}$ – приращение тока ротора в момент нарушения режима.

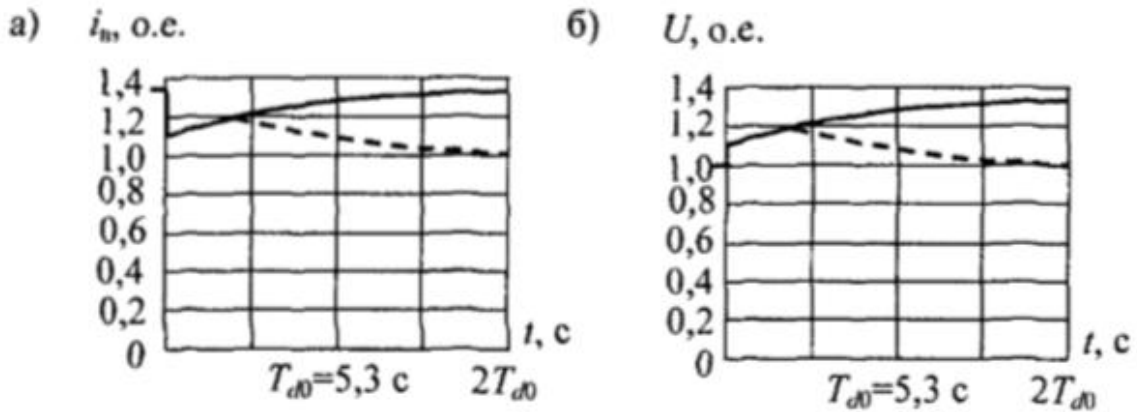


Рис. 6. Графики изменения тока ротора (а) и огибающих амплитуд напряжения на зажимах статора (б) генератора СВ-1500/200-88 при отключении от сети, «сбросе» номинальной нагрузки (пунктирные графики – действие автоматического регулирования возбуждения):

i_B – ток ротора; U – амплитудное значение напряжения на зажимах статора;
 T_{d0} – постоянная времени без нагрузки

$$i_d(t) = I_{dH} + \Delta I'_d e^{-\frac{1}{T_{dT}}} + \frac{k}{x_{dT}} [t - (t - \tau) 1(t - \tau)] + \frac{k}{x_{dT}} T'_{dT} \left[e^{-\frac{1}{T_{dT}}} - e^{-1T_{dT}, t-\tau} 1(t-\tau), \right] \quad (9)$$

где I_{dH} – ток статора до нарушения режима; I'_d – бросок тока статора в момент включения невозбужденного генератора; k – угловой коэффициент; x_{dT} – внешнее сопротивление в цепи короткого замыкания; τ – время достижения напряжением возбуждения максимального значения.

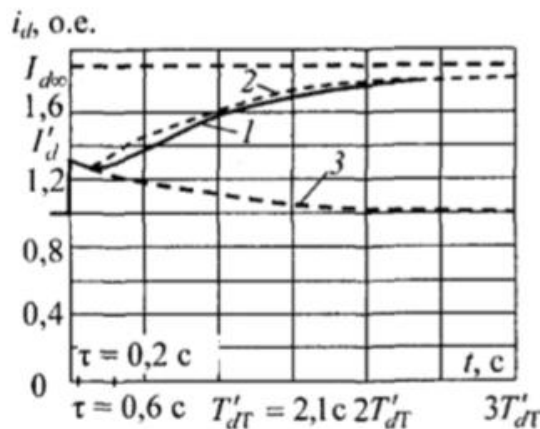


Рис. 7. Графики изменения продольного тока статора генератора ТВВ-200-2 при удалённом коротком замыкании и формировки поля для – машинного возбуждения (1), для ионного возбуждения (2) и без форсировки поля (3)

Уравнения (1)–(9) используются для исследования переходных процессов при постоянной частоте вращения дизель-генератора.

Авторами ставятся задачи получения аналитических выражений и исследования переходных процессов ВДЭС на базе ДВС переменной частоты вращения в различных режимах работы (рис. 8).

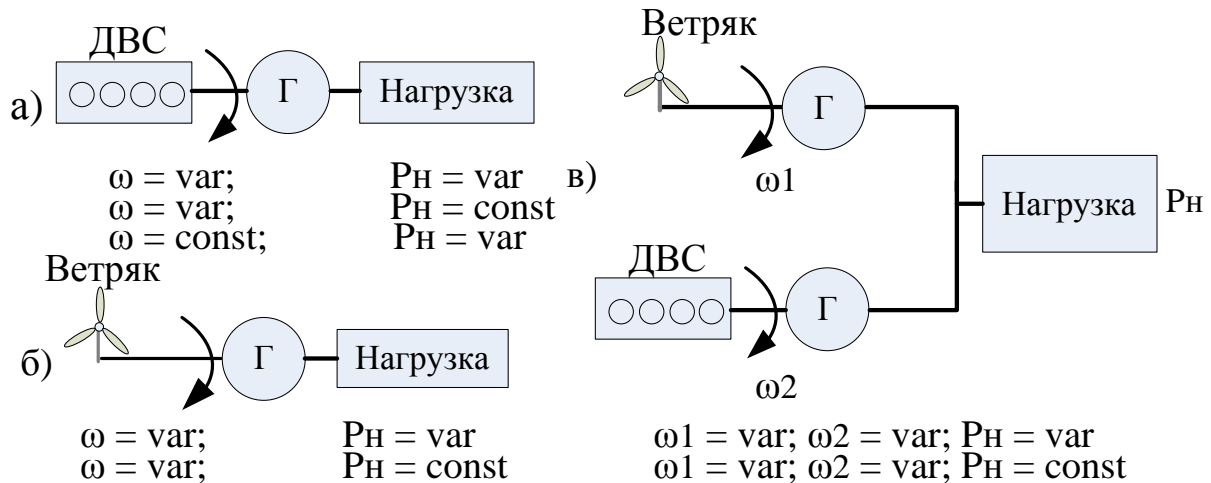


Рис. 8. Исследуемые режимы работы ВДЭС на базе ДВС переменной частоты вращения

Полученные аналитические зависимости предполагается использовать при разработке интеллектуальной системы управления ВДЭС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10026).

Библиографический список

1. **Онищенко, Г.Б.** Развитие энергетики России. Направления инновационно-ческого развития / Г.Б. Онищенко, Г.Б. Лазарев. – М.: Россельхозакадемия, 2008.
2. **Хватов, О.С.** Электротехнический комплекс генерирования электрической энергии на основе дизель- генераторной установки переменной скорости вращения с интеллектуальной системой управления / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Поляков // Информационные системы и технологии ИСТ-2011: материалы XVII междунар. научно-технич. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 196–197.
3. **Бадугин, Д.А.** Испытательный стенд задатчика экономичного режима ветро-дизель-электрической станции / Д.А. Бадугин [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики. НГТУ. – Н. Новгород, 2014. С. 147–151.
4. **Крутов, В.И.** Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие для вузов / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.
5. **Мелешкин, Г.А.** Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах / Г.А. Мелешкин. – М.: СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2005. – 376 с.
6. Сайт Альтернативная энергия [Электронный ресурс]. – Альтернативная энергия, 2015. – Режим доступа: <http://alternativenenergy.ru>, свободный.
7. Сайт Сборник электротехнической информации [Электронный ресурс]. – Сборник электротехнической информации, 2015. – Режим доступа: <http://websor.ru/>, свободный.

УДК 621.3

К.П. СЛЯДЗЕВСКАЯ

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается синтез цифровых регуляторов для асинхронного частотного электропривода при условии известного переходного процесса регулируемой величины.

Ключевые слова: передаточная функция, регулятор, модульный оптимум, симметричный оптимум.

The article deals with the synthesis of digital controllers for asynchronous frequency electric drive known transient controlled variable.

Key words: transfer function, the controller, modular optimum, symmetrical optimum.

Структурная схема замкнутой цифровой системы автоматического регулирования [1], приведенной к единичной обратной связи, выглядит следующим образом (рис. 1).

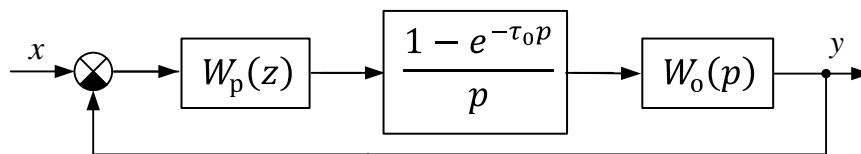


Рис. 1. Структурная схема замкнутой цифровой системы автоматического регулирования

На рис. 1 приняты обозначения:

$W_p(z)$ – передаточная функция цифрового регулятора;

$W_0(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_0(p)}{p} \right\}$ – передаточная функция объекта.

По структурной схеме найдем передаточную функцию замкнутой системы

$$W_3(z) = \frac{W_p(z) \cdot W_0(z)}{1 + W_p(z) \cdot W_0(z)}. \quad (1)$$

Следовательно, передаточная функция регулятора

$$W_p(z) = \frac{1}{W_0(z)} \cdot \frac{W_3(z)}{1 - W_3(z)}. \quad (2)$$

Пусть известно изображение желаемого переходного процесса регулируемой величины

$$H_3(p) = \frac{W_3(p)}{p}. \quad (3)$$

Тогда желаемая передаточная функция замкнутой системы

$$W_3(z) = Z\{H_3(p)\} / Z\left\{\frac{1}{p}\right\}. \quad (4)$$

Применим изложенную методику для синтеза цифровых регуляторов канала скорости системы автоматического управления асинхронного частотного электропривода (АЭП) с ориентацией по вектору потокосцепления ротора. Силовая часть АЭП представлена преобразователем частоты со звеном постоянного тока и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. В состав преобразователя частоты входят неуправляемый выпрямитель, Γ – образный LC фильтр и автономный инвертор напряжения, управляемый по закону широтно-импульсной модуляции.

Начнем синтез цифровых регуляторов с внутреннего контура тока y .

Изображение желаемого переходного процесса тока y примем

$$H_{зкту}(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{2\tau_0 p + 1}. \quad (5)$$

Тогда передаточная функция замкнутого тока y

$$W_{зкту}(z) = \frac{1 - z_0}{z - z_0}, \quad (6)$$

где τ_0 – интервал дискретности;

$$z_0 = e^{-\frac{\tau_0}{2\tau_0}} = e^{-0.5}.$$

Передаточная функция объекта контура тока y без учета перекрестных связей между каналами скорости и потокосцепления ротора

$$W_{окту}(z) = \frac{k_{iy} \cdot k_{п} \cdot p_{1y0}}{z - z_3}, \quad (7)$$

где k_{iy} – коэффициент обратной связи по току y ;

$k_{п}$ – коэффициент преобразователя частоты;

τ_e, τ_e – параметры модели асинхронного двигателя [2].

Передаточная функция регулятора тока y в этом случае имеет вид

$$W_{рту}(z) = \frac{k_{y0}(z - z_3)}{z - 1}, \quad (8)$$

где $k_{y0} = \frac{1 - z_0}{k_{iy} \cdot k_{п} \cdot p_{1y0}}.$

Произведем синтез цифрового регулятора скорости таким образом, чтобы переходный процесс в контуре скорости при скачке задания соответствовал настройке на модульный оптимум

$$H_{\text{зсмо}}(p) = \frac{1}{p(2\tau_{0c}^2 p^2 + 2\tau_{0c} p + 1)}, \quad (9)$$

где $\tau_{0c} = 2\tau_0$.

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{\text{зктмо}}(z) = \frac{a_1 z + a_0}{z^2 + q_1 z + q_2}, \quad (10)$$

где $\alpha = \frac{1}{2\tau_{0c}}$; $\beta = \frac{1}{2\tau_{0c}}$;

$$d = e^{-\alpha\tau_0}; p_1 = d(\sin(\beta\tau_0) - \cos(\beta\tau_0));$$

$$q_1 = -2d \cos(\beta\tau_0); q_2 = d^2;$$

$$a_1 = q_1 - p_1 + 1; a_0 = q_2 + p_1.$$

Передаточная функция объекта контура скорости

$$W_{\text{окс}}(z) = \frac{1}{k_{iy}} \cdot \frac{1 - z_0}{z - z_0} \cdot \frac{p_{1\omega_0} z + p_{2\omega_0}}{p_{1y_0}(z - 1)}, \quad (11)$$

где $p_{1\omega_0} = \frac{k_m \psi_{2H}}{J r_e} (\tau_e (z_3 - 1) + \tau_0)$;

$p_{2\omega_0} = \frac{k_m \psi_{2H}}{J r_e} (\tau_e (1 - z_3) - \tau_0 z_3)$;

k_m, ψ_{2H}, J – параметры модели асинхронного двигателя[2].

При настройке контура скорости на модульный оптимум передаточная функция регулятора скорости имеет вид

$$W_{\text{рсмо}}(z) = \frac{k_{iy} \cdot p_{1y_0} \cdot (z - z_0)}{(1 - z_0)p_{1\omega_0} \left(z + \frac{p_{2\omega_0}}{p_{1\omega_0}} \right)} \cdot \frac{a_1 z + a_0}{z + p_1}, \quad (12)$$

или

$$W_{\text{рсмо}}(z) = \frac{c_2 z^2 + c_1 z + c_0}{z^2 + b_1 z + b_0}, \quad (13)$$

где $c_2 = a_1 k_{\omega_0}$; $c_1 = (a_0 - a_1 z_0) k_{\omega_0}$; $c_0 = -a_0 z_0 k_{\omega_0}$;

$$k_{\omega_0} = \frac{k_{iy} \cdot p_{1y_0}}{(1 - z_0)p_{1\omega_0}};$$

$$b_1 = p_1 + \frac{p_{2\omega_0}}{p_{1\omega_0}};$$

$$b_0 = p_1 \frac{p_{2\omega_0}}{p_{1\omega_0}}.$$

Произведем синтез цифрового регулятора скорости при настройке контура на симметричный оптимум

$$H_{зсо}(p) = \frac{1}{p(8\tau_{0c}^3 p^3 + 8\tau_{0c}^2 p^2 + 4\tau_{0c} p + 1)}. \quad (14)$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости, настроенного на симметричный оптимум,

$$W_{зктсо}(z) = \frac{a_{2c}z^2 + a_{1c}z + a_{0c}}{(z^2 + q_{1c}z + q_{2c})(z - z_{0c})}, \quad (15)$$

где $\alpha_c = \frac{1}{4\tau_{0c}}$; $\beta_c = \frac{\sqrt{3}}{4\tau_{0c}}$;

$$z_{0c} = e^{-\frac{\tau_0}{2\tau_{0c}}}; d_c = e^{-\alpha_c \tau_0};$$

$$q_{1c} = -2d_c \cos(\beta_c \tau_0); q_{2c} = d_c^2; p_{1c} = -d_c \cos(\beta_c \tau_0);$$

$$a_{2c} = 2(q_{1c} - p_{1c}) + 1 - z_{0c};$$

$$a_{1c} = -q_{1c}(1 + z_{0c}) + 2(p_{1c} - z_{0c} + q_{2c}) + 2p_{1c}z_{0c};$$

$$a_{0c} = -q_{2c}(1 + z_{0c}) - 2p_{1c}z_{0c}.$$

Передаточная функция регулятора скорости

$$W_{рссо}(z) = \frac{k_{iy} \cdot p_{1y0} \cdot (z - z_0)}{(1 - z_0)p_{1\omega_0} \left(z + \frac{p_{2\omega_0}}{p_{1\omega_0}}\right)} \cdot \frac{a_{2c}z^2 + a_{1c}z + a_{0c}}{z^2 + b_{1c}z + b_{0c}}, \quad (16)$$

или

$$W_{рссо}(z) = \frac{c_{3c}z^3 + c_{2c}z^2 + c_{1c}z + c_{0c}}{g_2z^2 + g_1z + g_0}, \quad (17)$$

где $c_{3c} = a_{2c}k_{\omega_0}$; $c_{2c} = (-a_{2c}z_0 + a_{1c})k_{\omega_0}$; $c_{1c} = (-a_{1c}z_0 + a_{0c})k_{\omega_0}$;

$$c_{0c} = -a_{0c}z_0k_{\omega_0}; b_{1c} = 2(p_{1c} - z_{0c}) - q_{1c}; b_{0c} = -2p_{1c}z_{0c} - q_{2c};$$

$$g_2 = b_{1c} + \frac{p_{2\omega_0}}{p_{1\omega_0}}; g_1 = b_{0c} + b_{1c} \frac{p_{2\omega_0}}{p_{1\omega_0}}; g_0 = b_{0c} \frac{p_{2\omega_0}}{p_{1\omega_0}}.$$

На модели АЭП в пакете *Matlab* [3] были рассчитаны переходные процессы в канале скорости (рис. 2). На рис. 2 показаны также переходные процессы в канале скорости с регуляторами, настроенными на дискретные аналоги модульного и симметричного оптимумов (метод аппроксимации – трапеция) [2].

В табл. 1 приведены показатели качества регулирования скорости (σ , % – перерегулирование, t_{\max} – время максимума, $t_{\text{пер}}$ – время переходного процесса, τ_0 – интервал дискретности в относительных единицах ($\tau_0 = 0,314$ соответствует 1 мс)).

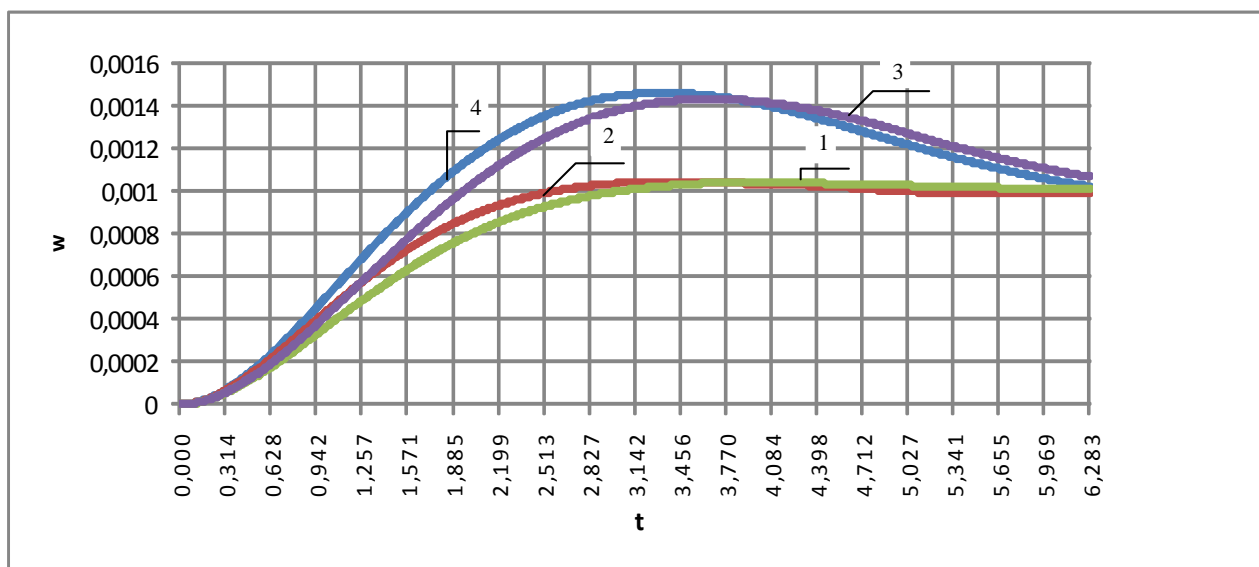


Рис. 2. Переходные процессы в канале скорости:

- 1 – модульный оптимум (МО);
 2 – дискретный аналог модульного оптимума (ДАМО);
 3 – симметричный оптимум (СО);
 4 – дискретный аналог симметричного оптимума (ДАСО)

Таблица 1

Показатели качества регулирования в канале скорости

	МО	ДАМО	СО	ДАСО
$\sigma, \%$	4,055	4,35	43,33	46,12
t_{\max}	$13,18\tau_0$	$10,62\tau_0$	$11,66\tau_0$	$10,58\tau_0$
$t_{\text{пер}}$	$17,27\tau_0$	$14,5\tau_0$	$33\tau_0$	$33\tau_0$

Отличие показателей качества регулирования от стандартных показателей при настройках контура скорости на модульный и симметричный оптимумы объясняется влиянием перекрестных связей между каналами скорости и потокосцепления ротора.

Библиографический список

1. Сборник задач по теории автоматического регулирования / под ред. В.А. Бесекерского. – 5-е изд., перераб. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
2. Слядзевская, К.П. Математическое описание и синтез алгоритмов регулирования асинхронного частотного электропривода на основе теории импульсных систем: дисс. ... канд. техн. наук по специальности. – Н. Новгород: НГТУ, 14 декабря 2001. – 202 с.
3. Слядзевская, К.П. Математическое моделирование асинхронного частотного электропривода в пакете MATLAB // Актуальные проблемы электроэнергетики: юбилейный том посвященный 100-летию со дня рождения С. Н. Шевчука: Труды НГТУ. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. Т. 59. С. 147–151

УДК 62-83:621.313

Т.Н. УСНУНЦ-КРИГЕР, А.Ю. СМИРНОВ

МИНИМИЗАЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В КОММУТИРУЕМЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена схема с адаптивным нечетким управлением для минимизации пульсаций крутящего момента коммутлируемых реактивных машин. Нечеткие параметры первоначально выбираются случайным образом и затем приспособлены, чтобы оптимизировать управление. Контроллер создает сглаженный крутящий момент двигателя вплоть до номинальной скорости. Контроллер является надежным по отношению к ошибкам в информации о положении ротора, что означает, возможность использовать недорогие датчики. Представлены результаты моделирования и эксперимента.

Ключевые слова: Адаптивная нечеткая логика управления, высокая производительность приводов, в режиме реального времени реализация процессора цифровых сигналов, коммутация реактивной машины.

An adaptive fuzzy control scheme for torque-ripple minimization of switched reluctance machines is presented. The fuzzy parameters are initially chosen randomly and then adjusted to optimize the control. The controller produces smooth torque up to the motor base speed. The controller is robust toward errors in the rotor position information, which means inexpensive crude position sensors can be used. Detailed simulation and experimental results are presented.

Key words: Adaptive fuzzy logic control, high-performance drive, real-time digital signal processor implementation, switched reluctance machine.

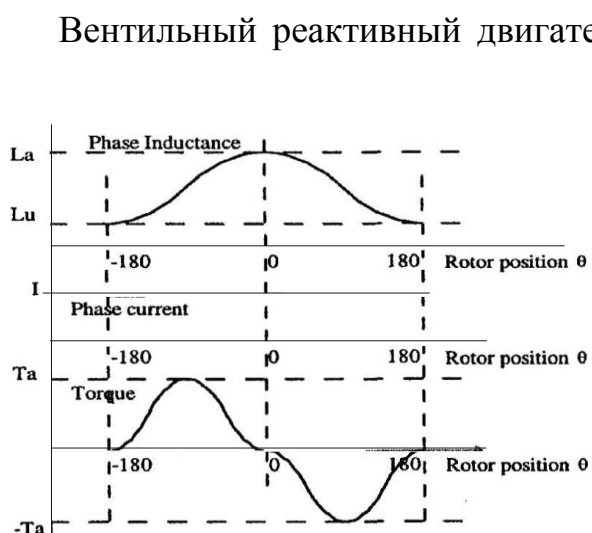


Рис. 1. Характеристики крутящего момента T_a и индуктивности

Вентильный реактивный двигатель (ВРД) является простым, низким по стоимости, отказоустойчивым и имеет простое управление преобразователем. Одним из основных недостатков ВРД является большие пульсации крутящего момента по сравнению с другими электрическими машинами. Рис. 1 показывает типичную кривую индуктивности и крутящего момента, используя постоянный фазовый ток и пренебрегая насыщением. В области, где изменение индуктивности мало, двигатель обеспечивает очень маленький вращающий момент по сравнению с областью, где изменение индуктив-

ности велико. Это соотношение становится еще более нелинейным, если учитывается эффект насыщения.

Таким образом, для поддержания постоянного крутящего момента, форма кривой тока должна непрерывно корректироваться при включённом состоянии фазы. Вращающий момент машины является результатом действия момента, создаваемого всеми фазами двигателя. Для того чтобы создавать стабильный момент, необходима плавная коммутация от одной фазы к другой. Пульсации вращающего момента в течение периода действия тока нескольких фаз могут быть весьма значительными, если процесс коммутации не является плавным. Этот эффект становится более значимым при высоких скоростях, когда коммутация осуществляется на большой угол поворота ротора и фазы начинают размагничиваться прежде чем они достигнут установившегося положения.

Существуют различные способы минимизации пульсаций вращающего момента ВРД. Методы, в соответствии с которыми формирование тока осуществляется в привязке к проводимости различных фаз и управлением с обратной связью, рассмотрены [1–4]. Они могут произвести высокие пики тока при низких приращениях индуктивности по углу поворота ротора $dL/d\theta$. Кроме того, большинство методов в значительной степени зависят от положения ротора. Любые ошибки в положении ротора могут привести к сбою управления. В большинстве случаев методы ограничены работой на низких скоростях.

Наибольший интерес представляет адаптивная схема нечёткого управления для минимизации пульсаций крутящего момента ВРД, рассмотренная в [5]. Представленный метод интересен тем, что не зависит от заданных параметров двигателя и может адаптироваться к любым изменениям в характеристике двигателя. Кроме того, контроллер является надежным по отношению к ошибкам в обратной связи по положению ротора, позволяет избежать получения отрицательного вращающего момента при коммутации, и сводит к минимуму колебания момента вращения вплоть до номинальной скорости двигателя.

Нечеткое управление является одним из вариантов схемы управления для контроля вращающего момента ВРД.

Контроллер использует информацию о положении ротора на входе и выходе тока фаз. При рассматриваемом способе управления важное значение имеет точное измерение момента двигателя для обеспечения с обратной связи.

Схемы подстройки коммутации и настройки угла опережения позволяют превысить максимально возможную проводимость фазы, не заходя в область отрицательного крутящего момента.

Самонастраивающийся регулятор управления и алгоритм управления были проверены на двигателе с восемью полюсами на статоре и шестью зубцами на роторе. Параметры ВРД имели следующие значения: сопротивление фазы $R_\phi = 0,125$ Ом; ненасыщенная нелинейная индуктивность $L_u = 0,7$ мГн; ненасыщенная линейная индуктивность $L_{au} = 4,715$ мГн.

Контрольное значение тока поддерживалось на частоте 20 кГц, а ток регулировался в пределах до насыщения магнитной цепи двигателя. Было использовано контрольное значение вращающего момента, равное $0,9$ Н*м.

Рис. 2 и рис. 3 показывают работу регулятора управления на малой скорости, равной 100 об/мин. Рис. 2 показывает электромагнитный вращающий момент. Момент приближается к контрольному значению.

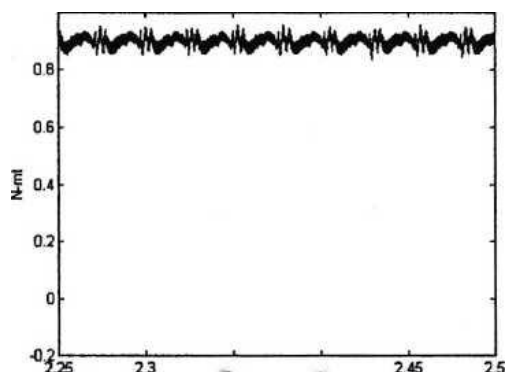


Рис. 2. Электрический крутящий момент двигателя при 100 об/мин

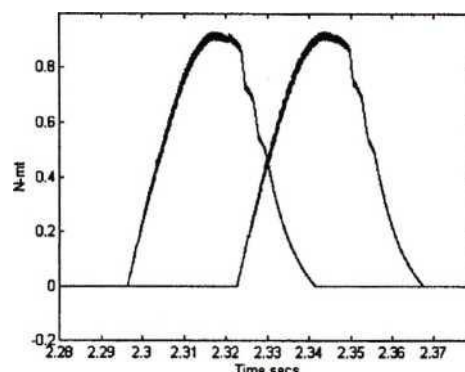


Рис. 3. Крутящий момент в двух смежных фазах при 100 об/мин

На рис. 3 отображен вращающий момент в двух смежных фазах. В широком диапазоне изменения угла поворота ротора относительно оси каждой фазы вращающий момент двигателя остаётся положительным.

Рис. 4 и рис. 5 иллюстрируют работу регулятора на высоких скоростях – 4000 об/мин. Рис. 4 показывает результирующий момент, а рис. 5 – момент в двух смежных фазах. Фазы создают и распределяют момент в широком диапазоне частот. Это обеспечивает высокое удельное его значение и низкий уровень пульсации при отсутствии чрезмерно высоких пиков тока. Также отсутствуют значительные мгновенные значения отрицательного вращающего момента.

Параметры ВРД в эксперименте аналогичны параметрам ВРД, примененным в моделировании. Можно рекомендовать регулятор с процессором цифровых сигналов частотой 40 МГц (рис. 6).

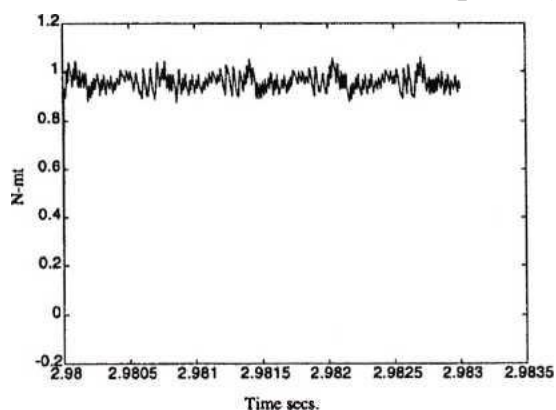


Рис. 4. Электромагнитный вращающий момент двигателя при 4000 об/мин

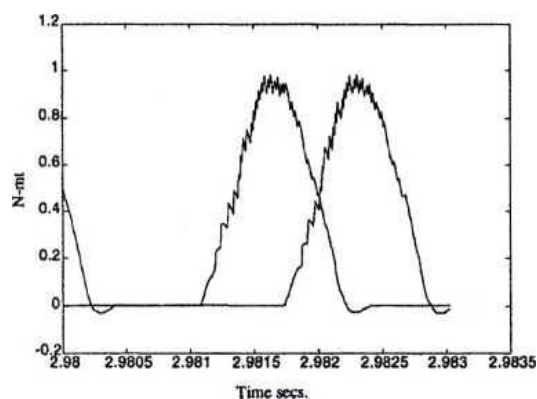


Рис. 5. Вращающий момент в двух смежных фазах при 4000 об/мин

Пятиканальный аналого-цифровой преобразователь применялся для оцифровки четырехфазных токов и напряжения одной фазы. Обнаружение токов производилось с помощью датчиков Холла. Позиция ротора определялась с помощью кодирующего устройства. Для настройки тока использован датчик отставания фаз.

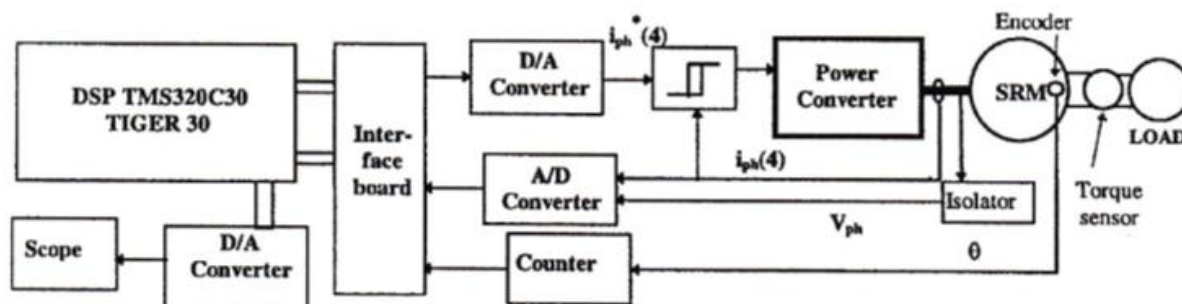


Рис. 6. Экспериментальная установка

Для конвертации фазного тока из цифрового сигнального процессора в аналоговые сигналы применялся четырехканальный ЦАП. Пружинный датчик применялся для измерения момента на валу. Для ограничения скоростного диапазона испытаний частота преобразователя была настроена на предельную скорость в 5000 об/мин.

Датчик измерения момента был настроен на режим управления «по прерываниям». Схема параметров настройки для измерения момента была заложена в управляющую программу с низким приоритетом, в то время как датчик работал в режиме заданных прерываний на постоянной частоте 10 КГц. Это обеспечило наилучшее быстродействие устройства, тогда как расчет параметрической оценки происходил с меньшей скоростью для компенсации любого изменения параметров.

Рис. 7 показывает момент при 4000 об/мин. Пульсации момента сравнимы со значениями, полученными при моделировании. При понижении частоты отмечено увеличение пульсации в эксперименте, сравнимое с увеличением пульсации, полученной при моделировании. Рис. 8 показывает ток в двух смежных фазах при 4000 об/мин.

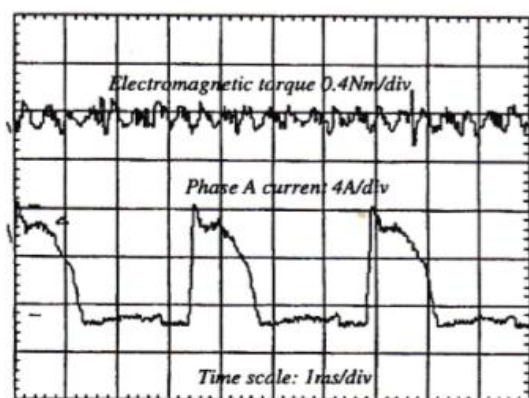


Рис. 7. Вращающий момент двигателя при 4000 об/мин и ток в фазе

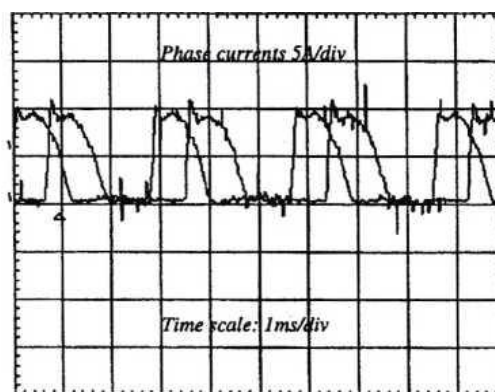


Рис. 8. Ток в двух смежных фазах при 4000 об/мин

Представлена схема использования самонастраивающегося регулятора (контролера) управления с нечётким алгоритмом для минимизации пульсации крутящего момента ВРД. Регулятор управления способен равномерно вырабатывать крутящий момент до номинальной скорости двигателя. Крутящий момент генерируется в области выработки максимально-положительного момента фаз, за счет чего увели-

чивается плотность крутящего момента, удается избежать высоких пиков тока. Регулятор устойчив к вводу ошибочной информации о положении ротора, что позволяет использовать недорогой датчик контроля положения ротора.

Свойство самонастройки регулятора с постоянным измерением крутящего момента делает процесс управления универсальным, что позволяет обойтись без дополнительного устройства, как в случае с другими методами управления ВРД. Результаты моделирования показали, что регулятор способен сглаживать пульсации момента даже на небольших скоростях и устойчив к ошибочной информации о положении ротора.

Библиографический список

1. **Moreira, J. G.** Torque ripple minimization in switched reluctance motors via bi-cubic spline interpolation // Conf. Rec. IEEE PESC'92, 1992. P. 851–856.
2. Schremm D. S. Torque ripple reduction of switched reluctance motors by phase current optimal profiling / D. S. Schremm, B. W. Williams, T. C. T. Green // Conf. Rec. IEEE PESC'92, 1992. P. 857–860.
3. **Husain, I.** Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control / I. Husain, M. Ehsani // Conf. Rec. IEEE- IAS Annu. Meeting, 1994. P. 72–77.
4. **Смирнов, А.Ю.** Расчёт электромагнитного момента экранированной индукторной машины // Электротехника, 1993. №7. С. 34–37.
5. Sayeed Mir. Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control / Sayeed Mir, Malik E. Elbuluk, Iqbal Husain // IEEE Transactions on Industry Applications. March/April 1999. V. 35. № 2. P. 461–468.

УДК 621.316.79

Д.А. БАДУГИН, Е.В. БЫЧКОВ, А.Б. ДАРЬЕНКОВ, Д.А. КОМРАКОВ,
В.Л. МЕЛЬНИКОВ, Е.О. СМИРНОВ, В.В. СОКОЛОВ

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРО-ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен вариант построения испытательного стенда для разработки и отладки оптимальных алгоритмов работы задатчика экономичного режима гибридной автономной ветро-дизель-электрической станции.

Ключевые слова: ветрогенератор, дизель-генератор, электростанция, задатчик экономичного режима, интеллектуальная система управления

A variant of the construction of a test bed for developing and debugging optimal algorithms setpoint economy mode hybrid autonomous wind-diesel power plant.

Key words: wind generator, diesel generator, power, economy mode dial, the intelligent control system.

Одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики и решения экологических проблем Российской Федерации является использование

возобновляемых энергетических ресурсов и реализация программ энерго- и ресурсосбережения. Разработка подобных программ целесообразна не только в общепромышленном, но также и в локальном масштабе: на уровне коттеджа, небольшой фермы или предприятия, научно-исследовательской станции.

Основной принцип использования возобновляемых источников энергии предполагает извлечение энергии из процессов, постоянно происходящих в окружающей среде. Одним из наиболее динамично развивающихся видов возобновляемых источников энергии в мире выступает ветроэнергетика. С географической и метеорологической точки зрения не вся территория РФ является благоприятной для эффективного (крупномасштабного) использования ветроэнергетики. В природной зоне центральной России в условиях существенной нестабильности ветровых процессов затруднительно поддерживать номинальные параметры работы возобновляемых энергетических установок. Поэтому более целесообразным представляется использование гибридных установок, которые содержат, наряду с возобновляемыми компонентами модули, работающие на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и устройства сопряжения с сетью [1].

При объединении гетерогенных (разнородных) источников энергии в пределах одного комплекса возникает задача сопряжения различных узлов генерации и их эффективного использования.

Решение такой задачи возможно на основе единого управляющего устройства, которое выполняет функции подключения модулей к внутренней шине постоянного тока, корректирует работу преобразовательных устройств и реализует оптимальный алгоритм подачи топлива в дизель-генераторную установку – задатчика экономичного режима (ЗЭР) [2].

Для синтеза оптимальных алгоритмов работы ЗЭР, а также изучения и оценки особенностей взаимодействия между разными автономными генерирующими установками авторами разработан испытательный стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 1.

В состав испытательного стенда входят: ветро- и дизель-генераторные установки и их имитаторы, построенные на базе генераторов переменного тока (СГ1 и СГ2), приводные асинхронные двигатели (АД1 и АД2) и преобразователей частоты (ПЧ1 и ПЧ2) для изменения частоты вращения генераторов. Суммирование потоков энергии генераторов осуществляется на шине постоянного тока, к которой подключена аккумуляторная батарея (АКБ).

Суммирование энергий генераторов переменного тока, работающих с переменными частотами вращения, осуществляется с помощью преобразователей переменного напряжения в постоянное (П1 – П2). Общее управление стендом обеспечивает программируемый логический контроллер (ПЛК), который формирует управляющие сигналы на основании информации от датчиков тока (мощности) и напряжения (частоты вращения).

Экономичную работу ДВС дизель-генераторной установки обеспечивает ЗЭР, использующий информацию о частоте вращения, потребляемой нагрузкой мощности и расходе топлива. Переменное напряжение (220 В, 50 Гц) формируется автономным инвертором, к которому подключаются нагрузка (активная и активно-индуктивная).

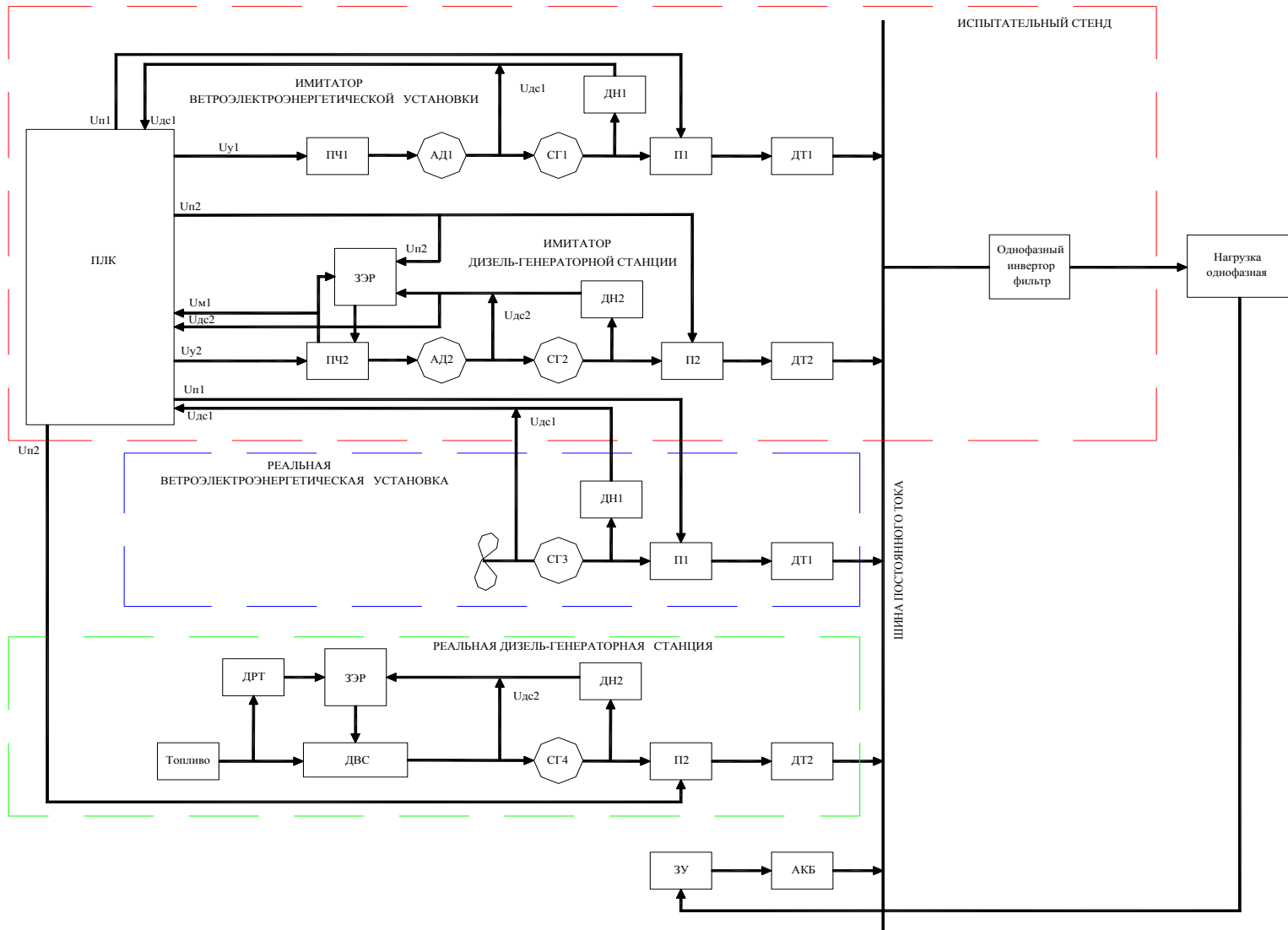


Рис. 1. Функциональная схема испытательного стенда

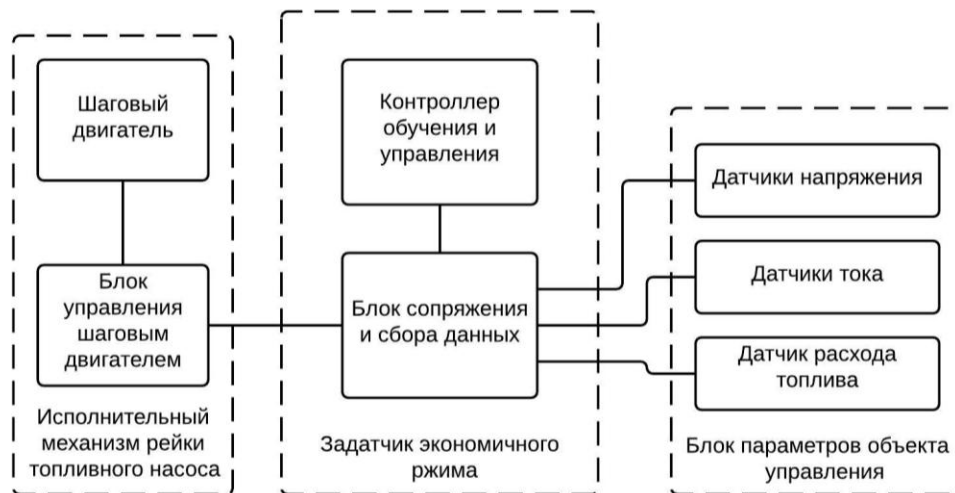


Рис. 2. Структура интеллектуальной системы управления ВДЭС с ЗЭР

Алгоритм ЗЭР должен обеспечивать максимальное использование энергии от ветрогенератора и восполнение дефицита мощности за счет дизель-генераторной установки.

Структура интеллектуальной системы управления ВДЭС с ЗЭР показана на рис. 2.

Основным модулем интеллектуальной системы управления является контроллер обучения и управления (КОиУ), реализующий алгоритмы нейронной сети. Функции гальванической развязки, преобразования логических уровней входных и выходных сигналов выполняет буфер сопряжения и сбора данных (БСиСД). К БСиСД подключается также датчик расхода топлива (ДРТ). Блок управления шаговым двигателем (БУШД) работает в режиме драйвера и формирует сигналы управления шаговым двигателем (ШД). ШД является исполнительным механизмом рейки топливного насоса для регулирования частоты вращения ДГ.

ДН, ДТ и ДРТ формируют блок параметров объекта управления. Соответствующие параметры с датчиков поступают на БСиСД, откуда передаются на аналоговые входы КОиУ. КОиУ считывает параметры датчиков с частотой 10 кГц. На основе считанных параметров КОиУ производит вычисления эффективной мощности, циркулирующей в системе. Далее параметры расхода топлива, мощности а также текущего положения рейки топливного являются входными переменными для функции нейросетевого обучения [3]. Принимаемые параметры сравниваются с аналогичными, сохранёнными в таблице т.н. ассоциативной энергонезависимой памяти контроллера.

После сравнения контроллер принимает решение, на сколько соответствует текущий режим работы одному или нескольким предыдущим режимам, записанным в таблицу. В случае нахождения похожего режима в таблице ассоциативной памяти, КОиУ считывает значение положения рейки топливного насоса и даёт команду БУШД на перемещение рейки в нужном направлении на необходимой количество шагов.

В случае отсутствия в таблице ассоциативной памяти КОиУ записи о режиме работы соответствующему текущему КОиУ производит несколько цик-

лов нейросетевого обучения, на основе всей таблицы ассоциативной памяти. После завершения цикла обучения, КОиУ формирует значение оптимального положения рейки топливного насоса. Из входных и выходных параметров формируется новый блок данных для таблицы ассоциативной памяти и происходит её запись и обновление в энергонезависимой памяти КОиУ.

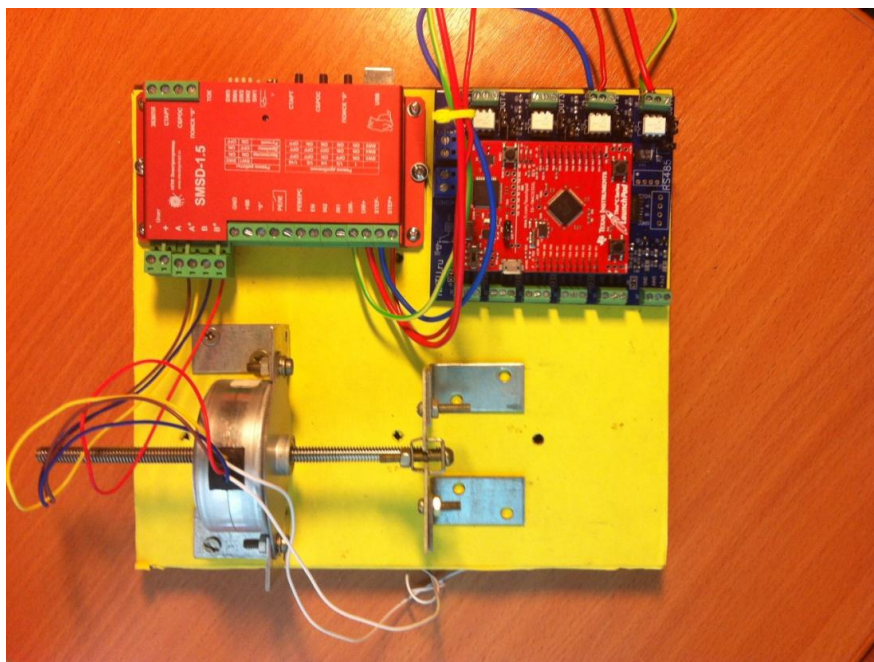


Рис. 3. Задатчик экономичного режима с шаговым двигателем

Испытательный стенд может работать в нескольких режимах.

1. Режим работы двух имитаторов предназначен для апробирования алгоритмов управления ветро-дизель-электростанции и предварительной настройки ЗЭР. В этом режиме энергия на шины постоянного тока поступает с имитаторов ветро- и дизель-генераторных установок. Сигнал управления ПЧ1 (Uy1) имитатора ДГУ формируется в ПЛК на основе обработки сигнала, получаемого от имитатора ветроэнергетической установки. Задание необходимой мощности с имитатора ветро-генератора формируется в ПЛК функциональным преобразователем (ФП1) с учетом фактической частоты вращения (ДН1) и нагрузочной характеристики ветро-генератора.

Контроль мощности поступающей энергии от ветро-генератора выполняет датчик тока (ДТ1), сигнал которого поступает в ПЛК и вычитается из сигнала пропорционального мощности, потребляемой с шин постоянного тока (ДТ5).

Разностный сигнал используется для формирования потока энергии с дизель-генератора.

Экономичную работу имитатора дизель-генераторной установки обеспечивает ЗЭР. При формировании сигнала на частоту вращения имитатора ДГУ (АД2-СГ2) учитывается: сигнал задания на мощность, снимаемую с ДГУ, фактическая частота вращения и потребляемая ПЧ2 электрическая энергия.

2. Режим работы имитатора ветро-генератора и реального дизель-

генератора позволяет произвести окончательную доводку характеристик ЗЭР с учетом реального расхода топлива, измеряемого датчиком расхода топлива (ДРТ) и режимов работы сервопривода перемещения топливной рейки ДГУ, регулирующей его подачу.

3. Режим работы реальных ветро- и дизель-генераторов на окончательном этапе разработки должен подтвердить правильность предложенных алгоритмов управления, а также теоретические расчеты экономичности и энергетической эффективности ветро-дизель-электрической станции с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения.

В рассмотренных режимах работы суммирование потоков энергии агрегатов на шине постоянного тока обеспечивают преобразователи переменного напряжения в постоянное необходимого уровня (П1-П4). Преобразователи работают в режиме источника тока и содержат входной выпрямитель, емкостной фильтр, импульсный преобразователь постоянного тока.

В настоящее время на кафедре «Электрооборудование, электропривод и автоматика» института электроэнергетики НГТУ изготовлен экспериментальный образец ЗЭР, смонтирован испытательный стенд ветро-дизель-электрической станции мощностью 1 кВт (рис. 4), проводится отладка и комплексные испытания интеллектуальной системы управления.



Рис. 4. Испытательный стенд ВДЭС с ЗЭР

Библиографический список

1. Дарьенков, А.Б. Гибридная ветроэлектростанция на основе дизель-генератора переменной частоты вращения / А.Б. Дарьенков, С.А. Владимирова, Е.А. Гусева // Материалы XIII Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2014. С. 60–61.
2. Бадугин, Д.А. Испытательный стенд задатчика экономичного режима ветро-дизель-электрической станции / Д.А. Бадугин [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей / НГТУ. – Н. Новгород, 2014. С. 147–151.
3. Дарьенков, А.Б. Автономная дизельная электростанция с нейросетевым задатчиком экономичного режима / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Промышленная энергетика. М. 2013. № 12. С. 26–29.

УДК 621.314 2

А.И. БАЙКОВ, А.Б. ДАРЬЕНКОВ, Д.Ю. ТИТОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
С АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ И ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Представлены математические модели синхронного генератора на основе преобразования Парка-Горева и в фазных координатах. Дан сравнительный анализ практической значимости и применимости различных структур уравнений состояния. Приведены результаты экспериментальной проверки адекватности моделирования режима с выпрямительной нагрузкой.

Ключевые слова: математическая модель, синхронный генератор, фазные координаты, преобразование Парка-Горева, уравнения состояния, экспериментальная проверка.

The paper presents the mathematical model of synchronous generator based on the Park-Gorev transformation and phase coordinates. Comparative analysis of the practical relevance and applicability of different equations of state structures is given. The results of experimental verification of the adequacy of the simulation mode rectifier load are show.

Key words: mathematical model, synchronous generator, phase coordinates, Park-Gorev transformation, equation of state, experimental verification.

Математическое моделирование синхронного генератора является известной и широко распространенной задачей в области электромеханики и электроэнергетики [1–3]. Тем не менее, при решении конкретных задач выявляются некоторые особенности, представляющие практический интерес для специалистов, связанных с применением синхронных генераторов в качестве источников электрической энергии. В частности, авторами обычно описывается одна из возможных структур уравнений состояния синхронной машины, которая использовалась непосредственно в представляемой разработке. Однако да-

же в рамках одной задачи иногда возникает необходимость применения различных модификаций моделей, что обуславливает актуальность анализа вариантов построения моделей синхронного генератора в рабочих режимах с активно-индуктивной и выпрямительной нагрузками.

Исходной можно считать широко применяемую математическую модель синхронного генератора (модель Ψdq), в которой независимые дифференциальные уравнения, или уравнения состояния формируются относительно потокосцеплений Ψ двухфазной эквивалентной машины в осях d и q на основе применения преобразования координат Парка-Горева [1]. Эти уравнения при использовании относительных единиц имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{dq} &= \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \Psi_{dq} - R_{dq} I_{dq} - U_{x.dq}, \\ \frac{d}{dt} \psi_f &= e_f - r_f i_f, \\ \frac{d}{dt} \Psi_D &= -r_D I_D, \\ \frac{d}{dt} \Psi_Q &= -r_Q I_Q, \end{aligned} \quad (1)$$

где ω_r – частота вращения ротора; $\Psi_{dq} = \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}$, $I_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$, $U_{x.dq} = \begin{bmatrix} u_{x.d} \\ u_{x.q} \end{bmatrix}$, – вектора преобразованных потокосцеплений, токов двухфазной эквивалентной обмотки и преобразованных напряжений на её зажимах; ψ_f , e_f , i_f – потокосцепление, ЭДС источника питания и ток обмотки возбуждения; Ψ_D , Ψ_Q , I_D , I_Q – вектора потокосцеплений и токов демпферных обмоток в продольной и поперечной осях; r_s , r_f , r_D , r_Q – активные сопротивления соответствующих обмоток.

Преобразованные напряжения обмоток статора находятся по соотношению

$$U_{dq} = \frac{d}{dt} \Psi_{dq} + E_{\omega.dq} + r_s I_{dq},$$

где $E_{\omega.dq} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \Psi_{dq}$ – ЭДС вращения двухфазной машины.

Два последних дифференциальных уравнения в (1) имеют простейшую структуру, не вызывают осложнений при интегрировании системы. Они касаются отображения влияния демпферных обмоток, проявляющегося только в быстропротекающих переходных процессах. А при анализе установившихся и квазиустановившихся нагрузочных режимов работы воздействием этих обмоток зачастую можно вообще пренебречь. Поэтому в целях упрощения последующего изложения эти уравнения опускаются.

Преобразование фазных потокосцеплений, токов и напряжений выполняется с использованием вращающейся системы координат. В случае синхронного генератора это вращение естественным образом связывается с поворотом ро-

тора на угол θ_r . В таком случае в формулах (3) для преобразования переменных используется матрица (2) поворота ротора:

$$A_{dq} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r + \pi/3) & \sin \theta_r \\ \cos(\theta_r + \pi/3) & \cos \theta_r \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\Psi_{dq} = A_{dq} \Psi_{ab}, I_{dq} = A_{dq} I_{ab}, U_{dq} = A_{dq} U_{ab}, U_{x.dq} = A_{dq} U_x, \quad (3)$$

где Ψ_{ab} , I_{ab} , U_{ab} – вектора непреобразованных независимых потокосцеплений, токов и напряжений обмоток статора; U_x – вектор линейных напряжений на статоре.

Вычисление непреобразованных физических величин через преобразованные выполняется с помощью обратной матрицы поворота:

$$A_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ -\cos(\theta_r + \pi/3) & \sin(\theta_r + \pi/3) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Вычисление U_x с учётом токов и напряжений ветвей внешней цепи, подключённых к зажимам статора, позволяет осуществлять совместное интегрирование уравнений схемы «синхронный генератор – нагрузка». С использованием топологической матрицы независимых контуров

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

при схеме соединения обмоток статора в звезду соотношения для полных векторов физических переменных статора имеют вид

$$\Psi_{abc} = H' \Psi_{ab}, I_{abc} = H' I_{ab}, U_{abc} = H' U_{ab}, U_x = H U_{abc}, \quad (6)$$

где H' – транспонированная матрица.

Частота вращения ω_r и угол поворота ротора вычисляются в результате решения уравнений движения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_r &= \frac{1}{j_D + j_G} (m_D - m_G), \\ \frac{d}{dt} \theta_r &= \omega_r, \\ m_G &= -l_m i_q i_f, \end{aligned} \quad (7)$$

где j_D, j_G – моменты инерции приводного механизма (дизеля) и генератора; m_D и m_G – моменты механический и электромагнитный этих узлов электромеханической системы; l_m – индуктивность главного контура намагничивания синхронного генератора.

Токи и потокосцепления двухфазной машины связаны через матрицу индуктивностей L_{dqf} , не меняющуюся при повороте ротора:

$$\Psi_{dqf} = L_{dqf} I_{dqf}, \quad (8)$$

где в простом случае достаточно использования индуктивности главного на-

магнитоведущего контура l_m и индуктивностей рассеяния обмоток статора и возбуждения l_s и l_f для представления упомянутой матрицы:

$$L_{dqf} = \begin{bmatrix} l_m + l_s & 0 & l_m \\ 0 & l_m + l_s & 0 \\ l_m & 0 & l_m + l_f \end{bmatrix} \quad (9)$$

Наличие в матрице L_{dqf} ненулевых элементов вне главной диагонали означает наличие взаимоиндуктивной связи между обмоткой d продольной оси и обмоткой возбуждения. Между обмотками статора существуют точно такие же взаимоиндуктивные связи, но в случае симметричной трёхфазной нагрузки обмоток влияние этих связей взаимно компенсируется. В модели Ψdq (1)–(9) предусматривается достижение именно такого режима, и корректное применение данной модели возможно только в указанном случае.

Модель Idq предусматривает переход от потокосцеплений двухфазной машины к токам её обмоток с помощью соотношения (9). С учётом того, что матрица индуктивностей L_{dqf} является постоянной, операция дифференцирования (8) не вызывает никаких осложнений и позволяет получить уравнение состояния двухфазной машины в виде

$$\frac{d}{dt} I_{dqf} = L_{dqf}^{-1} \left(E_{dqf} - E_{\omega.dqf} - R_{dqf} I_{dqf} - U_{x.dqf} \right), \quad (10)$$

где

$$I_{dqf} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix}, E_{dqf} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_f \end{bmatrix}, R_{dqf} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_f \end{bmatrix}, U_{x.dqf} = \begin{bmatrix} U_{x.dq} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$E_{\omega.dqf} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} L_{dqf} I_{dqf} = \begin{bmatrix} E_{\omega.dq} \\ 0 \end{bmatrix} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -(l_m + l_s) & 0 \\ (l_m + l_s) & 0 & l_m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix},$$

$$U_{dqf} = L_{dqf} \frac{d}{dt} I_{dqf} + R_{dqf} I_{dqf} + E_{\omega.dqf} = \begin{bmatrix} U_{dq} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В модели Idq к уравнению (10) добавляются уравнения (7), что позволяет в первом приближении представлять взаимодействие электрической схемы обмоток синхронного генератора и электромеханического преобразования энергии, передаваемой внешним приводным механизмом. Использование такой модели удобно, например, в случае воспроизведения функционирования замкнутой системы автоматического регулирования возбуждения, использующей преобразование Парка-Горева при формировании сигналов датчиков токов статора.

При анализе работы синхронного генератора может быть удобнее применение уравнения состояния Iab , составленное относительно непреобразованных фазных токов статора. Они могут быть получены из уравнения состояния пре-

дыдущей модели. Так, с учётом (3), (2) и использованием правила дифференцирования сложных функций имеем

$$\frac{d}{dt} I_{dqf} = \frac{d}{dt} \left(A_{dqf} I_{abf} \right) = A_{dqf} \frac{d}{dt} I_{abf} + \left(\frac{d}{dt} A_{dqf} \right) I_{abf} .$$

При подстановке этого выражения в (10) и выполнении ряда математических операций получаем уравнение состояния относительно независимых преобразованных токов обмоток синхронного генератора:

$$\frac{d}{dt} I_{abf} = L_{\theta abf}^{-1} \left(E_{abf} - (\omega_r L_{\omega abf} + R_{abzf}) I_{abf} - U_{x.abf} \right), \quad (11)$$

$$\text{где } I_{abf} = A_{dqf}^{-1} I_{dqf} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_f \end{bmatrix}, E_{abf} = A_{dqf}^{-1} E_{dqf} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e_f \end{bmatrix}, U_{x.abf} = A_{dqf}^{-1} \begin{bmatrix} U_{x.dq} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{dqf} = \begin{bmatrix} A_{dq} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

используются матрицы индуктивностей, зависящие от угла поворота ротора:

$$L_{\theta abf} = \begin{bmatrix} (l_m + l_s) & 0 & l_m \cos \theta_r \\ 0 & (l_m + l_s) & -l_m \cos(\theta_r + \pi/3) \\ 2l_m/\sqrt{3} \sin(\theta_r + \pi/3) & 2l_m/\sqrt{3} \sin \theta_r & (l_m + l_f) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$L_{\omega.abf} = l_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin \theta_r \\ 0 & 0 & \sin(\theta_r + \pi/3) \\ 2/\sqrt{3} \cos(\theta_r + \pi/3) & 2/\sqrt{3} \cos \theta_r & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

а диагональная матрица активных сопротивлений не меняется при переходе из области преобразованных величин к фазным преобразованным:

$$R_{abf} = A_{dqf}^{-1} R_{dqf} A_{dqf} = R_{dqf} . \quad (15)$$

Можно отметить, что затраты машинного времени на интегрирование уравнений модели Iab (11) и (7) практически не отличаются от затрат ранее рассмотренных моделей, хотя здесь предусматривается вычисление обратной матрицы $L_{\theta abf}$ при каждом обращении к расчёту правых частей уравнения состояния (11).

Уравнение состояния относительно преобразованных потокосцеплений в модели Ψab получается путём подстановки в (1) соотношений (12). Получается известное уравнение электрического равновесия цепей обмоток, согласующееся с законом электромагнитной индукции:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{abf} = E_{abf} - R_{abf} I_{abf} - U_{x.abf} , \quad (16)$$

$$\text{где } I_{abf} = L_{abf}^{-1} \Psi_{abf} .$$

В рассмотренных моделях фигурируют только выбранные независимые токи, напряжения и потокосцепления, тогда как при подключении выпрямителя зажимам обмоток потребуется формировать уравнения с учётом переключений вентилями фаз статора. К тому же в процессе работы вентильной схемы происходит периодическое нарушение симметрии цепи статора. Так, на интервалах работы пары вентилях в противоположных плечах один и тот же ток протекает по обмоткам двух фаз, а третья фаза находится в режиме холостого хода. На интервале коммутации две фазы закорачиваются вентилями.

Становится необходимым включение в расчётную схему сразу всех трёх фаз и, кроме того, учёт магнитных связей обмоток статора по основному потоку намагничивания. На рис. 1 приведена схема, согласующаяся с ранее выведенными уравнениями и в то же время, учитывающая все обмотки статора, как на принципиальной схеме. Уравнение напряжений ветвей этой схемы, полученное по законам электромагнитной индукции и закону Ома, вместе с уравнением равновесия цепи возбуждения составляет систему исходных уравнений модели $Iabc$:

$$U_{abc} = \frac{d}{dt} \Psi_{abc} + R_{abc} I_{abc} + H_s U_x, \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_f = e_f - r_f i_f,$$

где $U_{abc} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$, $\Psi_{abc} = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$, $I_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$.

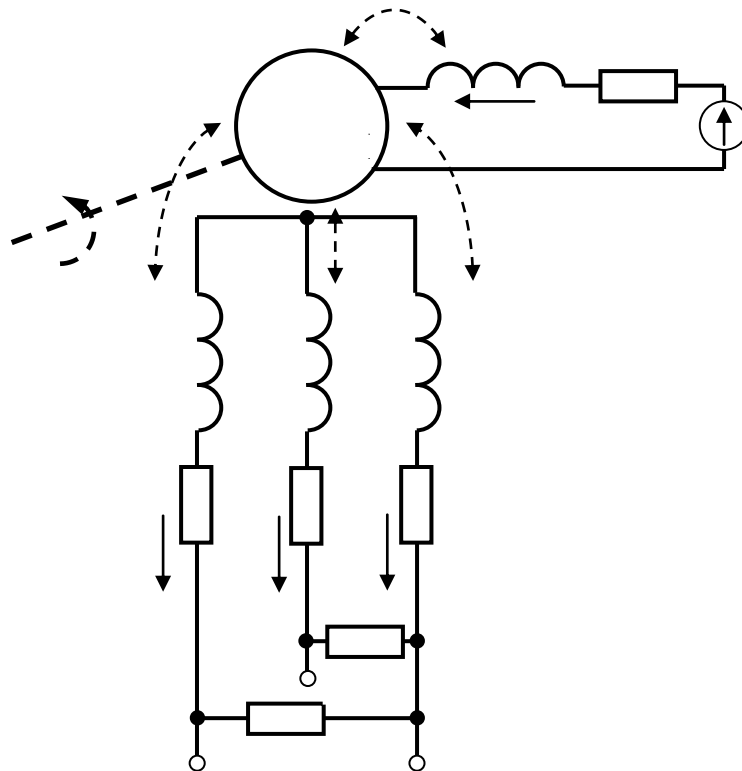


Рис. 1. Схема замещения цепей синхронного генератора

От матриц индуктивностей (13), (14), отражающих электромагнитное взаимодействие обмоток в эквивалентной двухфазной схеме, можно корректно перейти к аналогичным матрицам трёхфазной схемы (рис. 1):

$$L_{\theta.sf} = \begin{bmatrix} l_s + l_m & l_m & l_m & l_m \cos \theta_r \\ l_m & l_s + l_m & l_m & -l_m \cos(\theta_r + \pi/3) \\ l_m & l_m & l_s + l_m & -l_m \cos(\theta_r - \pi/3) \\ l_m \sin \theta_r - l_m \sin(\theta_r + \pi/3) - l_m \sin(\theta_r - \pi/3) & (l_s + l_m) & & \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$L_{\omega.sf} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -l_m \sin \theta_r \\ 0 & 0 & 0 & l_m \sin(\theta_r + \pi/3) \\ 0 & 0 & 0 & l_m \sin(\theta_r - \pi/3) \\ l_m \cos \theta_r - l_m \cos(\theta_r + \pi/3) - l_m \cos(\theta_r - \pi/3) & 0 & & \end{bmatrix} \quad (19)$$

На основе применения метода контурных токов выводится уравнение состояния цепей обмоток модели $Iabc$:

$$\frac{d}{dt} I_{h.sf} = L_{h.sf}^{-1} (H_{sf} E_{sf} - \omega_r L_{\omega.sf} I_{h.sf} - R_{h.sf} I_{h.sf} - U_{hx}), \quad (20)$$

где $L_{h.sf} = H_{sf} L_{\theta.sf} H'_{sf}$, $L_{\omega.sf} = H_{sf} L_{\omega.sf} H'_{sf}$, $R_{h.sf} = H_{sf} R_{szf} H'_{sf}$,

$$H_{sf} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad I_{sf} = \begin{bmatrix} I_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = H'_{sf} I_{h.sf}, \quad E_{sf} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ e_f \end{bmatrix},$$

$$U_{sf} = \begin{bmatrix} U_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = L_{\theta.sf} \frac{d}{dt} I_{h.sf} + \omega_r L_{\omega.sf} I_{sf} + \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & r_f \end{bmatrix} I_{sf} + \begin{bmatrix} H'_{s} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} E_x - E_{sf}.$$

В схеме (рис. 1) к зажимам обмотки статора искусственно подключены резисторы связи [4] – активные сопротивления большой величины. Они позволяют установить подключение схемы выпрямителя и нагрузки (рис. 2) к синхронному генератору.

Токи резисторов связи вычисляются в соответствии с первым законом Кирхгофа как суммы соответствующих токов фаз статора и диодов и используются для определения напряжений между зажимами статора:

$$I_x = \begin{bmatrix} i_a - \sigma_1 i_1 + \sigma_4 i_4 \\ i_b - \sigma_3 i_3 + \sigma_6 i_6 \end{bmatrix} = I_{ab} + K_{\sigma v} I_v, \quad (21)$$

$$U_x = r_x I_x.$$

где условно введена коммутационная функция $K_{\sigma v}$, позволяющая проводить вычисления токов по формальным значениям σ функций вентилях, принимающих значения: 1 – для открытого состояния и 0 – для закрытого. Процедура по-

лучения таких функций может быть алгоритмической с анализом конфигурации схемы, либо с применением списков, в которых представляются комбинации значений переменных и топологических данных, отражающих возможные переключения в схеме.

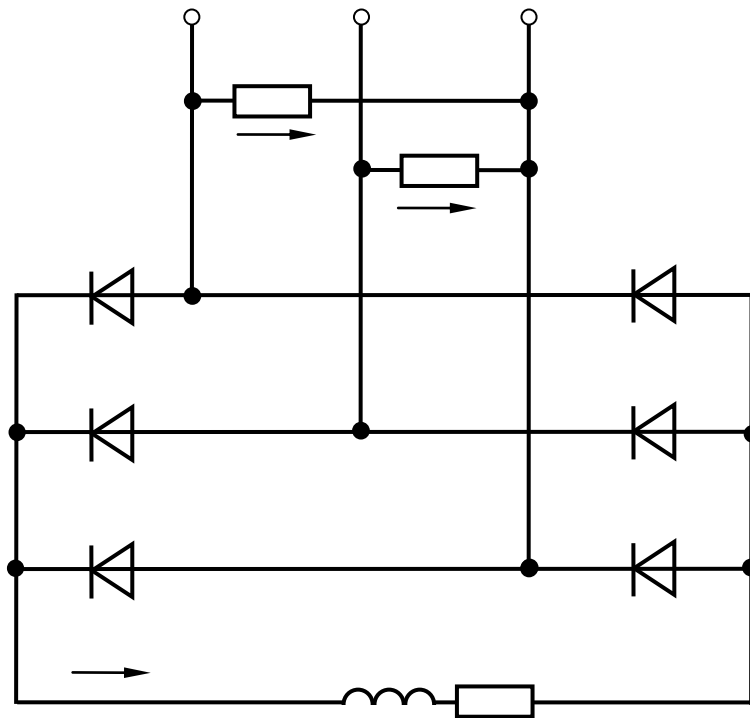


Рис. 2. Схема подключения выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой к зажимам статора генератора

Уравнение состояния цепи нагрузки формируется с применением коммутационной функции $K_{\sigma z}$, определяющей схему подключения резисторов связи к зажимам этой цепи:

$$\frac{di_z}{dt} = \frac{1}{l_z} (K_{\sigma z} U_x - r_z i_z). \quad (22)$$

Режим функционирования схемы статора генератора и нагрузки представляет собой циклический процесс чередования интервалов проводимости двух вентилях в противоположных плечах схемы выпрямителя и интервала коммутации, когда в одном плече открыты два вентиля, а в другом – один. Окончание первого интервала определяется переходом в положительную область напряжения $u_{k.v0}$ очередного вступающего в работу диода. Окончание второго интервала (коммутации) можно фиксировать по переходу через ноль тока $i_{k.s0}$ фазы, соответствующей закрывающемуся диоду. При сравнительно малом числе вариантов сочетаний открытых и закрытых вентилях несложно устанавливать как номера $k.v0$, $k.s0$ коммутируемых вентилях, так и значения коммутационных функций.

Существенной особенностью функционирования обмоток генератора при работе на выпрямитель является изменение сочетаний работающих фаз и числа

работающих контуров. Можно не менять число работающих контуров, учитывая постоянное присоединение резисторов связи к зажимам статора. Тогда совместное интегрирование уравнений (7), (20) и (22) с учётом (21) позволяет определить протекание переходного процесса в системе «синхронный генератор - выпрямитель-нагрузка» на интервале между соседними переключениями диодов. Воспроизведение периодически повторяющейся последовательности интервалов позволяет представить протекание квазиустановившегося режима работы этой системы.

Некоторым недостатком предлагаемого метода является увеличение затрат времени на интегрирование уравнений состояния из-за наличия в уравнениях коэффициентов, обусловленных большими величинами искусственных сопротивлений связи, отличающимися на несколько порядков от сопротивлений рабочих цепей. Это легко устраняется введением несложных процедур преобразования уравнений (20) и (21) в соответствии со значениями σ -функций вентиляей.

Для проверки адекватности моделей воспроизведён ряд статических режимов работы синхронного генератора экспериментальной установки (рис. 3) мощностью 1,25 кВА с выпрямительной нагрузкой.



Рис. 3. Внешний вид электромашинного агрегата экспериментальной установки

Параметры узлов экспериментальной установки определили следующие основные базисные величины:

- амплитудные значения номинальных фазных напряжения и тока обмотки статора:

$$U_B = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 380 = 310,3 \text{ В}; \quad I_B = \sqrt{2} \cdot 1,5 = 2,12 \text{ А};$$

- номинальное значение угловой частоты напряжения статора и единица измерения углов:

$$\omega_B = 2\pi 50 = 314,1593 \text{ рад/с}; \quad \theta_B = 1 \text{ рад}.$$

По основным базисным единицам рассчитываются производные базисные величины:

$$T_B = \frac{\Theta_b}{\Omega_b}, \quad T_B = \frac{1}{314,1593} = 3,183 \cdot 10^{-3} \text{ – время, с;}$$

$$\Psi_B = U_B T_B, \quad \Psi_B = 310,3 \cdot 3,183 \cdot 10^{-3} = 0,99 \text{ – потокосцепление, В·с;}$$

$$L_B = \frac{\Psi_B}{I_B}, \quad L_B = \frac{0,99}{2,12} = 0,46 \text{ – индуктивность, Гн;}$$

$$R_B = \frac{U_B}{I_B}, \quad R_B = X_B = Z_B = \frac{310,3}{2,12} = 146 \text{ – сопротивления, Ом;}$$

$$P_B = \frac{3U_B I_B}{2}, \quad P_B = Q_B = S_B = \frac{3 \cdot 310,3 \cdot 2,12}{2} = 987 \text{ – мощности, Вт, В·А;}$$

$$\Theta_{rb} = \frac{\Theta_b}{Z_p}, \quad \Theta_{rb} = \frac{1}{3} = 0,33 \text{ – угол поворота ротора, рад;}$$

$$\Omega_{rb} = \frac{\Omega_b}{Z_p}, \quad \Omega_{rb} = \frac{314,1593}{3} = 104,72 \text{ – частота вращения ротора, рад/с;}$$

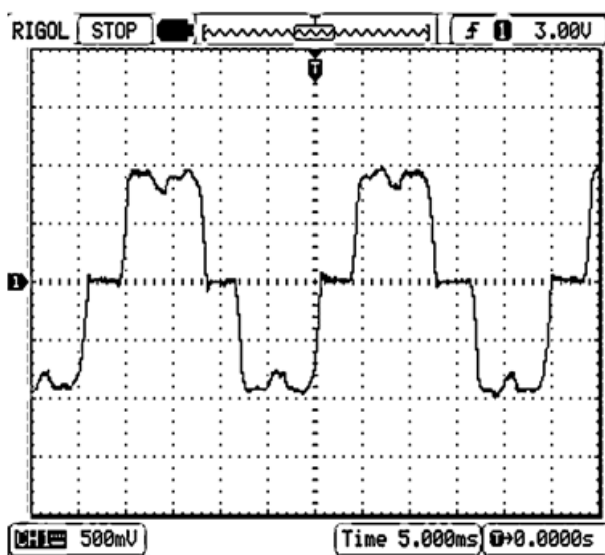
$$J_B = \frac{W_B}{\Omega_{rB}^2}, \quad J_b = \frac{3,13}{104,72^2} = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ – момент инерции, кг·м}^2;$$

$$M_B = \frac{P_B Z_B}{\Omega_B}, \quad M_B = \frac{987 \cdot 3}{314,1593} = 9,425 \text{ – электромагнитный момент, Н·м.}$$

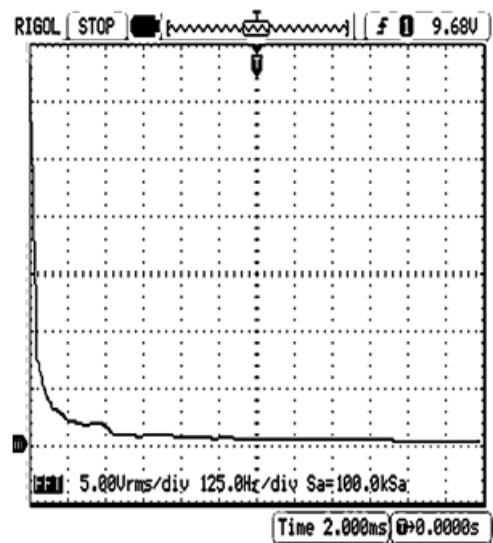
Параметры схемы замещения двигателя в относительных единицах, полученные делением абсолютных значений параметров на базисные:

$$r_s = \frac{R_1}{R_b} = \frac{4,67}{146} = 0,032; \quad l_s = \frac{X_s}{X_b} = \frac{6,72}{146} = 0,046;$$

$$l_m = \frac{X_m}{X_b} = \frac{235,5}{146} = 1,613; \quad l_f = l_s; \quad r_f = 1,3.$$



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы фазного тока статора (а) и спектра гармоник (б)

На рис. 4 приведена осциллограмма фазного напряжения статора при частоте вращения 40 Гц, номинальном возбуждении и подключении чисто активной нагрузки с получением действующего значения тока 2,25 А.

На рис. 5 приведены аналогичные данные, полученные в результате расчёта квазиустановившегося режима работы синхронного генератора на выпрямительную нагрузку с использованием модели $Iabc$, предусматривающей формирование уравнения состояния относительно фазных непреобразованных токов обмоток синхронного генератора.

Сопоставление экспериментальных и расчётных данных показывает их соответствие в пределах точности определения исходных параметров, что свидетельствует об адекватности предлагаемой модели и схемы замещения. Анализ, проведённый по ходу описания различных моделей, позволяет представить основные особенности известных моделей синхронного генератора и оценить возможности их применения в практических целях.

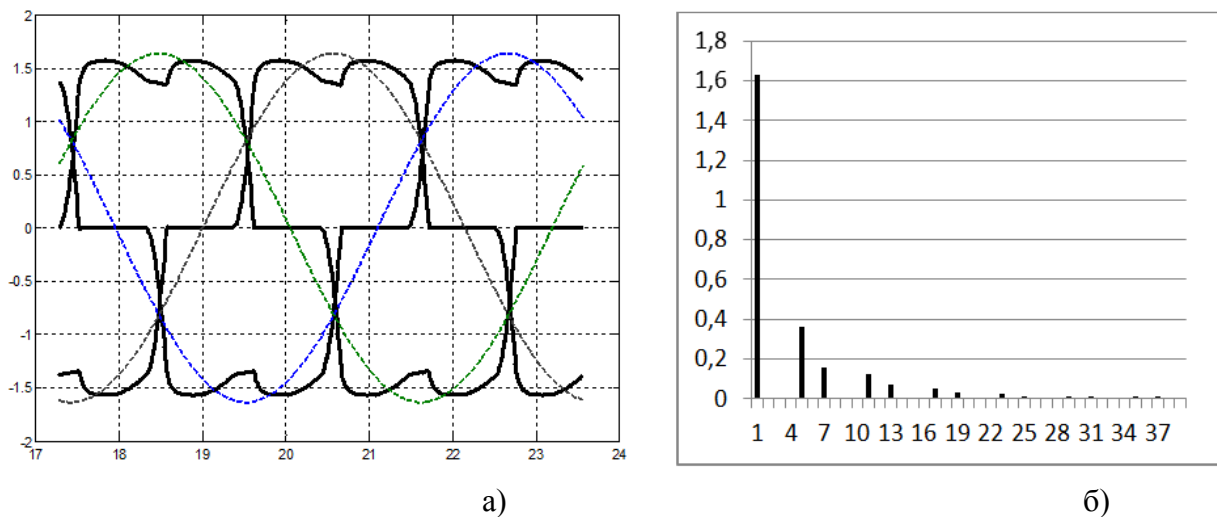


Рис. 5. Расчётная диаграмма фазных токов статора с их первыми гармониками (а), расчётный спектр гармоник фазного тока (б)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10026).

Библиографический список

1. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 551 с.
2. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос: учеб. пособие для студентов вузов (АВМ) – М.: Высш. школа, 1980. – 176 с.
3. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. пособие / И.П. Копылов. – М. Высш. шк., 1994. – 327 с.
4. Байков, А.И. Математическое моделирование элементов и систем автоматизированного электропривода: учеб. пособие / А.И. Байков; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2008. – 173 с.

УДК 621.313.1

П.Ю. ТУЗОВ, П.В. СОКУР

**ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ НА ГАЭС ГИДРОАГРЕГАТОВ
С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ**

ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Рассматриваются эффекты от применения на ГАЭС гидроагрегатов с переменной частотой вращения. Описаны принципы данных эффектов и их влияние на эксплуатационные и электротехнические режимы работы.

Ключевые слова: ГАЭС, генератор-двигатель, асинхронизированная машина, переменная частота вращения.

This article discusses the effects of doubly-fed generator-motor usage on pumped-storage plant. Principles of these effects operational and electrical operating conditions was described.

Key words: pumped-storage plant, generator-motor, doubly-fed machine, variable speed.

Наибольшее распространение на ГАЭС получила схема с двухмашинной компоновкой. Отличительной особенностью данного решения является то, что машина как в турбинном, так и в насосном режиме работает с одинаковой синхронной скоростью, выбранной на этапе проектирования. Данный компромисс приводит к работе с неоптимальным к.п.д. в ряде режимов. Помимо этого, при эксплуатации ГАЭС может возникать ряд технических ограничений, которые влияют на гибкость управления:

- невозможность регулирования активной мощности в насосном режиме;
- ограниченная скорость регулирования активной мощности;
- ограничение активной мощности режимами с повышенной вибрацией и кавитацией;
- изменение к.п.д. агрегата при изменениях напора;
- возможные нарушения динамической устойчивости при значительных возмущениях в энергосистеме.

Техническое развитие и снижение стоимости полупроводниковой техники делает все более доступным создание электрических машин с регулируемой скоростью вращения на основе преобразователей частоты. Данную технологию можно эффективно использовать на ГАЭС. Перевод турбины в режим работы с переменной частотой вращения позволяет улучшить экономические и технические характеристики агрегатов ГАЭС, а также снабдить их новыми возможностями.

Как показывает мировой опыт, наиболее целесообразным вариантом гидрогенератора с регулируемой частотой вращения для нужд ГАЭС является асинхронизированный генератор-двигатель (АСГД), представляющий собой асинхронную машину с расположением преобразователя частоты в цепи трехфазного шихтованного неявнополюсного ротора.

Регулирование частоты вращения таких агрегатов осуществляется за счет возбуждения генератора переменным током, при этом частота вращения ротора является суммой частот вращения самого ротора и вращения поля системы возбуждения.

Так как АСГД является машиной двойного питания, через обмотку ротора и преобразователь частоты осуществляется обмен с сетью активной мощностью, пропорциональной скольжению, поэтому мощность преобразователя АСГД должна быть также пропорциональна скольжению.

Проведенные исследования и анализ зарубежного опыта показывают, что требуемый диапазон регулирования частоты вращения лежит в пределах $\pm 10\%$ от синхронного значения.

Рассмотрим задачи, для решения которых может эффективно применяться АСГД.

Увеличение к.п.д.

Повышение эффективности генерирующего оборудования является актуальным направлением для ГАЭС, оснащенных обратимыми гидроагрегатами.

Это объясняется тем, что:

- во-первых, у ГАЭС, как правило, широкий диапазон изменения напоров;
- во-вторых, при конструировании обратимых гидромашин невозможно обеспечить оптимальный к.п.д. как для насосного, так и для турбинного режимов работы.

Для обратимых гидроагрегатов ГАЭС несовпадение максимумов к.п.д. в насосном и турбинном режимах является специфичным.

Применение переменной частоты вращения позволяет для каждого из режимов работы гидроагрегата регулировать скорость вращения таким образом, чтобы обеспечивать максимально возможный к.п.д.

Применение АСГД позволяет повысить к.п.д. гидроагрегата как в генераторном, так и насосном режимах:

- при изменении напора;
- регулировании активной мощности ГАЭС в соответствии с графиком нагрузки.

Мобильное регулирование активной мощности

В синхронном генераторе изменение активной мощности, выдаваемой в сеть, может осуществляться только регулированием мощности турбины. Скорость изменения электрической активной мощности определяется скоростью управления направляющим аппаратом турбины.

У АСГД за счет особенностей конструкции, асинхронизированного принципа управления и возбуждения переменным током имеется возможность управления электрической активной мощностью независимо от механической мощности при изменении частоты вращения в определенных пределах. При этом достигается практически мгновенное регулирование активной мощности, отдаваемой (потребляемой) в сеть. При таком регулировании изменение электромагнитной мощности статора машины существенно опережает изменение

механической мощности, поступающей от турбины. Возникающий при этом небаланс электромагнитного и механического моментов на валу агрегата приводит к торможению/ускорению агрегата, т.е. мощность, необходимая для ускорения регулирования электрической активной мощности АСГД, покрывается за счет изменения кинетической энергии вращающихся масс ротора.

Быстродействующее регулирование активной мощности АСГД может быть реализовано как в турбинном, так и в насосном режиме.

Быстродействие электромагнитного регулирования активной мощности АСГД составляет доли секунды, тогда как для управления направляющим аппаратом гидромашины требуется 10–20 с.

При испытаниях агрегата ГАЭС Ohkawachi на скорость реакции АСГД в генераторном режиме изменение мощности со 128 до 160 МВт произошло за время, несколько меньше 0,2 с. При этом частота вращения агрегата снизилась с 335,2 до 330,7 об/мин за время около 2,0 с, а затем под действием регулятора скорости турбины вернулась к прежнему значению за время около 20 с (с учётом колебаний), при этом открытие затвора увеличилось с 43,7 до 51,4% [1].

Изменение механической мощности турбины в конце цикла наброса мощности, отдаваемой в сеть, происходит за счет изменения открытия направляющего аппарата.

Аналогичные показатели динамических способностей достигаются и в насосном режиме.

Проверка эффективности АРЧМ с помощью одного из агрегатов ГАЭС Окавахи была проведена при суммарной нагрузке в энергосистеме 11 000 МВт и мощности регулирующих блоков 160 МВт. В первом опыте регулирующая мощность образовывалась тепловыми и гидравлическими блоками обычных станций, во втором – 80 МВт из 160 составляли обратимые гидроагрегаты ГАЭС Окавахи с АСГД. В первом опыте вероятность сохранения частоты в пределах $60 \pm 0,1$ Гц была 96,8 %, во втором (при участии в регулировании АСГД) – 99,9 % [2].

Системным оператором Единой энергетической системы предусмотрена услуга по нормированному первичному регулированию частоты, в рамках которой подразумевается выделение электростанцией семи процентов мощности для осуществления быстродействующего регулирования. Оплата осуществляется по плановому объёму предоставления данной услуги.

Блоки ГАЭС с АСГД имеют преимущество перед блоками с СГД в части участия в НПРЧ за счет возможности регулирования активной мощности в насосном режиме. В генераторном режиме их возможности сопоставимы.

Регулирование мощности в насосном режиме

На рис. 1 представлена характеристика насосного режима для ГАЭС Ягисава №2, Япония [2]. При постоянной частоте вращения $n = 140$ об/мин и оптимальном открытии направляющего аппарата напор и расход имеют однозначное соответствие. Регулирование частоты вращения насоса приводит к смещению рабочей характеристики влево при уменьшении частоты вращения и вправо – при увеличении частоты вращения. В результате появляется возможность

регулирования мощности насоса при одном и том же значении напора. Диапазон регулирования активной мощности отмечен штриховкой.

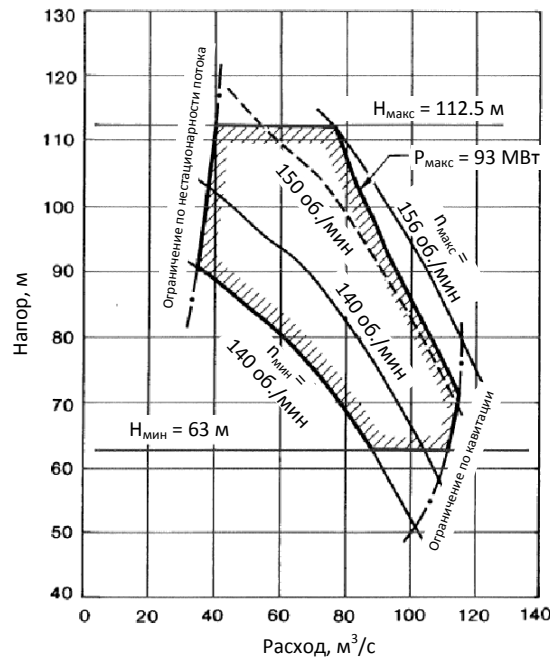


Рис. 1. Работа гидроагрегата ГАЭС Ягисава №2 в насосном режиме

Расширение диапазона работы при частичных нагрузках

Рассмотрим возможность изменения диапазона работы обратимой гидромашины РОНТ-115, имеющую запретную зону повышенных гидродинамических пульсаций при частичных нагрузках при помощи АСГД [3].

В исходном режиме при минимальном напоре $H=90$ м гидроагрегат работает с синхронной частотой вращения $n=150$ об/мин. При мощности $N=110$ МВт и синхронной частоте вращения гидромашина оказывается в «запрещенной» зоне. Снижением частоты вращения машины на $\Delta n=5,3\%$ до $n=142$ об/мин можно обеспечить работу турбины или на частичной мощности при сохранении исходного приведенного расхода $Q'_1=408,5$ л/с, или с сохранением исходной мощности $N=110$ МВт при том же напоре $H=90$ м.

Выход из «запрещенной» зоны в рассматриваемом случае осуществляется через правую границу «запрещенной» зоны, при этом снижается частота вращения агрегата и повышается к.п.д.

Возможны такие режимы работы гидромашины, когда выход из «запрещенной» зоны удобнее осуществлять через левую границу, тогда потребуется увеличить частоту вращения агрегата, при этом к.п.д. агрегата уменьшится.

Снижение кавитации

Рассмотрим возможность улучшения условий работы гидромашины по кавитации на примере Чиркейской ГЭС.

Гидромашина имеет следующие параметры: тип турбины РО 230-В-450; мощность 250 МВт; диаметр рабочего колеса $D_1=4,5$ м; синхронная частота

вращения $n_c = 200$ об/мин. Рабочие значения напоров: $H_{\max} = 207$ м; $H_{\text{расч}} = 170$ м; $H_{\min} = 154$ м.

Параметры режима приведены в табл. 1. Пусть в исходном режиме гидроагрегат работает в точке 1. При снижении частоты вращения до 186,6 об/мин к.п.д. турбины увеличивается на 1% и становится равным 95%.

Таблица 1

Режимы работы гидромашин

Точка	N , МВт	H , м	Q' , л/с	n' , об/мин	n , об/мин	η , %	σ
1	203	169	495	69.2	200	94	0,048
2	205		495	64.6	186.6	95	0,0395

При этом коэффициент кавитации снижается до значения $\sigma = 0,0395$. Снижение коэффициента кавитации на величину $\Delta\sigma = 0,0085$ приводит к увеличению запаса по высоте отсасывания $\Delta H_s = \Delta\sigma \cdot H = 1,45$ м.

Статическая и динамическая устойчивость

Кроме оптимизации режимов работы гидротурбины, АСГД также может существенно улучшить электротехнические показатели ГАЭС.

В синхронном генераторе потеря динамической устойчивости при ускорении ротора в результате КЗ обусловлена наличием у СГД угловой характеристики активной мощности. При увеличении длительности КЗ возрастает угол выбега ротора. Предел устойчивости наступает тогда, когда достигается предельный угол, при котором, даже с учетом форсировки тока возбуждения, не удастся обеспечить электромагнитный момент, достаточный для торможения ротора. Запас по углу выбега уменьшается по мере перехода в режимы недо возбуждения, так как увеличивается начальный угол нагрузки.

У АСГГ с переменной частотой вращения угловые характеристики активной мощности отсутствуют. Система возбуждения и асинхронизированный принцип управления обеспечивают нормальную работу АСГГ во всем рабочем диапазоне частот. В результате возмущение, которое для СГГ является предельным, для АСГГ проходит практически незаметно.

Потеря динамической устойчивости АСГГ при КЗ может быть обусловлена только достижением предельной величины скольжения. При КЗ скольжение нарастает пропорционально длительности возмущения, поэтому при начальном нулевом скольжении предельная длительность КЗ для АСГГ в рассмотренном случае составляет около 1 с и практически не зависит от режима по реактивной мощности.

Выводы

Гидроагрегаты с переменной частотой вращения могут эффективно применяться на ГАЭС и существенно улучшать как стационарные, так и системные показатели, о чем свидетельствует всё большее распространение агрегатов такого типа в мире.

АСГД с регулируемой частотой вращения позволяет:

- повысить к.п.д. гидроагрегата;

- участвовать электростанции в нормированном первичном регулировании как в насосном, так и в турбинном режиме;
- осуществлять регулирование мощности в насосном режиме;
- уменьшить запрещенные зоны при частичных нагрузках;
- снизить кавитационные эффекты гидроагрегата;
- осуществлять быстродействующее регулирование активной мощности независимо от регулирования открытия направляющего аппарата;
- повысить статическую и динамическую устойчивость энергосистемы.

Библиографический список

1. **Kuwabara, T.** Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawachi Power Station / T. Kuwabara [et al.] // IEEE Transactions, Energy Conversion. 1996. 11. № 3. P. 376–384.
2. Technical Analysis of Pumped Storage and Integration with Wind Power in the Pacific Northwest. Final Report. Prepared by MWH, August 2009.
3. **Абубакиров, Ш.И.** Оптимизация работы гидротурбины посредством применения переменной частоты вращения / Ш.И. Абубакиров [и др.] // Гидротехническое строительство. 2013. №2.

УДК 62-52-83:656.56

А.С. ХЛЫНИН

КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫМИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИМИ АГРЕГАТАМИ

ОАО «Гипрогазцентр»

Статья посвящена проблеме повышения энергоэффективности электроприводных газоперекачивающих агрегатов за счет применения современных систем автоматического регулирования скорости вращения двигателя. В статье предлагается структура комбинированной системы автоматического регулирования, инвариантная к детерминированным и стохастическим действующим факторам.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, электропривод, система автоматического регулирования, регрессионные алгоритмы.

The article is devoted to the problem of advance in the energy efficiency of electric drive gas compressors by using modern rotation speed automatic regulation systems. As solvation author propose combined automatic regulation system structure, invariant to determine and stochastic acting factors.

Key words: gas compressor, electric drive, automatic regulation systems, regression algorithms.

Газоперекачивающие агрегаты (ГПА) являются одним из ключевых элементов трубопроводной системы транспорта газа [1].

Общее количество ЭГПА на объектах транспорта газа ОАО «Газпром» составляет 695 единиц установленной мощностью около 5746,3 МВт.

Основная масса парка ЭГПА ОАО «Газпром» эксплуатируется уже более 20 лет, и свыше 50% из них имеют наработку и срок службы, превышающие критические показатели или близкие к ним. Устаревшие технологии действующих ЭГПА не позволяют им эффективно и надежно функционировать в условиях переменных режимов работы газопроводов.

Решением данных проблем является применение современного поколения ЭГПА с частотным регулированием работы электропривода.

Применение ПЧ для пуска и плавного автоматического регулирования скорости привода позволяет:

- реализовать энергосберегающие режимы за счет точного регулирования;
- повысить показатели надежности агрегатов, увеличить их ресурс и уменьшить затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Широкое распространение ЭГПА с ЧРП требует создания систем автоматического регулирования (САР) скоростью вращения электропривода, учитывающих все технологические и внешние факторы, влияющие на режимы работы газоперекачивающего агрегата.

Использование таких САР позволяет с высокой точностью определять необходимую скорость вращения электропривода ГПА и поддерживать высокие энергетические характеристики работы.

Комбинированная САР ЭГПА

В практике большинство ЭГПА функционирует в условиях, при которых момент нагрузки, скорость и многие технологические параметры не остаются постоянными, как принимается упрощенно в простейших локальных приводах, а значительно изменяются во времени. Это обусловлено как факторами технологического характера, так и иными внешними воздействиями, которые носят случайный характер.

Так как скорость вращения электродвигателя ЭГПА ω задается в условиях одновременного случайного изменения всех технологических и внешних параметров, для достижения требуемой производительности и выходных параметров газа необходимо:

- получить и обработать достоверную информацию с соответствующих датчиков в цикле с дискретностью порядка минуты;
- вычислить оптимальную (заданную) скорость вращения электродвигателя ЭГПА ω_3 по аналитическим регрессионным алгоритмам;
- скорректировать ω_3 с учетом стабилизирующего действия обратной связи по выходному давлению газа.

На рис. 1 приведена предлагаемая структура комбинированной системы автоматического регулирования (САР) скорости вращения электропривода ГПА, которая позволяет реализовать требуемый алгоритм управления.

Регрессионные алгоритмы расчета оптимальной скорости

Строятся на основе статистической информации о режимах работы ЭГПА и изменении всех действующих параметров.

Для обработки экспериментальных данных использована модель линейной регрессии в матричном виде

$$Y = X \cdot a + \zeta, \quad (1)$$

где Y – матрица выходных параметров системы (величины скорости вращения АЭП или технологических параметров); X – матрица входных воздействий (параметров задания и внешних возмущающих воздействий); a – параметры механизма преобразований в системе; ζ – матрица помех (неучтенных факторов).

На рис. 2 приведена общая функциональная схема взаимодействия переменных реального объекта. При этом входные переменные $x^{(p)}$ описывают условия функционирования и поэтому являются независимыми факторами-аргументами, предсказывающими (предикторными) и объясняющими поведение объекта.

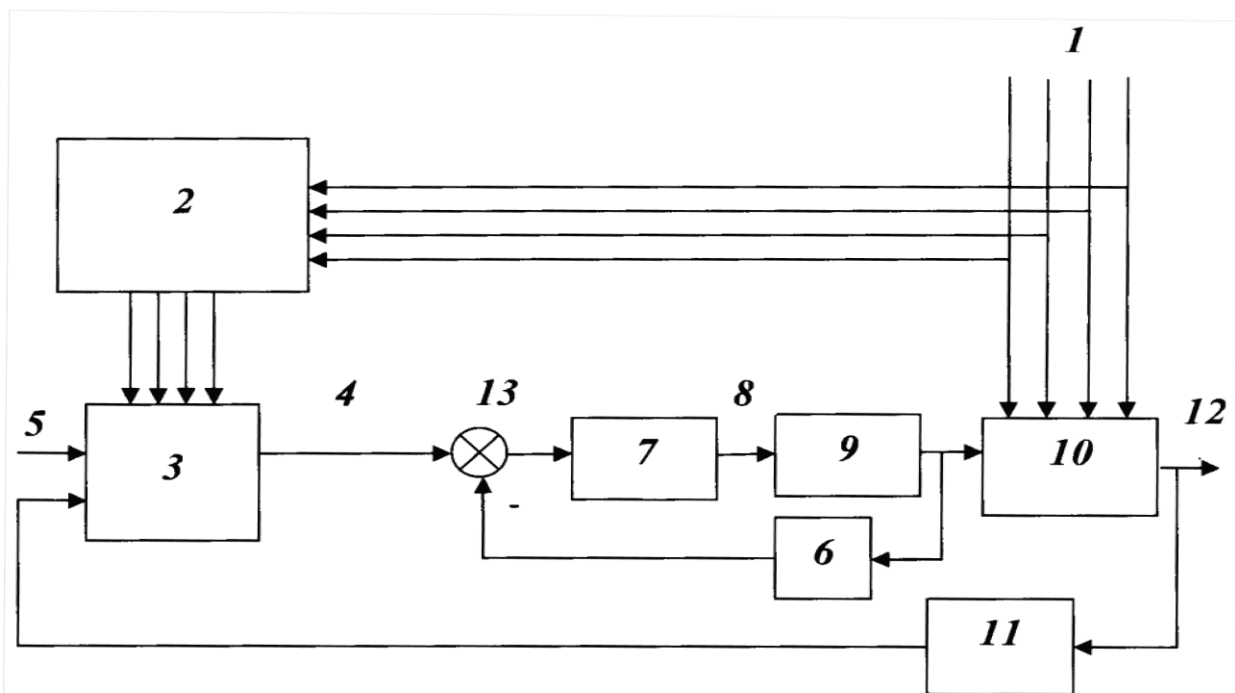


Рис. 1. Структура комбинированной системы управления частотно-регулируемого ЭГПА:

1 – внешние воздействия; 2 – датчики измерения внешних воздействий; 3 – блок расчета скорости вращения электропривода; 4 – сигнал задания скорости вращения; 5 – сигнал задания давления на выходе ЭГПА; 6 – датчик скорости; 7 – ПИ-регулятор; 8 – сигнал с ПИ-регулятора; 9 – электропривод ГПА; 10 – компрессор ГПА; 11 – датчик давления; 12 – давление газа на выходе ЭГПА; 13 – сумматор

Выходные переменные $y^{(n)}$ характеризуют результат (эффективность) функционирования объекта и представляют собой зависимые (эндогенные) результирующие отклики. Неучтенные остаточные компоненты $\zeta^{(m)}$ представляют собой случайные латентные (скрытые, не поддающиеся точному измерению) факторы, отражающие влияние второстепенных воздействий и случайных ошибок измерения. Тогда общая задача статистического исследования зависимостей (в терминах изучаемых показателей) формулируется следующим образом.

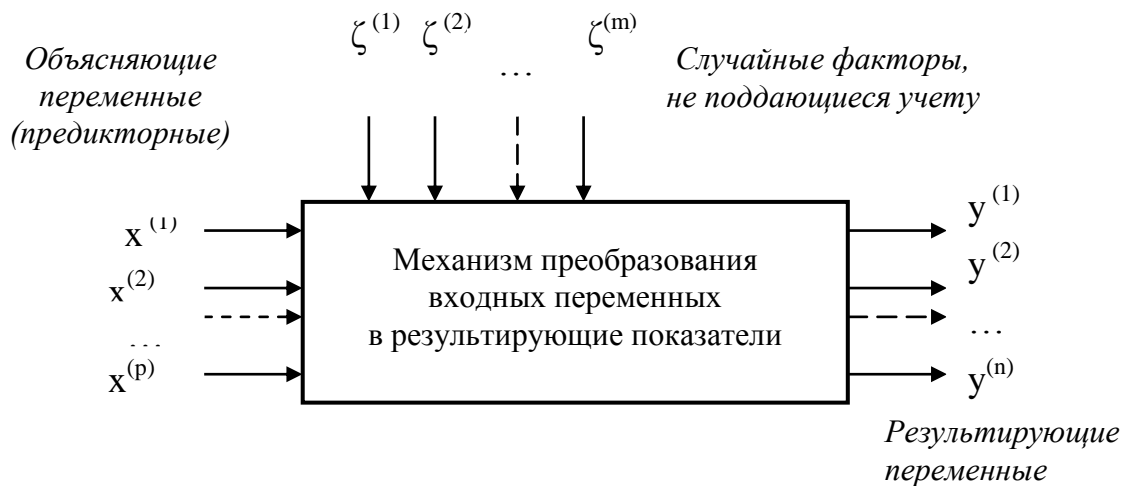


Рис. 2. Общая схема взаимодействия при статистическом исследовании

В качестве регрессионной модели работы ЭГПА принята линейная четырехфакторная модель вида

$$\omega = a_1 \Delta p + a_2 Q + a_3 t_r + a_4 \theta + \zeta \quad (2)$$

где ω – скорость вращения электропривода ЭГПА; Δp – перепад давлений на входе/выходе ЭГПА; Q – производительность ЭГПА по перекачиванию газа; t_r – температура газа на входе ЭГПА; θ – температура наружного воздуха; ζ – неучтенные факторы.

Параметры a_i находятся путем обработки экспериментальных данных с использованием средств MathCAD.

В результате расчетов получено следующее численное уравнение линейной регрессии:

$$\omega = 17,102 \cdot \Delta p + 55,048 \cdot Q + 55,94 \cdot t_r + 35,026 \cdot \theta + 9,602. \quad (3)$$

Полученное регрессионное уравнение позволяет решить сразу несколько задач:

- вычисление оптимальной скорости вращения электродвигателя ГПА, управление значениями скорости путем регулирования, что необходимо для реализации алгоритмов;
- выявление причинно-следственных связей между скоростью вращения и влияющими факторами для оптимизации алгоритмов управления.

Выводы

1. Для управления ЭГПА с ЧРП предложена комбинированная САР, позволяющая с высокой точностью обрабатывать все режимы работы газопровода с учетом основных технологических и внешних влияющих факторов.

2. В основу алгоритма работы предлагаемой САР положена регрессионная модель взаимосвязи основных параметров работы ЭГПА. В результате обработки ретроспективных статистических данных по режимам работы агрегата и изменении основных действующих факторов составлена линейная четырехфакторная регрессионная модель, позволяющая рассчитывать оптимальную скорость вращения электропривода.

Библиографический список

1. Электроприводы объектов газотранспортных систем: монография / А.Ф. Пужайло [и др.]; под ред. О.В. Крюкова. – Нижний Новгород: Исток, 2013. Т. 4. – 300 с.
2. **Захаров, П.А.** Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами / П.А. Захаров, О.В. Крюков, Д.А. Аникин // Труды XIII Международной конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-09 / НГТУ. Н.Новгород, 2009. С. 161–162.
3. **Аникин, Д.А.** Опыт проектирования систем управления ЭГПА / Д.А. Аникин [и др.] // Газовая промышленность. 2009. №2. С. 44–47.
4. **Крюков, О.В.** Регулирование производительности ГПА с помощью преобразователей частоты // Компрессорная техника и пневматика. 2013. №3. С. 21–24.
5. **Крюков, О.В.** Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градирнями // Электротехника. 2007. №11. С. 62–68.
6. **Kryukov, O.V.** Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering, March 2013. V. 84. Issue 3. P. 135–140.
7. **Kryukov, O.V.** Intelligent electric drives with IT algorithms // Automation and Remote Control, 2013. Volume 74. Issue 6. P. 1043–1048.

УДК 62-83:621.313

Т.Н. УСНУНЦ-КРИГЕР, А.Ю. СМИРНОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ
ВЕНТИЛЬНЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
НА ПУЛЬСАЦИИ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Предложен подход к определению оптимальных параметров магнитной цепи для минимизации пульсаций вращающего момента вентильных реактивных двигателей. Для определения пульсаций момента используются нормированные данные магнитной проводимости и силы, полученные из численного решения поля в области двухсторонней зубчатости воздушного зазора стандартных размеров. Установлено, что с ростом нагрузки (с увеличением МДС) происходит сдвиг диапазона минимальных пульсаций момента в сторону более высоких значений относительной, по отношению к воздушному зазору длины зубцового деления.

Ключевые слова: оптимальные размеры, вентильный реактивный двигатель, пульсации вращающего момента.

There is the approach to definition of the optimal parameters of the magnetic circuit to minimize torque ripple of switched reluctance motors (SRM). For definition of the torque ripple the normalized data of the magnetic wire-estate and power derived from the numerical solution of the field in the double-sided timing of the air gap in standard sizes are used. It was founded that with increasing load (with increasing MMF) there is a shift range of the minimum torque ripple in the direction of more, you have high values relative, in relation to the air gap length of perforated matter of.

Key words: optimum geometry, switched reluctance motor, torque ripple.

Для снижения пульсаций вращающего момента ВРД существует два различных подхода: один состоит в определении геометрических размеров электродвигателя, которые уменьшают пульсации вращающего момента [1]; другой метод для получения того же результата предполагает управление током двигателя [2].

Среди первой группы исследований заслуживают внимание методы, в соответствии с которыми используются данные намагниченности, полученные из численного решения. На примере четырёхфазного двигателя, сделан вывод, что удвоение количества полюсов в фазе обмотки статора позволяет уменьшить пульсации момента [3]. Вывод основан на результатах моделирования и может быть обусловлен для конкретного соотношения ширины зубца и шага зубца ротора (b/t_z). В [4] сравниваются пульсации вращающего момента, полученные для трехфазных двигателей с одним зубцом на полюс и несколькими зубцами на полюс, для двух различных отношений b/t_z . Оценивалась также возможность формирования тока возбуждения, чтобы свести к минимуму пульсаций.

В современной научной литературе обсуждаются различные аспекты пульсаций крутящего момента в ВРД, ни один из них не дает общее представление о влиянии различных параметров на реально рассчитанные пульсации момента.

Вполне очевидна необходимость проведения исследований, которые дают общее представление о эффектах основных параметров на пульсации вращающего (крутящего) момента. Однако определение оптимальных размеров, которые минимизирует пульсации крутящего момента, является чрезвычайно сложной задачей и требует прогнозирования характеристики двигателя для всей магнитной цепи в течение конкретного рабочего состояния. Отчасти по этой причине больше исследований в литературе встречается по минимизации колебаний момента для известной геометрии через формирование фазного тока [5].

В статье представлен общий подход к проблеме влияния параметров магнитной цепи на пульсации момента, которые могут изменяться в широком диапазоне путём использования системы относительных единиц. Вращающий определяется для магнитной цепи, содержащей двойной полюсный выступ (один на статоре и один на роторе) в функции в МДС и смещения от соосного положения между ними.

Пульсации момента зависят от скорости вращения, поэтому они должны быть определены в соответствии с режимом работы двигателя. ВРД как правило, имеют три режима работы; низкая скорость (где считается, что ток фазы, волной квадратной формы), текущий режим на средних скоростях и высокоскоростной режим, где ток фазы зависит от многих переменных, таких как противостоит – ЭДС.

Для того чтобы заранее определить величину пульсаций крутящего момента, должны быть рассмотрены текущие формы сигнала, а также статические характеристики вращающего момента двигателя. Эффект от пульсаций является наиболее значимым при низких скоростях, где колебания вращающего момента существенно влияют на мгновенную скорость вала. На более высоких скоростях, инерция ротора помогает уменьшить эти изменения скорости и, следовательно, вибрации. На самых низких рабочих скоростях текущая форма сиг-

нала почти прямоугольная, таким образом, наращивание тока до номинального уровня занимает незначительную часть времени возбуждения.

Можно предположить, что при прямоугольной форме тока в фазах, соответствующих включённому и выключенному их состоянию, фазы включаются и выключаются на позициях ротора (x), соответствующих точкам пересечения статических характеристик рис. 1.

Отношение максимального значения статического крутящего момента "пика статического момента" T_{\max} и минимального значения T_{\min} , которое получается в точке пересечения двух статических характеристик, смещённых относительно друг друга на полупериод, протяжённость которого определяется числом зубцов (полюсных выступов) сердечника без МДС, т.е. ротора. Пульсации момента в процентах можно определить следующим образом:

$$\text{Пульсации} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Процесс минимизации пульсаций момента требует построения множества статических характеристик. Однако их определение у ВРД является весьма сложной задачей, поскольку требует расчёта поля при различных положениях ротора, что затрудняет непосредственное использование метода конечных элементов.

Для упрощения задачи может быть использован метод прогнозирования кривых статического момента и магнитной проводимости [6]. Он основан на предварительно определённых данных магнитной проводимости и силы, которые численно рассчитаны [7] на единицу длины с одинаковой геометрией (для ротора и статора). Асимметричная магнитная цепь (рис. 2, а) представляется двумя симметричными, с пазами, сформированными в соответствии с рис. 2, б, в.

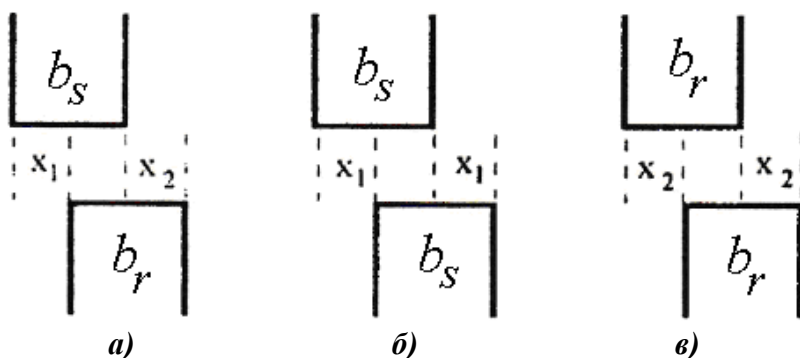


Рис. 2. Представление асимметричной геометрии зубцов с пазами в виде составляющих с симметричными пазовыми областями

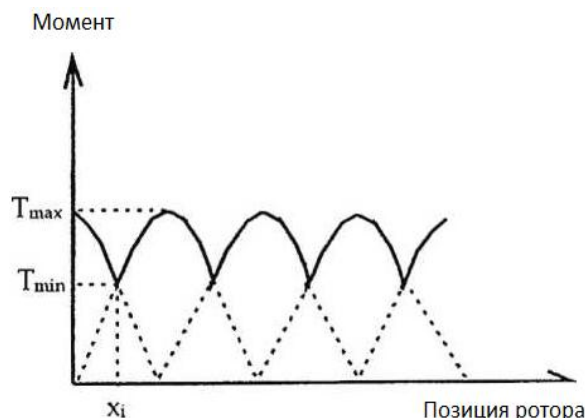


Рис. 1. Характеристика пульсаций крутящего момента на низких скоростях

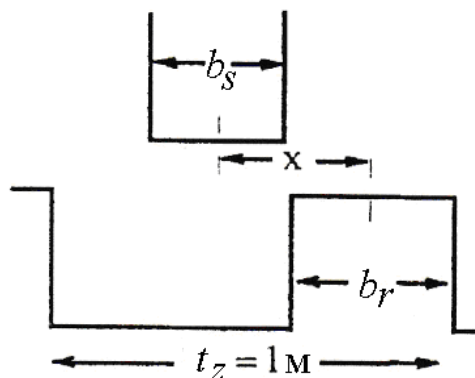


Рис. 3. Нормализованный блок двойной зубчатости ВРД

поток шага зубцов/ширина зубца), положение (x) представлены в нормированном виде. Диапазон для данных, составляет

$$0 < x_n < 1; b/t_z = (0,3 \div 0,5); t_z/\delta = (40 \div 250), x_n = 2x/t_z.$$

Кроме того, шаг зубца ротора (t_z) структуры, для которой имеются данные, использован для пересчёта силы и проницаемости (рис. 3) на размер 1 м высоты зубца и 1 м осевой длины L_0 .

Эту структуру можно назвать нормализованным блоком двойной зубчатости (НБДЗ). Она может рассматриваться в качестве макета любого другого полюсного выступа (зубцового деления) с такими же размерами нормированных размеров в поперечной плоскости путём их масштабирования как в тангенциальном, вдоль зазора, направлении $1/t_z$, так и в осевом направлении $1/L_0$.

Магнитные величины: индукция B и напряжённость H масштабируются следующим образом:

$$F_0 = t_z c, \quad \Phi_0 = t_z L_0 B_u. \quad (3)$$

В этих уравнениях, t_z и L_0 являются размерами заданной геометрии, F_0 , и Φ_0 - соответствующие магнитные переменные, относящиеся к ней; B_u и Φ_0 - МДС и поток возбуждения НБДЗ. Для НБДЗ создаётся база данных с математическим аппаратом интерполяции, которая возвращает силу (S) при вызове с параметрами t_z/δ , b_s/t_z , b_r/t_z , МДС, x_n , где x_n - расстояние между осями симметрии зубцов (полюсных выступов), отсчитываемое вдоль окружности зазора. Большинство значений параметров, встречающихся на практике, находится в следующих пределах:

$$40 \leq t_z/\delta \leq 250;$$

$$0,3 \leq b_s/t_z \leq 0,5;$$

$$0,3 \leq b_r/t_z \leq 0,5.$$

Для диапазона этих параметров осуществляется наполнение базы данных, значения электромагнитной силы для которой рассчитываются численными методами.

Используя описанный подход, описанный ранее и МДС сети для асимметричной структуры, становится возможным предварительно рассчитать кри-

Если сила (S) и проницаемость (P) из этих структур S_a, P_a и S_b, P_b , соответственно сила (S) и проницаемость (P) асимметричной, с различными геометрическими параметрами статора и ротора, структуры может быть представлена в следующем виде:

$$S = \frac{S_a + S_b}{2}, \quad P = \frac{P_a \cdot P_b}{P_a + P_b}. \quad (2)$$

Данные силы и проницаемости, используемые здесь являются функцией переменных: шаг зубцов (t_z), ширина зубца (b), длина воздушного зазора (δ), индукция (B_t ,

вые положения крутящего момента любой асимметричной, т.е. с различной шириной зубцов статора и ротора, геометрии. Следует отметить, что в данном подходе, область возбуждения исключается из расчетов. Это позволяет уменьшить число переменных проектирования.

Для того чтобы определить влияние переменных на пульсации вращающего момента при различных значениях МДС и упомянутых параметрах зубцовых зон, получают значения (1).

Очевидно, что с увеличением относительной длины зазора (с уменьшением значения параметра t_z/δ) пульсации момента снижаются, однако в ВРД зазор не может быть чрезмерно большими, как это допустимо в двигателях с постоянными магнитами, во избежание чрезмерного ухудшения удельных показателей по моменту и мощности.

Более интересным результатом является характер зависимости диапазона значений t_z/δ , при котором достигаются минимальные пульсации, от величины МДС, приложенной к НБДЗ. В результате численных экспериментов с созданной базой данных установлено, что происходит сдвиг диапазона минимальных пульсаций момента, около 10%, вычисленного по (1), в сторону более высоких значений t_z/δ с увеличением МДС. Область минимальных пульсаций момента начинается приблизительно с диапазона $t_z/\delta = 100-200$. Такой результат можно объяснить влиянием краевых эффектов под углами зубцов, обусловленных глубоким насыщением этих участков зубцов.

При проектировании двигателя МДС, приложенная к зазору в области зубцовой зоны, определяется уровнем линейной нагрузки, которая представляет собой ток обмотки якоря, приходящийся на единицу длины расточки статора.

Следовательно, если результаты, при той же расточке статора увеличение площади пазов под обмотку или плотности тока позволяет не только позволит повысить момент двигателя, но и снизить уровень пульсаций его момента.

Библиографический список

1. Funda Sahin. Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors / Funda Sahin, H. Bulent Ertan, Kemal Leblebicioglu // IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000. №1. С. 30–39.
2. **Уснунц-Кригер, Т.Н.** Модуляция тока фазы вентильного реактивного двигателя для минимизации пульсаций крутящего момента / Т.Н. Уснунц-Кригер [и др.] // Актуальные проблемы энергетики / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. С. 155–160.
3. Corda. Effects of the form of the magnetic circuits on torque pulsation of switched reluctance motors // International Conference on Electrical Machines, UK, 1990. С. 88–93.
4. **Wallace, S.** Three phase switched reluctance motor design to reduce torque ripple / S. Wallace, D. G. Taylor // Int. Con. on Electrical Machines, USA, Aug. 1990. С. 783–787.
5. **Смирнов, А.Ю.** Расчёт электромагнитного момента экранированной индукторной машины // Электротехника. 1993. №7. С. 34–37.
6. **Ertan, H. B.** Prediction of torque and permeance displacement characteristics of asymmetrical tooth pairs // Proc. ICSEM, Munich, Germany, Sept. 1986. С. 97–100.
7. **Домбровский, В.В.** Справочное пособие по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1983. – 256 с.

УДК 519.1: 621

Д.М. ШПРЕХЕР, Г.И. БАБОКИН, Е.Б. КОЛЕСНИКОВ

АДАПТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева

Решается задача построения адаптивной системы дистанционного контроля технического состояния многофакторного многопараметрического электромеханического комплекса. Разработано нейросетевое устройство, обеспечивающее заданную достоверность полученных данных функционирования электротехнического комплекса, путем изменения весовых функций нейронной сети.

Ключевые слова: контроль технического состояния, адаптация, нейронная сеть.

In the article the problem of constructing adaptive system for remote control of technical condition of multi-factor multi-parameter Electromechanical complex. Developed neural network device providing a predetermined reliability of the data of the functioning of electrical complex by changing the weighting functions of the neural network.

Key words: condition monitoring, adaptation, neural network.

Электротехнический комплекс (ЭТК) как объект контроля (ОК) технического состояния (ТС) в горной, перерабатывающей, химической и других отраслях представляет совокупность электротехнических устройств (трансформаторы, кабельная сеть, коммутационная аппаратура, электроприводы, включающие преобразователи, двигатели, редуктора, исполнительные органы), обеспечивающих энергопотоки для конкретного технологического процесса, характеризуется большим количеством технических параметров и параметров среды функционирования (рис. 1, а).

На рис. 1 обозначены 1, 2 – 1-й и N -й трансформатор; 3 – кабельная сеть; 4 – коммутационная аппаратура;

5, 6 – 1-й и N -й преобразователь; 7, 8 – 1-й и N -й двигатель; 9, 10 – 1-й и N -й редуктор;

11, 12 – 1-й и N -й исполнительный орган; 13 – электротехнический комплекс;

14 – нейросетевой блок; 15 – буферное запоминающее устройство;

16 – блок векторного вычитания; 17 – блок денормирования.

ЭТК технологического оборудования для открытой и подземной добычи, горнообогатительных комбинатов включает несколько тысяч параметров ТС основного электротехнического оборудования. Надежное функционирование ЭТК возможно только при достоверном дистанционном контроле их ТС, что

позволяет получать максимальную производительность шахт, карьеров, горно-обогатительных фабрик и комбинатов.

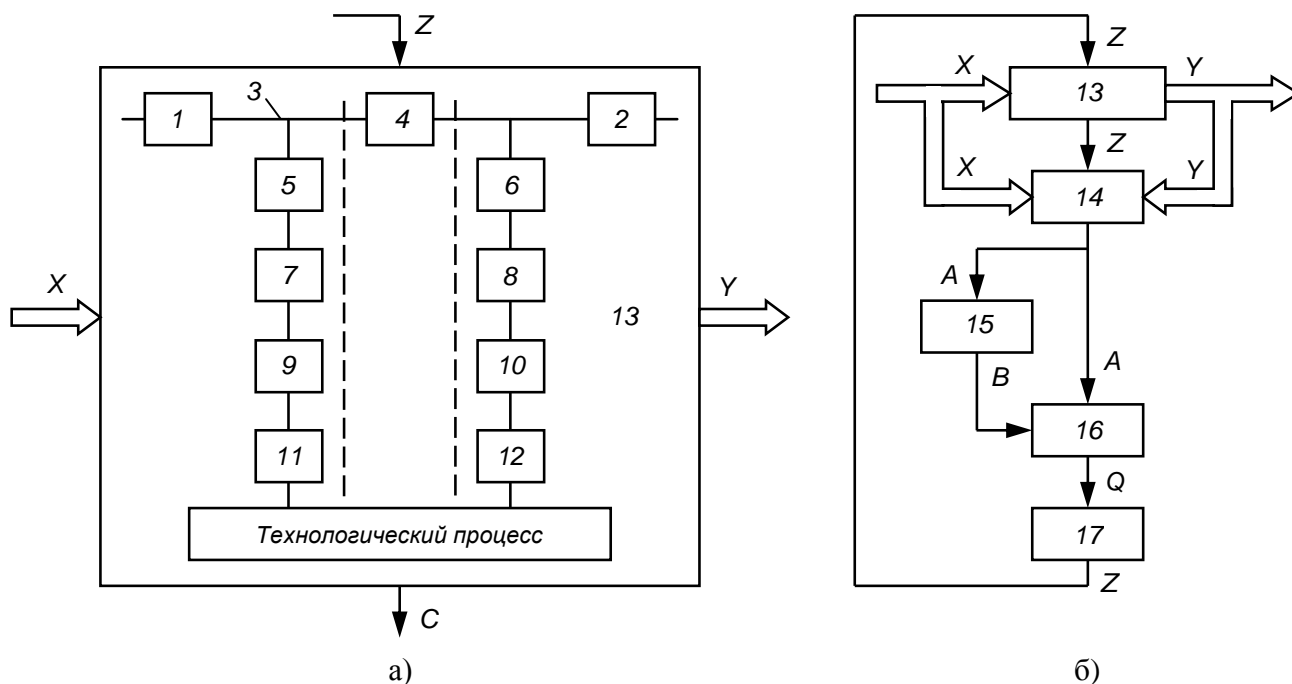


Рис. 1. Структурная схема ЭТК (а) и устройство адаптации многоуровневой системы контроля (б)

Применяемые локальные системы ТС отдельного электротехнического оборудования при автоматизированном дистанционном управлении технологическими процессами не обеспечивают быстрого и надежного выявления отказов и приводят к задержке восстановления оборудования. Для дистанционного контроля ТС многопараметрических объектов в последние годы стали применяться нейронные сети (НС). При этом актуальна задача адаптации параметров нейросетевой системы контроля ТС при изменении условий эксплуатации и физического старения элементов ЭТК.

Под адаптацией системы контроля ТС понимается целенаправленные изменения значений функционалов управляемых элементов во внутренних уровнях системы дистанционного контроля в ответ на естественные или предумышленные изменения значений функционалов других элементов системы контроля, так, чтобы обеспечить экстремумы выходным вероятностным показателям качества всей системе контроля при ограничении последних в виде равенств-неравенств. Данная задача может быть решена путем использования специального устройства адаптации распределенной системы контроля, на которое получен патент на полезную модель № RU 146839. На рис. 1, б представлена структурная схема данного устройства.

Входом X являются сигналы измерительного контроля, поступающие на входа ОК и нейросетевого блока (НБ). Это измеряемые параметры с выхода датчиков, регистрируемые параметры внешней среды, управляющие воздействия операторов или автоматики. например в момент времени T_i вектор $X = [1,23В, 6,33В, 4,25А, 1,02 \text{ атм}, 0, 1, 0]$, где первые три компоненты напря-

жения и ток, контролируемого объекта, четвертая – давление как фактор внешней среды, с 5-й по 7-ю компоненты – параметризация управляющих воздействий в момент времени T_i . Всего таких векторов K .

Выходом Y являются компоненты вектора качества решения задач контроля, например, в момент времени T_i вектор $Y = [0,94, 2, 22, 2500]$, где 0,94 – достоверность контроля (как вероятность правильного распознавания вида ТС контролируемого ЭТК), 2 – погрешность измерений физических величин в %, 22 – время решения задачи в минутах, 2500 – текущая стоимость контроля в относительных единицах. Всего таких векторов, тоже, K .

НБ представляет собой многослойную НС, где каждый входной нейрон соответствует какому-либо элементу реальной системы контроля и содержит текущие вероятностные характеристики внутренних составных элементов контролируемого объекта, например, вектор $C = [0,99, 0,84, 0,95, \dots]$, где 0,99 – вероятность того, что аппаратура формирования группового диагностического сигнала в момент времени T_i работоспособна и исправна, 0,84 – вероятность того, что в момент времени T_i аналого-цифровой преобразователь функционирует правильно и т.д. по аналогии. Вектор C один для всех K векторов входов-выходов. Выход НБ – сигнал A – содержит значения коэффициентов матриц межнейронных связей $\{W\}$ нейросетевого блока, его записывают в буферное запоминающее устройство (БЗУ).

Назначение БЗУ – запоминать значения коэффициентов матриц межнейронных связей, соответствующих такой настройке весов НС, когда моделируемая ею распределенная система контроля функционирует правильно. Выход БЗУ – B – это тот же массив межнейронных связей исправно функционирующей распределенной системы контроля, предназначенный для сравнения с текущим массивом межнейронных связей. Фактически в БЗУ осуществляют задержку на такт адаптации сигнала, содержащего массивы межнейронных связей.

В блоке векторного вычитания (БВВ) текущий выход A от НБ и задержанный выход B от БЗУ вычитают поэлементно друг из друга, и на выходе представляют ненулевыми только те значения весов, которые соответствуют элементам распределенной системы контроля, значения вероятностных характеристик которых необходимо изменить. Сигнал Q содержит информацию о величинах и направлениях изменений взвешенных выходов НС, соответствующих управляемым элементам распределенной системы контроля.

В блоке денормирования (БДН) компоненты вектора Q денормируют в конкретные значения необходимых изменений вероятностных характеристик внутренних составных элементов реальной системы контроля (тех элементов, веса, нейронов которых изменились). Выход БДН – сигнал Z – содержит конкретные управляющие воздействия на объект контроля.

Если распределительная система диагностики правильно функционирует, тогда на сигналах X и Y возможно обучить НС отображать вход (сигналу X соответствуют входы датчиков, лежащие в пределах номиналов измеряемых фи-

зических величин) в выход, а сигналу Y – значения показателей качества решения задачи контроля: достоверность, оперативность, стоимость и т.д.

Таким образом, получается модель распределенной системы диагностики, нормально функционирующей. Соответствующий массив $\{W\}$ в виде сигнала A записывается в БЗУ.

Если в ходе эксплуатации, некоторые элементы распределенной системы диагностики вышли из строя или их технические характеристики изменились, так, что вероятность их правильного функционирования стала не выше определенного значения, то в результате взвешенные выходы соответствующих нейронов меняют свои значения (если вероятности уменьшились, то стали меньше и нормированные значения взвешенных выходов соответствующих нейронов) – это ограничения в виде неравенств, если вообще некоторые элементы распределенной системы контроля вышли из строя, то вероятности стали равными нулю – ограничения в виде равенств) [1].

$w_{ij}^{[s]} \cdot f(P(u_j)) = y^{[s]}$ – ограничение элемента системы контроля типа равенства;

$\Delta_j^1 < w_{ij} \cdot f(P(u_j^{[s]})) < \Delta_j^2$ – ограничение элемента системы контроля типа неравенств;

$w_{ij}^{[s]} \cdot f(P(u_j)) = 0$ – элемент системы контроля неработоспособен;

где $f(*)$ – стохастический функционал, осуществляющий преобразование множества значений вероятностной характеристики $P(u_j)$ правильного функционирования u_j звена системы контроля в единый для всех элементов системы контроля диапазон $[0,1]$; w_{ij} – величина регулируемой функциональной связи между i и j -м функциональными элементами, находящимися, на s -м уровне иерархии системы контроля, s – количество уровней иерархии системы контроля; y – выходной сигнал показателя качества системы контроля; Δ_j^1, Δ_j^2 – соответственно верхняя и нижняя границы допуска на функционал.

Таким образом, изменились компоненты вектора – C на рис. 1, б, а сигналы X и Y остались прежние, так как свою задачу система контроля должна, по-прежнему и возникает необходимость в адаптации. Тогда НС переобучается, но с фиксированными взвешенными выходами нейронов соответствующих неисправным элементам распределенной системы контроля. После переобучения получаем массив матриц весов $\{W\}$, который в составе сигнала A подают на БВВ. В нем осуществляют селекцию тех весов и, соответственно взвешенных выходов нейронов, которые отличаются от матрицы весов при нормальной, исправной системе распределенного контроля. Информация о направлении и величинах изменений взвешенных выходов нейронов, изменения которых обнаружены, содержится в выходном сигнале Q -БВВ. Эта разница в значениях выходов нейронов после переобучения и есть управляющее воздействие на соответствующие элементы распределенной системы диагностики, т.е. адаптация.

В БДН данные значения денормируют в конкретные физические величины, например, сигнал Z с выхода БДН управляющих воздействий на реальную распределенную систему многопараметрического контролируемого объекта.

Таким образом, алгоритм адаптации сформулируется следующим образом: определив множество w_{ij} многослойной модели системы контроля, аппроксимирующую зависимость "вход/выход" для множества режимов штатного функционирования и, аналогично, определив множество w_{ij}^* структурно и/или параметрически видоизмененной модели "неисправной" системы контроля для множества тех же режимов штатного функционирования, путем анализа изменений в пространстве $w_{ij}^* \cdot f\left(P\left(u_j^{[s]}\right)\right)$, появляется возможность обеспечить заданный функционал качества системы контроля на высшем уровне ее иерархии путем минимизации функции невязки E отклонения фактического значения Y^i на выходе НС от желаемого D^i , пока это значение не станет для каждого i удовлетворять критерию $E^i < \Delta$.

-
1. **Назаров, А.В.** Метод структурно-параметрической адаптации многоуровневых систем обработки информации с использованием локальных функционалов качества // Информационно-управляющие системы, 2014. №5(72). С. 25–32.

Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

УДК 621.315

А.Л. КУЛИКОВ, В.В. АНАНЬЕВ

УТОЧНЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ВОЛНОВОМ ОМП ЛЭП

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Несмотря на определенную сложность технической реализации, волновые методы определения места повреждения (ВОМП) линий электропередачи (ЛЭП) становятся все более востребованными как в российских [1], так и в зарубежных [2-3] электрических сетях. Перспективность применения ВОМП определяется высокой точностью расчета расстояния до места повреждения, в конечном итоге определяющей время, затраченное на ввод ЛЭП в работу.

Ключевые слова: линия электропередачи, волновой метод определения места повреждения, скорость распространения электромагнитных волн.

Despite some of the complexity of the technical implementation, travelling wave fault location methods are becoming more popular in Russian [1] and foreign [2-3] electrical networks. Application prospect won is determined by a high precision calculation of the distance to the fault and reducing the time spent on the fault location.

Key words: power transmission lines, travelling wave fault location, travelling wave speed.

Как правило, для оценки расстояния до повреждения используется двухсторонний метод ВОМП. На скорость распространения электромагнитной волны по ЛЭП оказывают влияние множество факторов. Характер влияния на точность ВОМП ЛЭП указанных факторов, а также оценочные параметры ошибок расчета расстояния до повреждения приведены в [4–6]. Следует отметить, что величина ошибок ВОМП может достигать значений, свойственных определению места повреждения ЛЭП по параметрам аварийного режима [5,6]. При наличии на линии ответвлений (отпаек) или промежуточных подстанций (ПС) возможно повышение точности ВОМП, а также уменьшение зоны обхода за счет использования статистической обработки данных.

Цель статьи – исследование статистических алгоритмов повышения точности при многостороннем ВОМП ЛЭП.

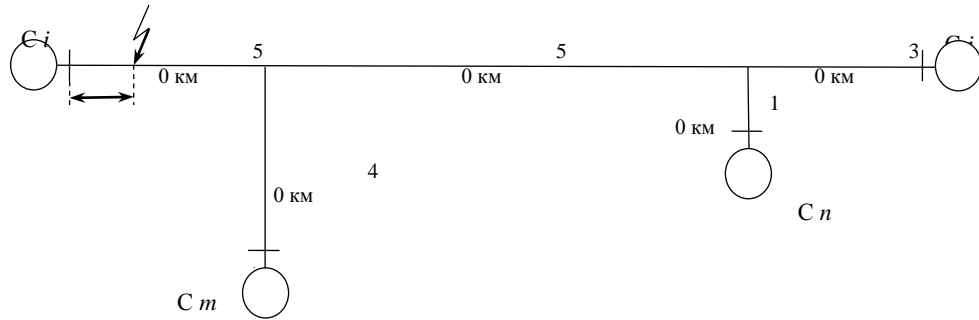


Рис. 1. Структурная схема участка электрической сети

Пусть повреждение возникает на отпайке i (рис. 1) на расстоянии x_i от ПС i . Возможны три варианта расчета расстояния до повреждения двухсторонним методом ВОМП с расположением регистрирующих устройств: ПС $_i$ - ПС $_j$; ПС $_i$ - ПС $_m$; ПС $_i$ - ПС $_n$. Каждый из указанных расчетов будет обладать индивидуальной погрешностью. Точностные характеристики ВОМП и возможную зону обхода характеризует дисперсия оценки расстояния до места повреждения, определяемая как математическое ожидание квадрата флюктуаций

$$D_{i(i;m)}(x_i) = M[X_{i(i;m)} - M_{i(i;m)}(x_i)]^2, \quad (1)$$

где $X_{i(i;m)}$ – выборочные значения расстояния x_i до повреждения, соответствующее паре устройств $i-m$; $M_{i(i;m)}(x_i)$ – математическое ожидание значений $x_{i(i;m)}$, зависящее от расстояния x_i до места повреждения.

Для повышения точности ВОМП флюктуации

$$\Delta = x_i - M_{i(i;m)}(x_i) \quad (2)$$

должны быть учтены при оценке расстояния до повреждения по результатам моделирования или статистике повреждений на исследуемой линии и использованы для корректировки текущей оценки расстояния до повреждения, например

$$x_{i(i;m)}^{\text{кор}} = x_{i(i;m)} + \Delta_{(i;m)}(x_{i(i;m)}). \quad (3)$$

Дальнейшего повышения точности можно достигнуть путем использования всех трех вариантов расчета расстояния по двухстороннему ВОМП с последующим объединением результатов расчета. При этом целесообразна реализация взвешенной суммы оценок расстояния согласно выражению [7, 8]:

$$x_{\text{рез}} = \frac{\sum_k \frac{x_{i(k)}^{\text{кор}}}{D_k(x_{i(k)}^{\text{кор}})}}{\sum_k \frac{1}{D_k(x_{i(k)}^{\text{кор}})}}, \quad (4)$$

где $x_{\text{рез}}$ – результирующая оценка расстояния до места повреждения x_i ; k – номер варианта расчета расстояния до повреждения (1 – при выборе пары устройств на ПС $_i$ и ПС $_j$; 2 – устройств на ПС $_i$ и ПС $_m$; 3 – устройств на ПС $_i$ и ПС $_n$); $x_{i(k)}^{\text{кор}}$ – уточненная оценка x_i по выражению (3) для k -го варианта; $D_k(x_{i(k)}^{\text{кор}})$ – дисперсия оценок при выборе варианта k как функция от уточненного расстояния до повреждения $x_{i(k)}^{\text{кор}}$; позволяющая существенно повысить точность расчета расстояния до места повреждения. Важно отметить, что в выражении (4) необходимо использовать скорректированные оценки расстояния до повреждения $x_{i(k)}^{\text{кор}}$ (центрированные случайные величины).

Для формирования требуемой зоны обхода ЛЭП воспользуемся соотношением для получения результирующей дисперсии по результатам нескольких измерений

$$D_{\text{рез}}(x_i) = \frac{1}{\sum_k \frac{1}{D_k(x_i)}}, \quad (5)$$

где $D_k(x_i)$ – дисперсии расстояния до повреждения x_i , полученные согласно выражению (2). При этом, исходя из заданной доверительной вероятности и нормального закона распределения, путем определения табличных значений [8] можно определить требуемую зону обхода ЛЭП с учетом точности многостороннего ВОМП.

Обоснование преимуществ рассматриваемых статистических методов повышения точности ВОМП осуществлялось на основе имитационного моделирования с применением программного обеспечения PSCAD. Модель исследуемого участка электрической сети построена на основе топологии сети (рис. 1), а параметры участков ЛЭП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры участков линии электропередачи

Участок	Длина, км	Тип промежуточных опор	Марка провода	Марка грозотросса
i	50	ПБ110-5	АС-240/32	С-70
m	40	ПБ110-1	АС-70/11	С-70
n	10	ПБ110-1	АС-70/11	С-70
j	30	ПБ110-5	АС-120/19	С-70
М-Н	50	ПБ110-5	АС-185/29	С-70

При моделировании были выбраны основные факторы, влияющие на точность ВОМП [5,6], а также задавались законы их случайного распределения и соответствующие диапазоны изменения параметров (табл. 2).

Таблица 2

Изменяющиеся параметры линии электропередачи

Параметр	Диапазон значений	Закон распределения псевдослучайной величины
Стрела провеса	5 - 9 м	Равномерный
Удельное сопротивление грунта	100 - 3000 Ом·м	Равномерный
Мгновенное значение тока в момент повреждения	0 - 350 А	Равномерный

Для каждой точки короткого замыкания на отпайке i производилась серия опытов при изменяющихся параметрах модели (табл. 2). По выражениям (1) и (3) найдены значения дисперсии и корректировки (рис. 2). Уменьшение итоговой дисперсии результирующей оценки свидетельствует об уменьшении требуемой зоны обхода ЛЭП.

Повышение точности оценки расстояния при ВОМП ЛЭП проиллюстрируем в предположении, что повреждение на исследуемой линии возникает на расстоянии 10; 20 и 30 км от ПС i . При этом итоговые данные имитационного моделирования приведены в табл. 3.

Следует отметить, что предложенные статистические методы повышения точности целесообразны к применению не только при многостороннем ВОМП ЛЭП, но и при статистической обработке данных на конкретной линии. При этом текущие данные ВОМП могут уточняться и корректироваться по результатам анализа предыдущих повреждений ЛЭП.

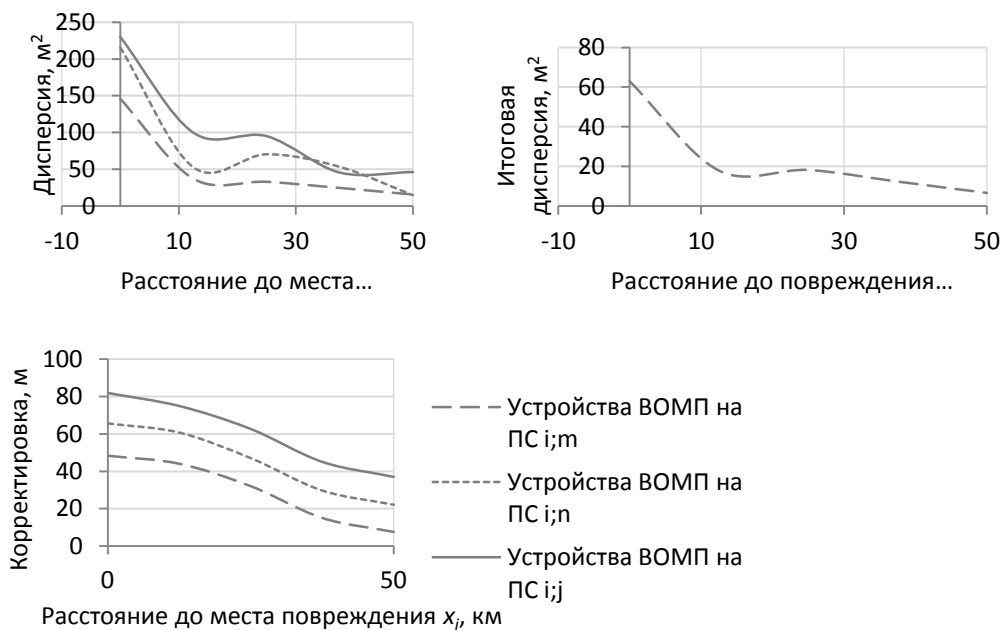


Рис. 4. Зависимость дисперсий оценки расстояния и корректировок от места повреждения на ответвлении i исследуемой ЛЭП для замеров устройства ВОМП на ПС i, m, n, j

Таблица 3

Сравнение точности результатов ВОМП ЛЭП

Истинное расстояние до повреждение, м	10000	20000	30000
Оценка по паре устройств $x_i(i;m)$, м	9954	19962	29970
Оценка по паре устройств $x_i(i;n)$, м	9937	19936	29953
Оценка по паре устройств $x_i(i;j)$, м	9929	19919	29936
Корректировка $\Delta(i;m)$, м	46	38	25
Корректировка $\Delta(i;n)$, м	62	53	40
Корректировка $\Delta(i;j)$, м	77	68	55
Дисперсия $D_i(i;m)$, м ²	50	30	30
Дисперсия $D_i(i;n)$, м ²	55	60	68
Дисперсия $D_i(i;j)$, м ²	120	92	76
Результирующая дисперсия, м ²	24	16	16
Результирующая оценка, м	10001	19995	29994
Зона обхода, м	15	12	12

Примечание: моделирование шумов на ЛЭП не проводилось, зоны обхода соответствуют предельно достигаемой точности метода статистического объединения результатов многостороннего ВОМП.

Выводы

1. Предложены статистические методы повышения точности ВОМП ЛЭП, позволяющие существенно (в разы) повысить точность расчета расстояния до повреждения.

2. Результаты имитационного моделирования ВОМП свидетельствуют о его высокой потенциальной точности и об отсутствии необходимости обходить зону повреждения.

3. Исследованные статистические методы перспективны к применению при многостороннем ВОМП ЛЭП, а также при уточнении текущих данных ВОМП с использованием результатов анализа предыдущих повреждений ЛЭП.

Библиографический список

1. Места повреждения на уральских ЛЭП обнаружат волновым методом // Энергетика и промышленность России. 2014. № 11 (247).
2. Xiangjun, Z. Fault location using traveling wave for power networks / Z. Xiangjun [et al.] // Industry Applications Conference. 2004. № 4. P. 2426–2429.
3. TWS FL-8 Прибор для определения мест повреждений по методу «бегущей волны» // Qualitrol Corp., документ №: 40-08591-01.
4. Lin, S. Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines / S. Lin [et al.] // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. № 6. P. 764–772.
5. Куликов, А.Л. Использование имитационного моделирования для повышения точности волнового определения места повреждения линий электропередачи / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Релейщик. 2014. №2. С. 30–34.
6. Куликов, А.Л. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач / А.Л. Куликов, В.В. Ананьев // Вестник ИГЭУ. 2014. №4. С. 21–25.
7. Куликов, А. Л. Определение мест повреждений ЛЭП 6 – 35 кВ методами активного зондирования: монография / А. Л. Куликов, М. Ш. Мисриханов, А. А. Петрухин; под ред. В. А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 162 с.
8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М., 1969. – 576 с.

УДК 621.311.1

Е.Н. СОСНИНА, Р.Ш. БЕДРЕТДИНОВ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Интеллектуализация электрических сетей требует разработки более совершенного и эффективного электрооборудования. В статье проведена сравнительная оценка существующих силовых трансформаторов (6)10/0,4 кВ отечественного производства на предмет соответствия требованиям стандартов энергоэффективности. Рассмотрены основные пути совершенствования силовых трансформаторов.

Ключевые слова: энергоэффективные силовые трансформаторы, потери холостого хода, потери короткого замыкания, аморфная сталь, автоматическое регулирование напряжения, система мониторинга и управления, распределительная электрическая сеть.

Intelligent electrical networks requires the development of better and more efficient electrical equipment. The article contains comparative evaluation of (6)10/0,4 kV domestic existing power transformers for the requirements of energy efficiency standards. The main improvement methods of power transformers are considered.

Key words: energy-efficient power transformers, transformer no-load losses, transformer short-circuit losses, amorphous steel, tap change under load, monitoring and control system, electric power distribution system.

Переход к интеллектуальным электрическим сетям [1] подразумевает применение более совершенных устройств, эффективных и способных адаптироваться к условиям работы. Это в полной мере относится к силовым трансформаторам.

В настоящее время износ трансформаторного оборудования в распределительных электрических сетях составляет более 50 % [2]. Это является причиной повышенных потерь холостого хода и короткого замыкания в трансформаторах, а также высокой вероятности выхода его из строя. Для трансформаторов со сроком службы более 20 лет потери холостого хода изменяются и возрастают в среднем с интенсивностью 1,75% (от паспортного значения) в год [3]. Кроме того, силовые трансформаторы класса напряжения 6(10/0,4 кВ не оборудованы устройствами РПН, что ограничивает возможность регулирования напряжения на шинах трансформаторных подстанций [2].

Одним из перспективных путей решения указанных проблем является разработка и применение энергоэффективных силовых трансформаторов. Наибольших результатов в указанном направлении добились европейские страны. Под энергоэффективным трансформатором понимается электростатический аппарат, предназначенный для преобразования величины напряжения из одного значения в другое и отличающийся от традиционных силовых трансформаторов улучшенными характеристиками (такими как нагрузочные потери и потери в стали), а также наличием автоматических устройств регулирования напряжения, систем мониторинга и диагностики состояния трансформатора.

Таблица 1

Потери короткого замыкания и холостого хода силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

Завод	Потери, кВт	100 кВА		250 кВА		400 кВА		630 кВА		1000 кВА		1600 кВА		2500 кВА		
		сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.	
ЗАО ГК «Электрощит-ТМ-Самара», г. Самара	хх	550	400	730	580	1000	830	1400	1050	1950	1550	2750	2100	4200	3350	
	кз	2300	2400	3700	3700	4900	5900	7100	7600	10000	10800	14300	16500	21000	26300	
МЭТЗ им В.И. Козлова, Минск	хх	540	290	900	570	1200	830	1650	1060	2150	1400	3200	2150	4600	2600	
	кз	1250	1970	3000	3700	3900	5400	5730	7450	8400	10800	11300	16500	17500	26500	
ОАО «ЭТК «БирЗСТ», г. Биробиджан	хх	420	305	750	610	1150	900	1400	1250	2000	1900	3300	2350	4100	3750	
	кз	2100	2000	3700	3700	5700	5500	6700	7600	8900	12200	11500	18000	19500	24000	
«Укрэлектрoаппарат», г. Хмельницкий	хх	390	290	750	550	820	800	1300	1010	1900	1400	2500	2050	4300	2800	
	кз	1720	2200	2900	4200	4300	5600	5500	8500	8250	10600	12350	16000	17000	28000	
Производственная группа «Трансформер» г. Подольск	хх	420	270	750	530	1150	870	1400	1240	2000	1600	3300	2100	4100	2750	
	кз	2100	1970	3700	3700	5700	5600	6700	7600	8900	10800	11500	16500	19500	27000	
ОАО «Электрощит», г. Чехов	хх	390	280	750	520	1150	750	1500	1000	1950	1400	2800	1950	4300	2700	
	кз	1740	1970	3040	3700	4260	5400	6350	7600	8700	10600	12610	16000	18260	26000	
Требования европейских стандартов энергоэффективности HD 428, HD 538	хх	А`		320		650		930		1300		1700		2600		3800
		В`	440	260	820	530	1150	750	1500	1030	2000	1400	2800	2200	4300	3200
		С`		210		425		610		860		1100		1700		2500
	кз	А		1750		3250		4600		6500		10500		17000		26500
		В	2000	2150	3500	4200	4900	6000	7300	8400	10000	13000	14000	20000	21000	32000
		С		1475		2750		3850		5400		9500		14000		22000

Согласно европейским стандартам гармонизации [4, 5], основными показателями энергетической эффективности для распределительных трансформаторов являются потери холостого хода и короткого замыкания. Нормы *HD428.1* для масляных трансформаторов допускают три уровня потерь короткого замыкания (*A*, *B*, и *C*) и три уровня потерь холостого хода (*A'*, *B'*, и *C'*). В табл. 1 приведена сравнительная оценка потерь серийно выпускаемых в России и странах ближнего зарубежья силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ по отношению к требованиям зарубежных нормативных документов.

Из рис. 1 – рис. 4 следует, что большинство современных силовых трансформаторов отвечают требованиям энергоэффективности. Однако ресурсы для повышения энергоэффективности трансформаторного оборудования далеко не исчерпаны.

На рис. 5 представлены основные способы повышения энергоэффективности силовых трансформаторов. Условно можно выделить три направления:

- снижение потерь холостого хода и короткого замыкания трансформаторов (за счет изменения геометрии элементов и применения усовершенствованных материалов);
- применение автоматических устройств регулирования напряжения;
- применение систем диагностики и мониторинга состояния трансформатора.

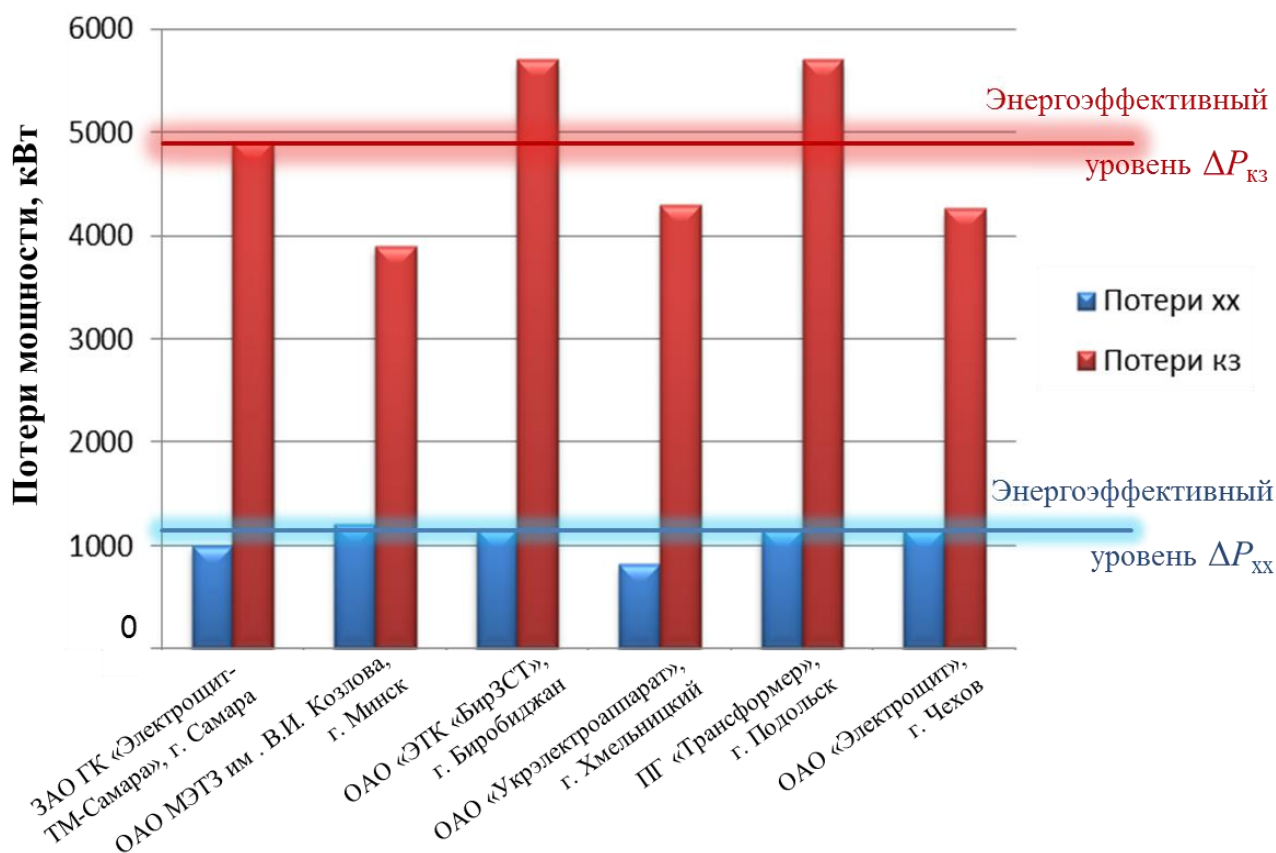


Рис. 1. Сравнение потерь мощности сухих трансформаторов мощностью 400 кВА с требованиями европейских стандартов энергоэффективности

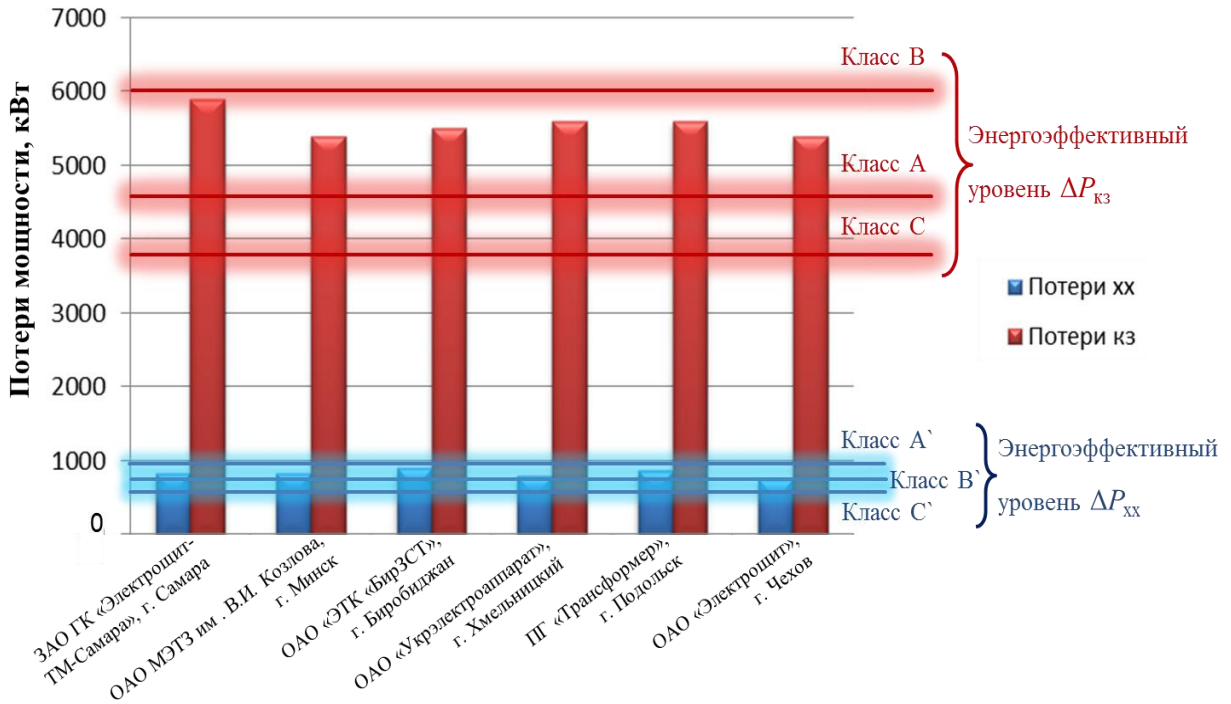


Рис. 2. Сравнение потерь мощности масляных трансформаторов мощностью 400 кВА с требованиями европейских стандартов энергоэффективности

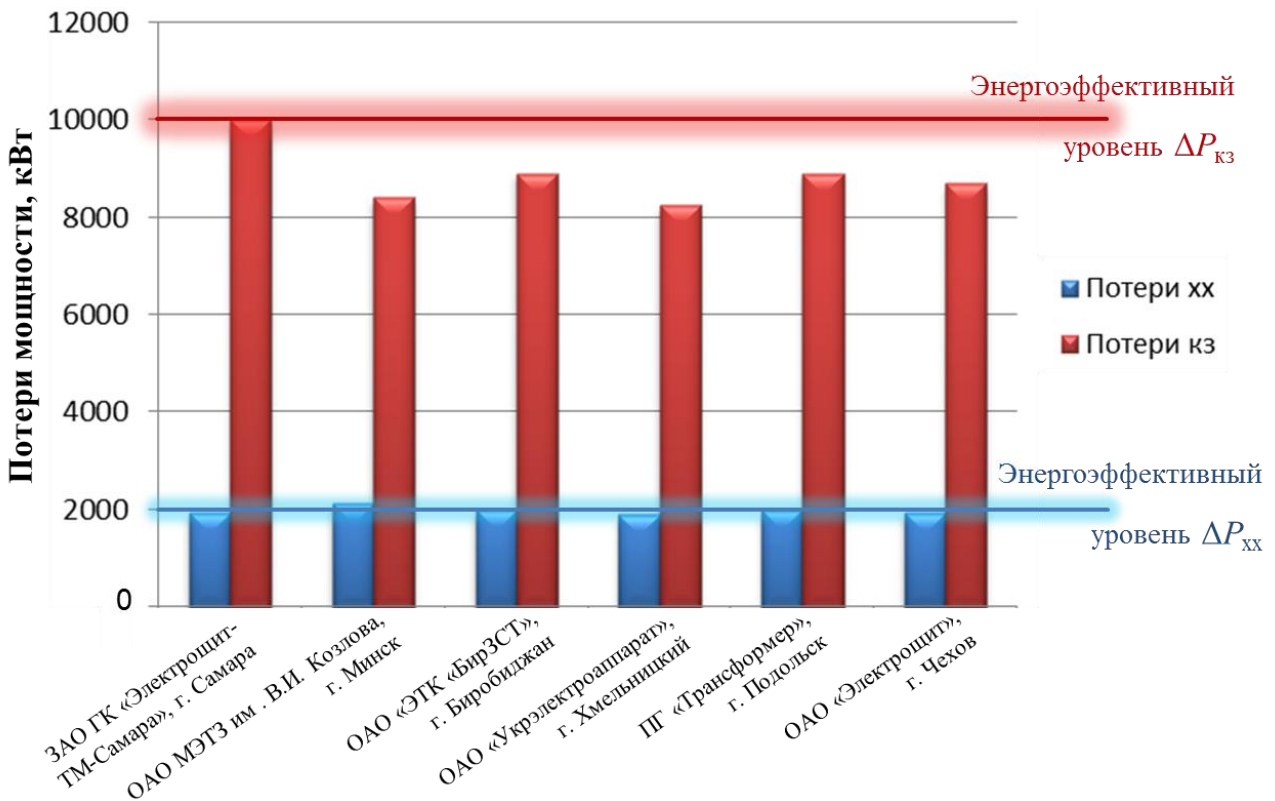


Рис. 3. Сравнение потерь мощности сухих трансформаторов мощностью 1000 кВА с требованиями европейских стандартов энергоэффективности

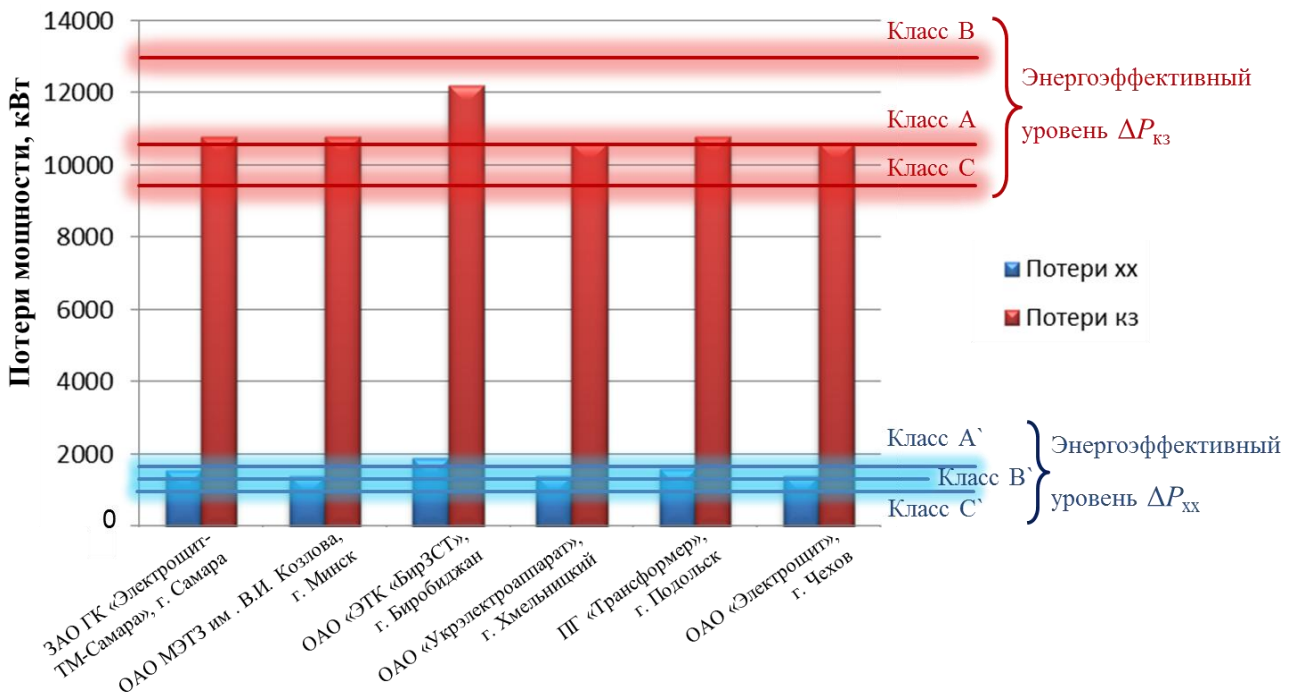


Рис. 4. Сравнение потерь мощности масляных трансформаторов мощностью 1000 кВА с требованиями европейских стандартов энергоэффективности



Рис. 5. Пути повышения энергоэффективности силовых трансформаторов

Перспективным является применение трансформаторов с сердечником из аморфной стали. Данный материал имеет случайную, некристаллическую

структуру и состоит из сплава переходных металлов (Fe, Co) с аморфообразующими элементами (B, C, Si и др.). Для получения аморфной структуры требуется высокая скорость охлаждения (сотни тысяч градусов в секунду). Применение вместо электротехнической стали аморфного сплава при изготовлении магнитопровода, позволяет снизить потери холостого хода более, чем в четыре раза (рис. 6).

Снижение нагрузочных потерь возможно за счет увеличения сечения обмоток и применения сверхпроводящих материалов. Однако в силу увеличения габаритных размеров трансформаторов и высокой стоимости данный подход наиболее эффективен в сетях 110 кВ и выше.

Применение автоматических устройств регулирования напряжения в распределительных сетях способствует поддержанию качества электроснабжения конечных потребителей на высоком уровне. Наиболее перспективным является применение переключающих устройств на основе твердотельных элементов силовой электроники (*Solid-state load tap changer - SSLTC*). В качестве высоковольтных переключателей отводов могут выступать *IGBT* транзисторы или тиристоры. Примером *SSLTC* на основе *IGBT* транзисторов является разработка немецких конструкторов – трансформатор с РПН на полупроводниковых приборах под названием *Smarttrafo* [6]. Разработкой российских ученых является устройство РПН на тиристорах (трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения и мощности ТТРНМ) [7], которое позволяет обеспечить как дискретное, так и импульсно-фазовое регулирование. Указанные устройства отличаются высоким быстродействием и точностью регулирования.

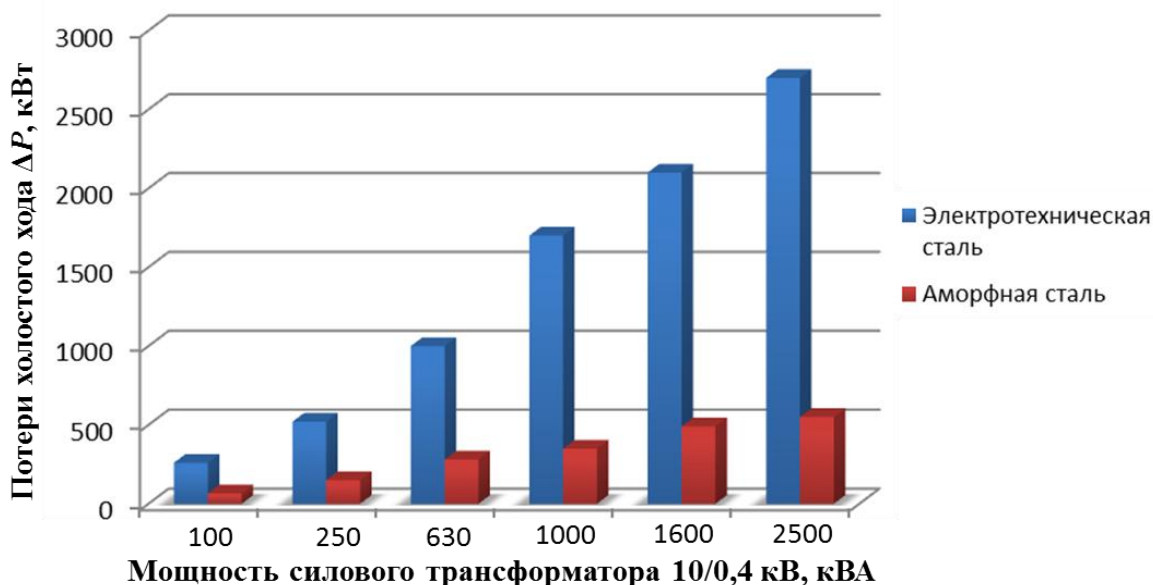


Рис. 6. Сравнительная оценка потерь холостого хода силовых трансформаторов с сердечником из электротехнической стали и аморфной стали

Оснащение силовых трансформаторов системами мониторинга и диагностики позволяет оценить состояние его отдельных элементов, заранее спрогнози-

ровать возможные дефекты и предотвратить аварийный выход его из строя. Указанные функции могут быть заложены в систему управления трансформаторной подстанцией. Примером реализации подобного варианта является цифровая трансформаторная подстанция с активно-адаптивной системой управления [1].

Выводы

Проведенный обзор существующих технологий в области повышения энергоэффективности силовых трансформаторов показал, что наиболее перспективным является вариант трансформатора из аморфной стали, оснащенный бесконтактным устройством автоматического регулирования напряжения и системой управления, реализующей функции мониторинга и диагностики.

Помимо реализации технических средств, необходимо совершенствование отечественной нормативной документации в части требований к параметрам распределительных силовых трансформаторов 6(10)/0,4 кВ. В настоящее время отечественные стандарты [8, 9] регламентируют потери в трансформаторах, начиная с мощности 1000 кВА и напряжения 35 кВ. За основу могут быть взяты европейские стандарты гармонизации [4, 5], определяющие уровень энергоэффективности силовых трансформаторов.

Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Цифровая трансформаторная подстанция в интеллектуальных электрических сетях с автоматическим плавным регулированием напряжения и мощности / А.Б. Лоскутов, А.И. Чивенков, Е.Н. Соснина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. № 4(101). С. 236–245.
2. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. Утверждено Советом директоров ОАО «Россети». Протокол № 138 от 23.10.2013.
3. **Коротков, А.В.** Результаты измерений мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы / А.В. Коротков, В.Я. Фролов // Электрика. 2011. – № 8. С.8–11.
4. HD428: Трехфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50 Гц от 50 до 2 500 кВ•А с масляным охлаждением и максимальным напряжением не выше 36 кВ.
5. HD538. Трехфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50 Гц от 100 до 2 500 кВ•А с охлаждением сухого типа и максимальным напряжением не выше 36 кВ.
6. Graaff, Roald A.A. de. Flexible distribution systems through the application of multi back-to-back converters: Concept, implementation and experimental verification / Roald Antonius Adrianus de Graaff // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010. – 210 p.
7. **Лоскутов, А.Б.** Разработка и создание типового ряда трансформаторно-тиристорных регуляторов напряжения и мощности с расщепленной первичной обмоткой трансформатора и ключами однонаправленного тока. Этап 5: Проведение государственных испытаний опытного образца ТТРН ОТ / А.Б. Лоскутов [и др.] // Заключительный научно-технический отчет (ГК от 11.10.2011 №16.526.12.6016). – Н. Новгород: НГТУ, 2013. – 43 с.
8. ГОСТ 11920-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения напряжением до 35 кВ включительно. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 24 с.
9. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007– 45 с.

УДК 621.311.1

Г.Я. ВАГИН, А.А. СЕВОСТЬЯНОВ, П.В. ТЕРЕНТЬЕВ, О.Ю. МАЛАФЕЕВ

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В ГОСУДАРСТВЕННЫХ И МУНИЦИПАЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Установлено, что выполнение заданий Государственной программы РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» в части замены старых источников света на новые энергоэффективные не выполнимо в связи с отсутствием в России заводов по производству люминесцентных ламп стандарта T5. Даны рекомендации по корректировке этой программы с ориентацией на светодиодные источники света. Учитывая большие затраты на замену старых источников света разработана методика ранжирования учреждений по очередности замены источников света.

Ключевые слова: государственная программа, светодиодные источники света, перспективы их внедрения.

It is established that the execution of tasks of the State program of the Russian Federation «Energy Saving and increase of energy efficiency for the period till 2020» in terms of replacing old lights in a new energy efficient is not feasible in the absence in Russia of factories for the production of fluorescent lamps standard T5. Recommendations are then adjusted this programme with a focus on led light sources. Given the high cost of replacing old light sources developed methodology for ranking of institutions according to the sequence of replacement of light sources.

Key words: state program, the led light sources, the prospects of their introduction.

Исследования, проведенные в работах [1–2] показывают, что в государственных и муниципальных учреждениях еще велика доля энергонезэффективных источников света: это лампы накаливания, люминесцентные лампы старых типов стандартов T12 и T8, – также низкая доля электронных пускорегулирующих устройств и степень автоматизации систем освещения.

В государственной программе РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» [3] для данных учреждений поставлены задачи полной замены ламп стандарта T12 и T8 на лампы стандарта T5 к 2016 году и замена ламп накаливания (ЛН) на компактные люминесцентные лампы (КЛЛ). Кроме этого, к 2020 году 25% систем освещения должны быть автоматизированы. Однако выполнение данной задачи стоит под большим вопросом.

Как показано в [4], в России не выпускаются люминесцентные лампы стандарта T5 с колбами диаметром 16 мм. Большинство светотехнических предприятий страны продолжают выпускать светильники с люминесцентными лампами старых типов с устаревшими стартерно-дрессельными схемами включения, при этом дрессели чаще всего закупаются за границей. В странах ЕС применение элек-

тромагнитных пускорегулирующих аппаратов (ЭмПРА) было запрещено еще в 2005 году. В настоящее время в Правительстве РФ прорабатывается вопрос о запрете применения КЛЛ и люминесцентных ламп старых стандартов с ЭмПРА, что связано, в том числе и с экологической безопасностью.

В последние два десятилетия во многих странах бурно развивается производство светодиодных источников света. Они имеют следующие преимущества перед люминесцентными источниками света [5]:

- более высокая световая отдача до 200 лм/Вт (в настоящее время – достигнута 120 лм/Вт);
- более высокий срок службы (25-50 тыс. часов);
- большая вибростойкость;
- не содержат ртути, свинца, и других тяжелых металлов, то есть экологически безопасны;
- не нужны затраты на утилизацию;
- возможность управлять интенсивностью и спектром излучения;
- отсутствие стробоскопического эффекта.

Учитывая сложности с производством люминесцентных ламп стандарта Т5 необходим пересмотр Государственной программы [3] с ориентацией на замену низкоэффективных ламп на светодиодные источники света (СИД).

Области применения СИД для государственных и муниципальных учреждений даны в [6].

В табл. 1 приведена экономия электроэнергии при замене различных источников света на СИД, в табл. 2 – характеристика СИД и светодиодных источников света присутствующих на российском рынке.

Таблица 1

Экономия электроэнергии при замене источников света

№ пп.	Вариант замены	Получаемая экономия, %
1	Замена ЛН на СИД	80-85
2	Замена КЛЛ на СИД	55-65
3	Замена ЛЛ Т12 на СИД	65-75
4	Замена ЛЛ Т8 на СИД	40-50
5	Замена ЛЛ Т5 на СИД	30-40

Таблица 2

Характеристики светодиодных ламп и светильников

№ п/п	Наименование	Страна изготовитель	Мощность, Вт	Световой поток, лм	cos φ, о.е.	Световая отдача, лм/Вт	Срок службы, ч
1	2	3	4	5	6	7	8
Светодиоды для замены ламп накаливания							
1	СДЛ Philips	Нидерланды	8	600	0,92	75,0	15000
2	СДЛ Philips	Нидерланды	13	1055	0,92	81,2	15000

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
3	СДЛ Navigator	Китай	10	820	0,93	82,0	30000
4	СДЛ ASD	Китай	7	600	0,45	85,7	30000
5	СДЛ ЭРА	Китай	8	700	0,87	87,5	30000
6	СДЛ Ledare	Китай	10	600	0,9	60,0	25000
7	СДЛ OSRAM	Германия	8	470	0,9	58,8	15000
8	СДЛ Classic Led	Германия	9	800	0,82	88,9	38000
9	Ledcraft LC-NK01	Китай	10	825	0,97	82,5	50000
Светодиодные светильники офисные							
10	LC ECONOM-25	Россия	25	3000	0,98	120	50000
11	LC OFFICE-34	Россия	34	4050	0,98	119,12	50000
12	LC TENDER-35	Россия	35	3600	0,98	102,86	50000

Учитывая ограниченное финансирование государственных и муниципальных учреждений, необходима разработка методики ранжирования учреждений по очередности перехода на светодиодные источники света.

В соответствии с [7] существуют несколько методов ранжирования:

- 1) по сроку окупаемости ($T_{ок}$);
- 2) чистому дисконтированному доходу (ЧДД);
- 3) индексу доходности (ИД);
- 4) внутренней норме доходности (ВНД).

Метод по сроку окупаемости является наиболее простым:

$$T_{ок} = \frac{K_0}{B}; \quad (1)$$

где K_0 – начальные инвестиции в мероприятие или проект; B – годовые чистые сбережения.

Данный метод применяется, если годовые сбережения $B = \text{const}$, срок окупаемости менее четырех-пяти лет, реальная процентная ставка (r) низкая.

Годовые чисты сбережения при замене источников света определяются по выражению

$$B = \Delta W_{г} \cdot C_{эл}; \quad (2)$$

где $\Delta W_{г}$ – годовая экономия электроэнергии, полученная при замене источников света; $C_{эл}$ – стоимость электроэнергии.

Стоимость электроэнергии в РФ ежегодно возрастает на 6-10%, поэтому данный метод ранжирования неэффективен.

Таблица 3

Ранжирование по индексу доходности (на примере общеобразовательных учреждений)

Наименование учреждения	Существующий тип ламп	Кол-во светильников, шт.	Общее кол-во ламп, шт.	Мощность лампы, Вт	Годовое потребление ЭЭ, кВт·ч	Новые типы ламп	Кол-во светильников, шт.	Мощность светильника, Вт	Годовое потребление ЭЭ, кВт·ч	Экономия ЭЭ, кВт·ч	Начальные инвестиции, руб.	ИД, о.е
СОШ №1	ЛЛ-40	293	586	40	54905,9	LC OFFICE-34	293	34	19127,0	35778,8	614835,0	5,0
	ЛН	75	75	100	14400,0	Ledcraft LC-NK01	75	10	1440,0	12960,0		
СОШ №20	ЛЛ-40	145	290	40	27171,8	LC OFFICE-34	145	34	9465,6	17706,2	299564,2	4,8
	ЛН	29	29	100	5568,0	Ledcraft LC-NK01	29	10	556,8	5011,2		
СОШ №15	ЛЛ-40	378	756	40	70834,2	LC OFFICE-34	378	34	24675,8	46158,3	769568,8	4,5
	ЛН	56	56	100	10752,0	Ledcraft LC-NK01	56	10	1075,2	9676,8		
СОШ №14	ЛЛ-40	367	734	40	68772,9	LC OFFICE-34	367	34	23957,8	44815,1	744640,0	4,5
	ЛН	50	50	100	9600,0	Ledcraft LC-NK01	50	10	960,0	8640,0		
СОШ №7	ЛЛ-40	206	412	40	38602,8	LC OFFICE-34	206	34	13447,7	25155,1	415615,2	4,4
	ЛН	24	24	100	4608,0	Ledcraft LC-NK01	24	10	460,8	4147,2		

Более эффективным является ранжирование по индексу доходности (ИД). Индекс доходности определяется по выражению

$$\text{ИД} = \frac{\text{ЧДД}}{K_0}; \quad (3)$$

при этом

$$\text{ЧДД} = \left(\frac{B_1}{1+r} + \frac{B_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{B_T}{(1+r)^T} \right) - K_0; \quad (4)$$

где B_1, B_2, \dots, B_T – годовые чистые сбережения по годам эксплуатации; T – экономический срок службы нового источника света.

Индекс доходности показывает, сколько годового дохода мы получим на каждый вложенный рубль инвестиций.

После определения индекса доходности все рассматриваемые учреждения ранжируются по прибыльности, и в первую очередь замена старых источников света на новые проводится в учреждениях, где ИД выше.

Авторами проведено ранжирование очередности замены старых источников света на новые светодиодные на примере общеобразовательных учреждений.

Лампы накаливания во вспомогательных помещениях заменялись на аналогичные светодиодные светильники Ledcraft LC мощностью 10 Вт (стоимость светильника 446 руб.). Люминесцентные светильники в основных помещениях заменялись на аналогичные светодиодные светильники типа LC OFFICE-34 мощностью 34 Вт (стоимость одного светильника 1500 руб.). При расчете принималось: стоимость 1 кВт·ч 5,04 руб., инфляция 10%, ежегодное возрастание стоимости электроэнергии 10%, процентная ставка банка 12%, стоимость монтажных работ 30% от стоимости источников света, экономический срок службы 20 лет. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Выводы

1. Программа замены люминесцентных ламп стандартов T12 и T8 на новые энергоэффективные стандарта T5 в РФ к 2016 году не будет выполнена. В связи с этим необходима корректировка Государственной программы РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», которая предусматривает такую замену, с ориентиром на применение светодиодных источников света.

2. Для ускорения разработок и внедрения в РФ светодиодных источников света необходима разработка «Технического регламента на разработку и применение светодиодных источников света».

3. Учитывая пока большую стоимость светодиодных источников света, в первую очередь следует проводить замену во вспомогательных помещениях, в помещениях с временным пребыванием людей, в коридорах, на лестничных клетках, для аварийного и дежурного освещения.

4. Для определения очередности замены старых источников света на новые светодиодные, необходимо провести ранжирование различных групп государственных и муниципальных учреждений по индексу доходности такой замены.

Библиографический список

1. Вагин, Г.Я. Исследование законов случайных изменений энергопотребления образовательных учреждений / Г.Я. Вагин [и др.] // Вестник Белгородского ГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №1. С. 96–100.
2. Вагин, Г.Я. Исследование высших гармоник тока, генерируемых энергопотребляющими источниками тока / Г.Я. Вагин [и др.] // Пром. энергетика. 2014. №6. С. 51–55.
3. Государственная программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности на период до 2020 года.
4. Анализ методической и нормативной правовой базы, стимулирующей реализацию энергосберегающих проектов на основе энергосервисных контрактов и подготовка предложений по изменению либо исключению норм законодательства, препятствующих широкомасштабной реализации энергосберегающих проектов на данной основе // Отчет о научно-исследовательской работе; ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. Государственный контракт №12/0412.0923400.244/02/209 от 10 декабря 2012 г.
5. Светодиоды и их применение для освещения / А.Э. Юнович; под ред. Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2011. – 16 с.
6. СП 52.13330.2011. «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*».
7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. – М.: Экономика, 2000.

УДК 621.311

Н.В. ГРУНТОВИЧ, А.А. КАПАНСКИЙ

РАСЧЕТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ

ООО «ЦНППЭ» (Беларусь) – Брянский государственный аграрный университет,
УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»

Разработан метод для прогнозирования энергоэффективности в технологических системах водоотведения при учете ввода в эксплуатацию трубопроводных сетей, внедрении мероприятий по энергосбережению, изменения объемов производства. Полученные результаты могут быть использованы при формировании себестоимости продукции и прогнозировании электропотребления.

Ключевые слова: энергоэффективность, система водоотведения, прогнозирование, электропотребление.

The method for forecasting energy efficiency in technological systems of water disposal is developed. The method takes into account the commissioning of the pipeline network, energy saving measures, the change in output. The results can be used in the formation of production costs and energy consumption forecasting.

Key words : energy efficiency , drainage system , forecasting, electric power consumption.

Государственным аппаратом управления энергоэффективностью (ЭЭФ) жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь является система

нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Трудоемкость расчета общих и удельных расходов электрической энергии (ЭЭ) в сложных, развивающихся инженерно-технических системах, а также низкая достоверность определения рабочих параметров насосных агрегатов затрудняют корректную оценку удельного расхода ЭЭ в системах водоотведения расчетно-аналитическим методом [1].

Отклонение любого параметра технологического оборудования от рабочего режима, на этапе нормирования, оказывает существенное влияние на качество полученного результата. Разработанные и апробированные методы диагностирования и прогнозирования показателей ЭЭФ (удельных и общих расходов ЭЭ) в технологических системах трубопроводного транспорта нефти [2], основанные на аддитивной трехфакторной регрессионной модели электропотребления на выбранном интервале грузооборота, показали высокую точность и жизнеспособность и позволили сформировать систему управления ЭЭФ предприятий транспорта нефти.

Аналогичные подходы построения моделей электропотребления могут быть применены к трубопроводным системам водоотведения. Исследования, проведенные на ряде объектов систем водоотведения республики, показали, что базисный вид модели может быть представлен трехфакторным аддитивным уравнением регрессии, где в качестве факторов приняты объемы стоков $Q_{\text{сток}}$, температура окружающей среды $t_{\text{окр}}$, количество выпавших осадков $N_{\text{осад}}$.

Для исследуемой городской системы водоотведения получена многофакторная модель суточного электропотребления:

$$W = f(Q_{\text{сток}}, t_{\text{окр}}, N_{\text{осад}}) = w_{\text{уд.тех}} \cdot Q_{\text{сток}} + a \cdot t_{\text{окр}} + b \cdot N_{\text{осад}} + W_{\text{усл.п}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (1)$$

где $w_{\text{уд.тех}}$ – удельный технологический расход (коэффициент регрессии), кВт·ч/1000 м³; $Q_{\text{сток}}$ – прогнозируемые объемы сточных вод в расчетном периоде, тыс. м³; a – коэффициент регрессии при температуре, кВт·ч/°С; $t_{\text{окр}}$ – прогнозируемое значение температуры окружающей среды, °С; b – коэффициент регрессии при количестве выпавших атмосферных осадках, кВт·ч/мм; $N_{\text{осад}}$ – прогнозируемое количество выпавших осадков, мм; $W_{\text{усл.п}}$ – условно-постоянный расход, кВт·ч.

Условно-постоянный расход ЭЭ учитывает общезаводские нужды предприятия, не зависящие от объемов производства, а также долю технологических затрат, отражающих непрерывность работы воздухоудовного оборудования и учитывающих затраты ЭЭ, необходимые для поддержания давления в сети на заданном уровне.

На рис. 1 представлены результаты сравнения фактического и рассчитанного по модели общепроизводственного расхода ЭЭ в системе водоотведения.

От текущей модели общего расхода ЭЭ осуществляется переход к модели удельного расхода ЭЭ (рис. 2).

$$W_{уд} = f(Q, t_{окр}, N_{осад}) = w_{уд.тех} + \frac{a \cdot t_{окр} + b \cdot N_{осад} + W_{усл.п}}{Q_{сток}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{тыс. м}^3}. \quad (2)$$

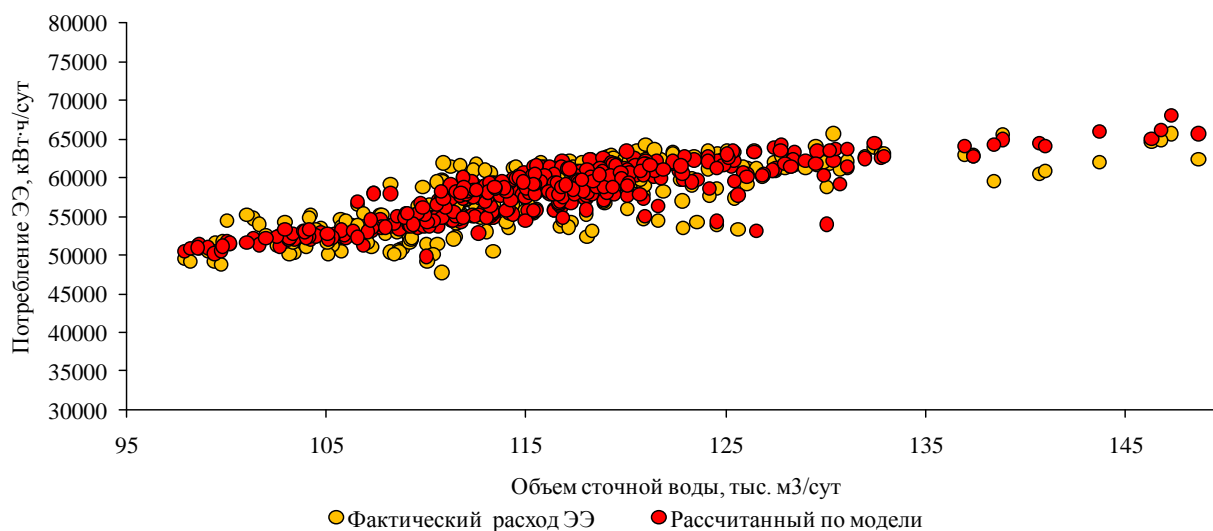


Рис. 1. Сравнение фактического суточного электропотребления с результатами моделирования

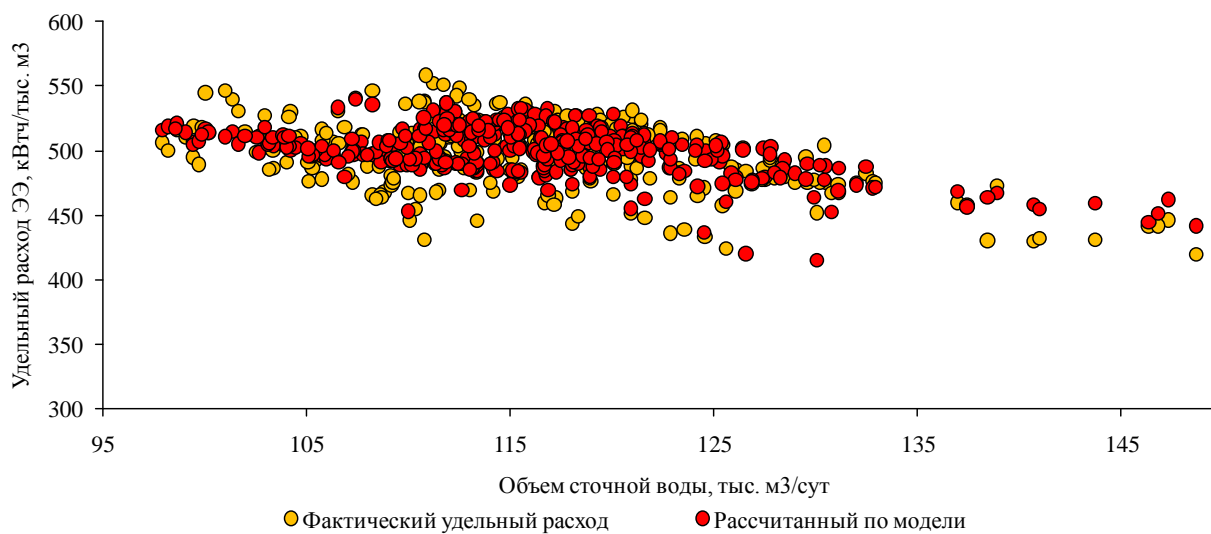


Рис. 2. Моделирование удельного расхода ЭЭ

Технологические системы водоотведения, в связи с ростом и развитием инфраструктуры городов, ежегодно трансформируется в сложные технические комплексы. В связи с чем, актуальной задачей является возможность прогнозирования удельного расхода электроэнергии в условиях прироста трубопроводных сетей, а также внедрении технологических и общезаводских мероприятий в области энергосбережения. Блок-схема расчета удельного расхода при изменении технологических режимов приведена на рис. 3.

Примечание.

В блок-схеме приведены следующие обозначения: Q_i – часовой расход воды по i -му участку сети; $m^3/ч$; H_i – потери напора по длине трубопровода, м; η_i – коэффициент полез-

ного действия насосного агрегата (НА) на i -м участке сети; t_i – время работы НА i -го участка сети, ч; n – количество участков сети, шт.; i – индекс, обозначающий порядковый номер участка сети; N – количество дней в прогнозном периоде, сут; $\Delta W_{0.3}$ – общезаводской экономический эффект от внедрения мероприятий по энергосбережению; кВт·ч; $\Delta W_{\text{тех}}$ – технологический экономический эффект от внедрения мероприятий по энергосбережению; кВт·ч.

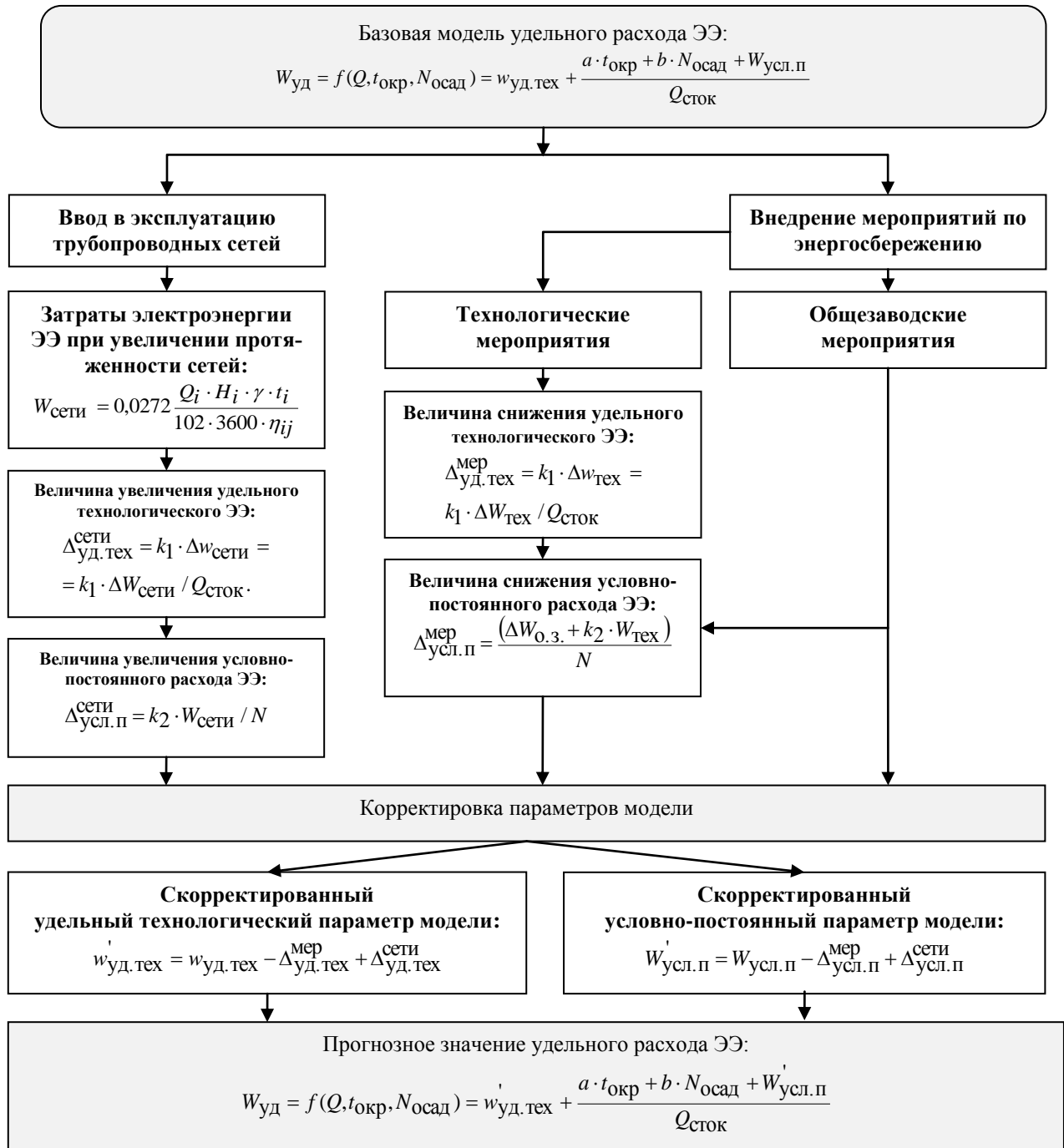


Рис. 3. Блок-схема расчета удельного расхода ЭЭ в системе водоотведения при изменении характеристик технологических режимов

При расчете корректирующих параметров модели введены следующие коэффициенты: k_1 – коэффициент, отражающий долю изменения удельного тех-

нологического расхода в общем расходе ЭЭ; k_2 – коэффициент, отражающий долю изменения условно-постоянного расхода в общем расходе ЭЭ.

Коэффициенты k_1 и k_2 находятся между собой в следующей зависимости:

$$k_1 + k_2 = 1. \quad (3)$$

Для систем водоотведения предпочтительно принимать значение коэффициента k_1 после оценки коэффициентов регрессии. Если условно-постоянный расход составляет более 50 % от общего электропотребления и $w_{уд.тех} < 100$ кВт·ч/тыс. м³ принимается $k_1 = 0,3- 0,5$. Если условно-постоянный расход составляет менее 50 % от общего электропотребления и $w_{уд.тех} \geq 100$ кВт·ч/тыс. м³, принимается $k_1 = 0,7-1$.

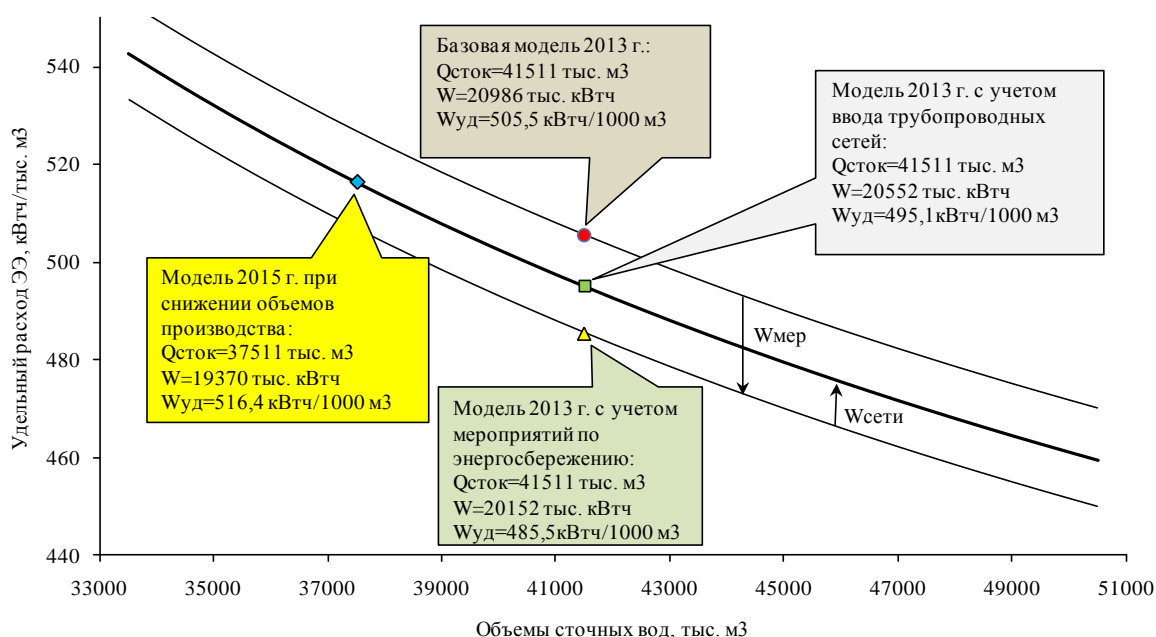


Рис. 4. Изменение удельного расхода модели 2015 г. при внедрении энергосберегающих мероприятий и вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей

Динамика изменения удельного расхода при внедрении мероприятий по энергосбережению и вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, внедренные мероприятия по энергосбережению обеспечивают при существующем объеме сточных вод снижение удельного расхода ЭЭ с 505,5 кВтч/тыс. м³ до 485,5 кВтч/ тыс. м³. Однако ввод в эксплуатацию новых трубопроводных сетей снижает эффект от мероприятий по энергосбережению: удельный расход ЭЭ в итоге составит 495,1 кВтч/тыс. м³. Но наиболее значимым фактором, формирующим удельный расход ЭЭ на 2015 г. является производственная программа. Из-за снижения объема перекачиваемых сточных вод с 41511 до 37511 тыс. м³/год, удельный расход ЭЭ возрастет до 516,4 кВтч/тыс. м³, что полностью съедает эффект от внедренных мероприятий по энергосбережению.

Таким образом, знание закономерностей функционирования сложной

технологической системы при учете воздействующих факторов представляется возможным не только выполнить прогноз показателей ЭЭФ (общих и удельных расходов ЭЭ), но и объективно оценить эффект от мероприятий по энергосбережению.

Библиографический список

1. **Грунтович, Н.В.** Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н.В. Грунтович, Д.Р. Мороз, А. А. Капанский // Минск: Энергоэффективность, 2015. №1. С. 20–23.
2. **Анищенко, В. А.** Оценка и нормирование показателей энергоэффективности предприятий трубопроводного транспорта нефти / В. А. Анищенко, Н. В. Токочакова. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 233 с.

УДК 621.316

А.Б. ЛОСКУТОВ, А.А. ЛОСКУТОВ, Д.В. ЗЫРИН

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ГОРОДСКИМИ АКТИВНО-АДАПТИВНЫМИ СЕТЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Статья посвящена проблеме формирования активно адаптивной распределительной сети с новыми принципами управления. Затронуты вопросы управления режимами сети и их соответствие стандарту МЭК 61850. Рассмотрены базовые алгоритмы управления перспективными интеллектуальными сетями - гексагональными сетями.

Ключевые слова: автоматическое управление, интеллектуальные сети, гексагональные сети, распределительные сети, агентное управление, иерархическая система управления.

The article is devoted to the problem of formation an active adaptive distribution network with new control approach. The decisions of issues compatibility of management regimes and their compliance with the IEC 61850 standard were proposed. Basic control algorithms promising smart grid such as the hexagonal distribution networks have been proposed.

Key words: automatic control, smart grids, hexagonal networks, distribution networks, agent-based control, hierarchical control system.

Сегодня активно развивается направление модернизации распределительных городских сетей, интенсивно внедряются распределенные источники электроэнергии малой мощности, а концентрация данных источников в узлах сети дает предпосылки их подключения в общую сеть. Для этого требуется глубокая интеллектуализация распределительной сети при соответствующей модернизации информационных связей.

Новые подходы и технологии позволяют формировать гибкие сети, спо-

способны менять свою конфигурацию в зависимости режимов и возникающих задач. Концепция [1] перехода к интеллектуальным сетям выдвигает требования соответствия распределительных сетей последним стандартам, в частности МЭК 61850. Данное положение формирует задел новых требований к управляемости сети, выделение большей самостоятельности узлов распределительной сети при принятии решений, постепенный отказ от полностью централизованной системы управления, характерной для существующих радиальных сетей. Предложенный авторами подход к формированию сетей [2-4] позволяет формировать сети с гибким управлением – гексагональные сети.

Гексагональная сеть позиционируется как активно-адаптивная, поэтому вопросы организации системы управления и взаимодействия элементов сети особо актуальны. В качестве наиболее подходящей предлагается альтернативная система управления, основанная на мультиагентном принципе. Каждому узлу нагрузки или источнику прикреплен аппаратно-программная система агент, который собирает сбором информации о векторах напряжения в узле, векторах токов в подключенных линиях к узлу, состоянии коммутационных аппаратов, количестве фидеров подключенных потребителей, категории электрообеспечения потребителей (прописанной в договоре), нагрузке каждого потребителя и т.п.

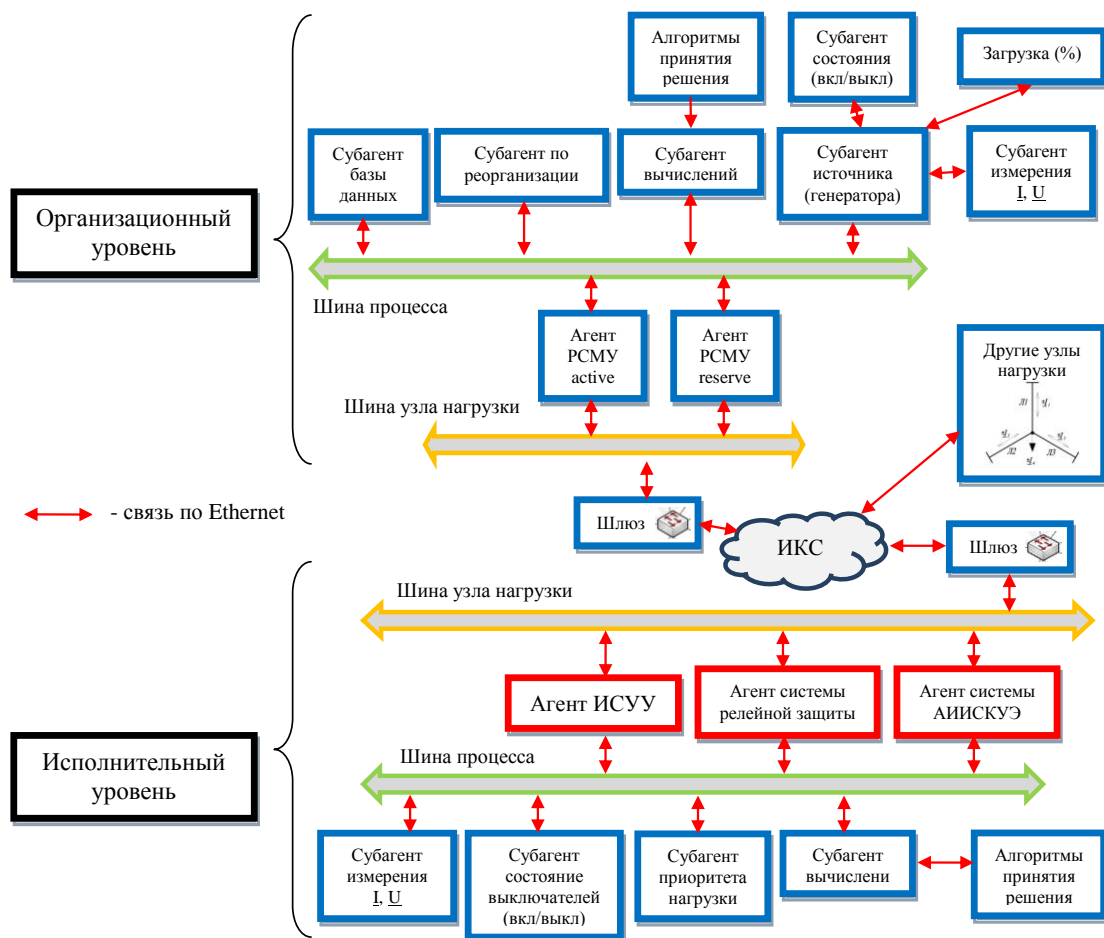


Рис. 1. Смешанная мультиагентная система управления ГРС

На рис. 1 показана ее структура, соответствующая стандарту МЭК 61850. Это распределенная система, в которой информация и управленческие полномочия распределяются между достаточно "самостоятельными" агентами, но сохраняется общий орган командного управления, принимающий решения в критических или конфликтных ситуациях. Данная мультиагентная система разделяется на два уровня.

На организационном уровне стоит агент распределенной системы мониторинга и управления (РСМУ). Агент РСМУ устанавливается на источниках поставляющих электроэнергию в сеть, например, районная подстанция, мини-ТЭЦ, энергоустановка на ВИЭ. В его подчинении находится ряд субагентов. Субагент базы данных режимов ГРС, в которую входит информация о возможных вариантах изменения размера гексагональной зоны, то есть минимальное и максимальное количество узлов в зоне. База данных формируется заблаговременно по результатам предварительного моделирования, при котором оцениваются пропускная способность линий и устойчивость электрооборудования к токам короткого замыкания при различной размерности гексозоны. Субагент по реорганизации отвечает за изменение размера гексозоны, питающейся от источника или нескольких источников. Субагент вычислений оценивает и агрегирует информацию с других субагентов, производит математические и логические операции и выдает сигнал управления агенту РСМУ. Субагент коммуникаций отвечает за своевременную передачу информации по информационно-коммуникационной сети и избирает рациональный алгоритм маршрутизации. Субагент источника оценивает загрузку источника, его состояние (включен/отключен), при необходимости воздействует на АРВ или отключает источник.

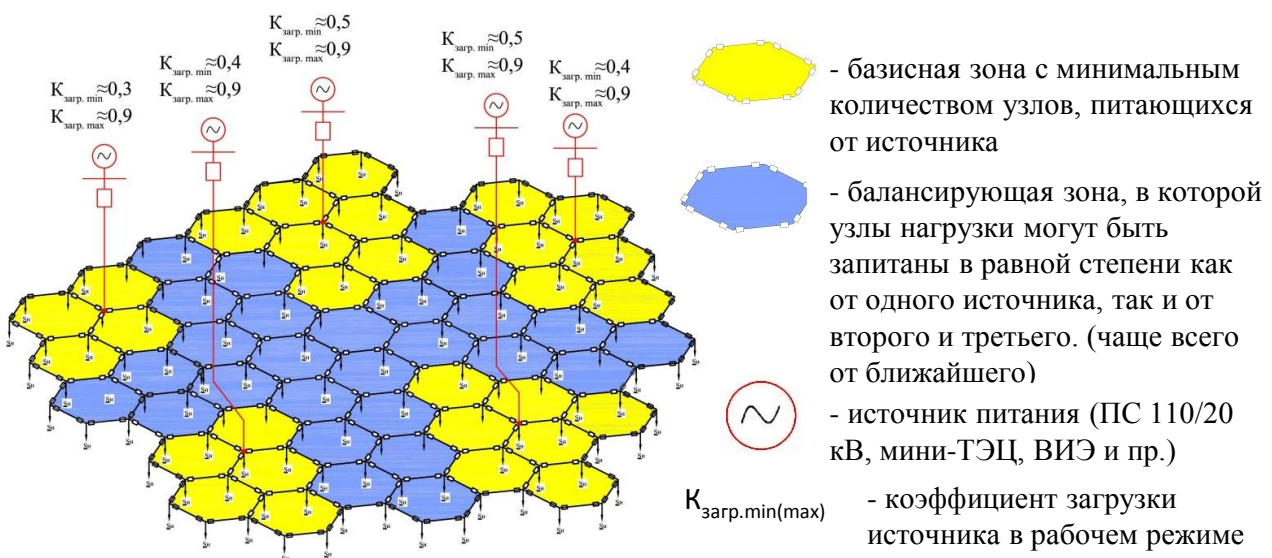


Рис. 2. Возможное изменение гексагональных зон

На втором, исполнительном уровне находится узловой агент – агент интеллектуальной системы управления узла нагрузки (ИСУУ). Он является достаточно самостоятельным в принятии решения, но в критических моментах об-

ращается за помощью к вышестоящему агенту РСМУ. Агенту ИСУУ подчиняются ряд субагентов.

Алгоритм работы смешанной системы управления предполагает при отсутствии связи с вышестоящим РСМУ работу автономного алгоритма функционирования ИСУУ. Данный алгоритм основан на балансе токов в узле и наличии резерва по пропускной способности подключенных линий. Блок-схема данного алгоритма изображена на рис. 3.

Алгоритм осуществляет превентивное отключение линий с целью недопущения развития аварии.

При наличие информационных связей между питающими узлами и взаимодействием субагентов узлов сети между собой, возможно реализовать алгоритм быстрой реконфигурации сети (БАРС), позволяющий сохранить в работе максимальное число потребителей при потере одного или нескольких источников питания. Алгоритм (рис. 4) основан на зонном балансном подходе анализа необходимой нагрузки, резерва источников питания и категорийности потребителей.

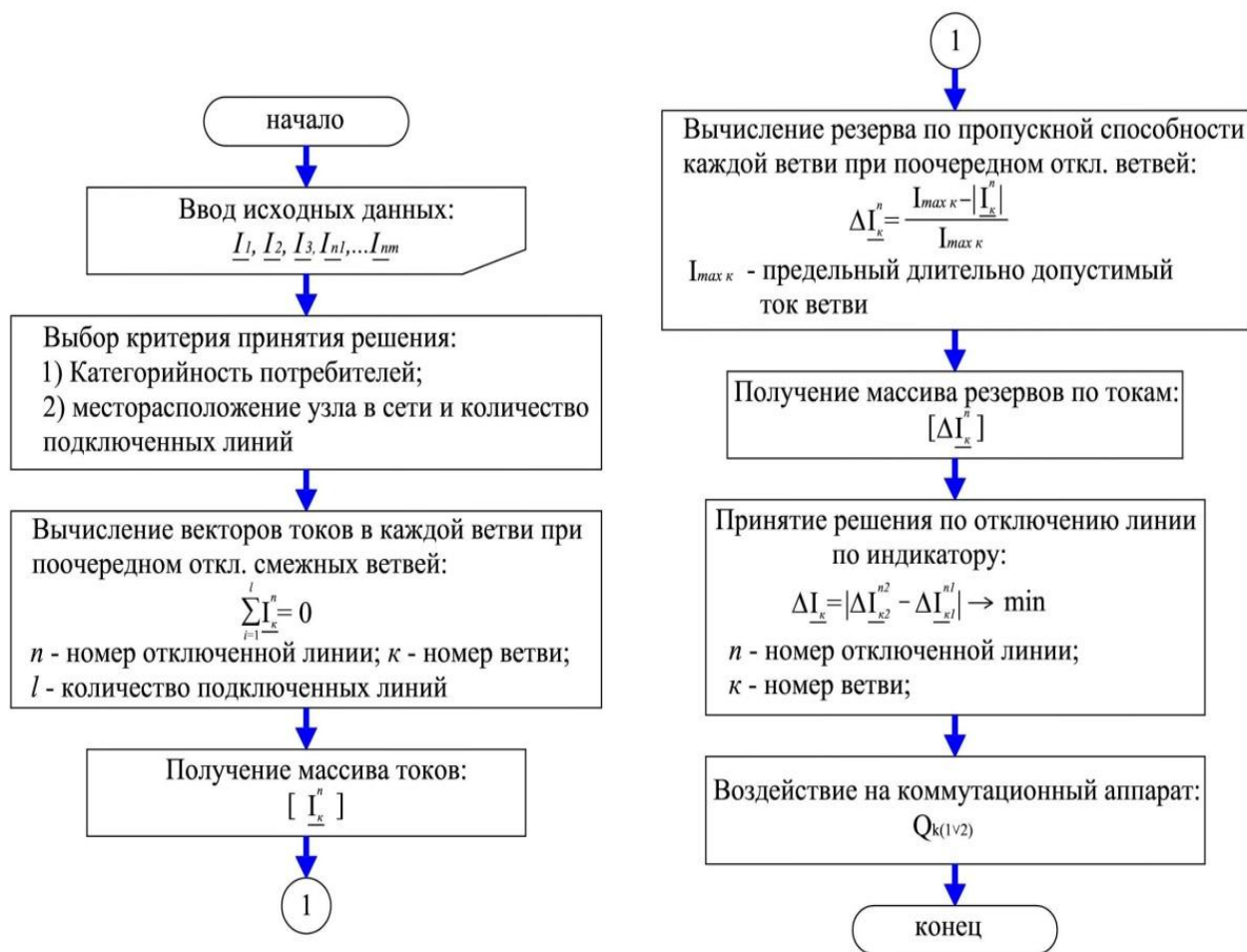


Рис. 3. Алгоритм отключения/включения линий при изменении динамики сетевой нагрузки



Рис. 4. Блок-схемы БАРС и отключения нагрузки

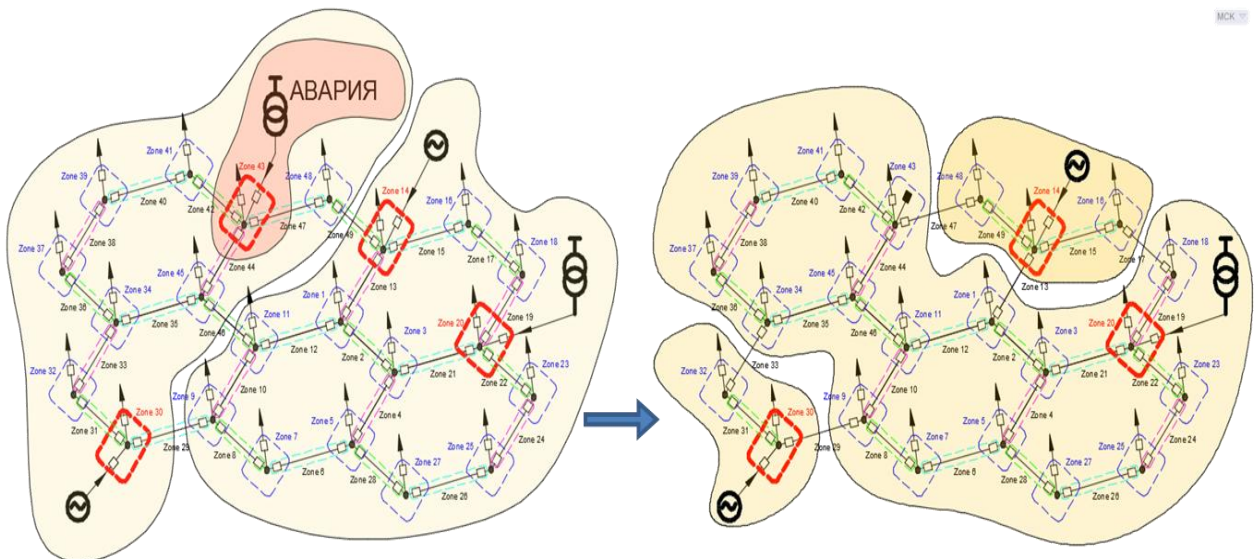


Рис. 5. «Пересборка» сети посредством алгоритма БАРС после отключения источника

Алгоритм реконфигурации включает обнаружение зоны отказа и соответствующих выключателей, изолирующих аварийный участок, делает оценку результата отказа и формирует решение по архитектуре сети после отказа с ми-

нимальной потерей загрузки, при этом возможно отключение части нагрузки в соответствии с приоритетом.

На рис. 5 представлены зоны сети, в рамках которых анализируется баланс мощности. Каждой зоне сети соответствует вектор инцидентности – вектор состояния выключателей в каждой зоне. Результатом работы алгоритма является управляющее воздействие на выключатели сети, т.е. матрица-вектор состояния сети.

Тенденция увеличения значимости бесперебойности питания потребителей, числа ответственных потребителей диктует более жесткие требования к электроснабжающим организациям и электросетевому комплексу в целом. Переход к иерархическому агентному управлению при внедрении новых структурных подходов к организации сети позволит получить положительный эффект увеличения надежности электроснабжения потребителей.

Библиографический список

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной. Редакция 5,0. – М., 2012.
2. Лоскутов, А.Б. Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ // А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. 2012. № 5. С. 11–17.
3. Лоскутов, А.Б. Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией // А.Б. Лоскутов [и др.] // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 3–7.
4. Лоскутов, А.Б. Гексагональные сети – сети с автоматическим управлением и распределением электроэнергии // А.Б. Лоскутов, Д.В. Зырин, А.А. Лоскутов // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. – Н. Новгород. 2013.

УДК 621.311.26

Е.Н. СОСНИНА, А.В. ШАЛУХО, И.А. ЛИПУЖИН

SIMULINK-МОДЕЛЬ ВЕТРОДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ВСТАВКОЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Simulink-модель предназначена для исследования показателей устойчивости локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией (ВДЭС) и позволяет имитировать режимы работы ВДЭС при изменении электрической нагрузки (от 0 до 100 кВт) и скорости ветрового потока (от 0 до 10 м/с). Характер нагрузки – преимущественно активный. Уровень рабочего линейного напряжения локальной системы электроснабжения — 380 В, частота 50 Гц.

Ключевые слова: ветродизельная электростанция, ветроэлектрическая установка, возобновляемые источники энергии, дизель-генераторная установка, локальная система электроснабжения, имитационное компьютерное моделирование, устойчивость.

Simulink-model is designed for the study of stability indicators of local power supply systems with wind-diesel power plant (WDPP) and allows simulating the operating modes of WDPP

when changing electrical load (from 0 to 100 kW) and speed of wind flow (from 0 to 10 m/s). The load type is mainly active. The working line to line voltage of the local power supply system is 380 V and frequency is 50 Hz.

Key words: wind-diesel power plant, wind electrical plant, renewable energy sources, diesel generator, local power supply system, computer simulation, stability.

Исследование устойчивости локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией (ВДЭС) предложено проводить на имитационной компьютерной модели [1]. Модель разработана на графическом языке программирования и создана с использованием интерактивного инструмента для моделирования, имитации и анализа динамических систем *Simulink*.

Структурная схема *simulink*-модели локальной схемы электроснабжения с ВДЭС в вставкой постоянного тока приведена на рис. 1.

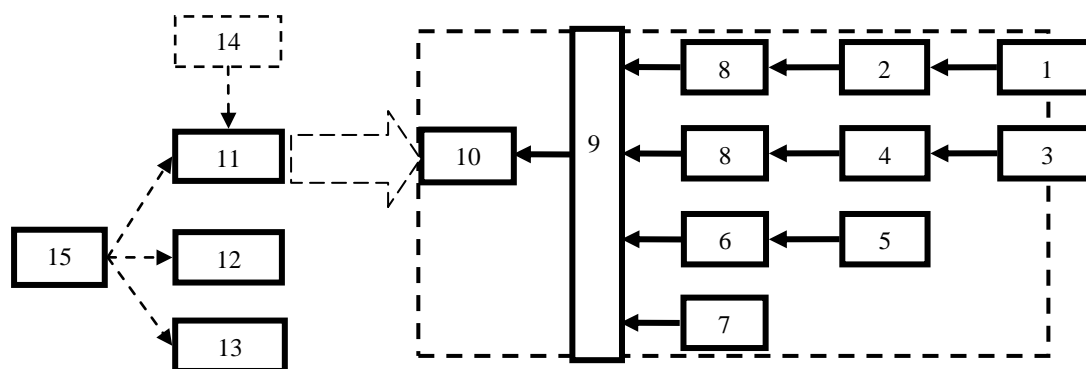


Рис. 1. Структурная схема *simulink*-модели локальной системы электроснабжения с ВДЭС:

1 – ветровая турбина; 2 – синхронный генератор на постоянных магнитах; 3 – дизель-генератор; 4 – синхронный генератор; 5 – аккумуляторная батарея; 6 – блок контроля заряда; 7 – балластная нагрузка; 8 – выпрямитель; 9 – шина постоянного тока; 10 – автономный инвертор; 11 – ветро-дизельная электростанция; 12 – распределительная электрическая сеть; 13 – нагрузка; 14 – ветер; 15 – измерительные устройства

Simulink-модель состоит из четырех основных блоков: ВДЭС, распределительной электрической сети, комплексной нагрузки и измерительных устройств [2].

Блок ВДЭС включает в себя три источника энергии: ветроэлектрическую установку (ВЭУ), дизель-генераторную установку (ДГУ) и аккумуляторную батарею (АБ); которые соединены между собой на стороне выпрямленного напряжения – через шину постоянного тока. Входными данными для блока являются параметры ветра и уровень заряда аккумуляторной батареи в начальный момент симуляции. На выходе – трехфазное напряжение 380 В частотой 50 Гц.

Ветровая турбина с горизонтальной осью вращения (номинальная скорость ветра 10 м/с) моделируется блоком *Wind Turbine*, входными данными для которого является скорость генератора, угол атаки и скорость ветра, которые собраны в подсистеме *WT input data*. Модель основана на стационарных энергетических характеристиках турбины. Выходная механическая мощность турбины P_m (Вт) описывается следующим уравнением:

$$P_{mec} = \frac{c_p \rho A v^3 \lambda}{2} \quad (1)$$

где c_p – коэффициент использования энергии ветра; λ – коэффициент быстроходности (отношение скорости вращения лопастей и скорости ветра); β – угол наклона лопасти, град.; ρ – плотность воздуха, кг/м³; A – ометаемая площадь, м²; v – скорость ветра, м/с.

Выходной сигнал – отрицательное значение механического крутящего момента на валу турбины, подается на вход синхронного генератора на постоянных магнитах, представленного блоком *Permanent Magnet Synchronous Machine*, работающего в генераторном режиме.

Подсистема *Diesel Engine Speed & Voltage Control* моделирует дизельный двигатель с системой управления и автоматический регулятор возбуждения. Входными сигналами являются требуемая частота оборотов w_{ref} , фактическое значение оборотов w_m , а также опорное значение напряжения V_{tref} и фактическое значение напряжения на статоре v_d и v_q . Модель двигателя является упрощенной, и ее параметры задаются в операторной форме в виде передаточных функций:

$$H_c = \frac{k}{T_1 s + 1} \quad (2)$$

$$H_a = \frac{1}{T_4 s^2 + T_5 s + 1} \quad (3)$$

где H_c – передаточная функция регулятора оборотов; k – коэффициент усиления; T_1-T_3 – постоянные времени регулятора, с; H_a – передаточная функция привода; T_4-T_6 – постоянные времени привода, с.

На вход блока явнополюсной синхронной машины, работающей в генераторном режиме, *Synchronous Machine* подаются два сигнала: механическая мощность на валу, отдаваемая дизелем P_{mec} , и напряжение возбуждения V_f .

Накопитель электрической энергии представлен блоком *Battery*, моделирующим сборку из свинцово-кислотных аккумуляторов. Батарея подключается к ШПТ через блок контроля заряда *DC/DC Converter*. Блок *Battery* реализует обобщенную динамическую модель аккумулятора электрической энергии.

Модель свинцово-кислотного аккумулятора описывается двумя уравнениями состояния: заряда и разряда. Подзаряд батареи описывается функцией f_1 :

$$C \frac{di}{dt} = -i - \frac{1}{K} \frac{di}{dt} + \frac{1}{K} \frac{di^*}{dt} \quad (4)$$

где it – емкость, отдаваемая аккумулятором, А·ч; $i^* < 0$ – низкочастотный ток динамики, А; i – ток батареи, А; $Exp(s)$ – экспоненциальная зона динамики, В; E_0 – постоянная напряжения, В; K – постоянная поляризации (А·ч⁻¹) или сопротивление поляризации (Ом); Q – максимальная емкость батареи (А·ч); $Sel(s)=1$ во время зарядки аккумулятора.

Разряд батареи описывается функцией $f_2 (i^* > 0)$:

$$\text{[Complex mathematical expression]} \quad (5)$$

где $Sel(s)=0$ при разрядке батареи.

Если мощность, выдаваемая ВЭУ, превышает мощность потребляемую нагрузкой, через выключатель $Q4+m$ подключается блок, моделирующий балластную нагрузку *Ballast resistance*, представляющий собой активное сопротивление.

Источники энергии, аккумулятор и балластная нагрузка подключены к шине постоянного тока, представленной подсистемой *DC bus*. Для преобразования переменного тока ВЭУ и ДГУ в постоянный используются выпрямители *AC/DC1* и *AC/DC2*.

К выводам автономного инвертора *DC/AC* через распределительную электрическую сеть подключается блок комплексной нагрузки *Electrical load*. Нагрузка может быть представлена одной из трех моделей: в виде трехфазных симметричных постоянных сопротивлений R , L и C ; с помощью подсистемы *Variable Load*, которая позволяет графически задавать график нагрузки потребителя; в виде трехфазного асинхронного двигателя 0,4 кВ с короткозамкнутым ротором (модель *Asynchronous Machine*), на вход Tm которого подается переменный механический вращающий момент блоком *Variable torque*. Выбор способа задания нагрузки осуществляется внутри подсистемы, включением/отключением выключателей Q , $Q1$ и $Q2$.

Общий вид модели, без блоков измерительных устройств, представлен на рис. 2.

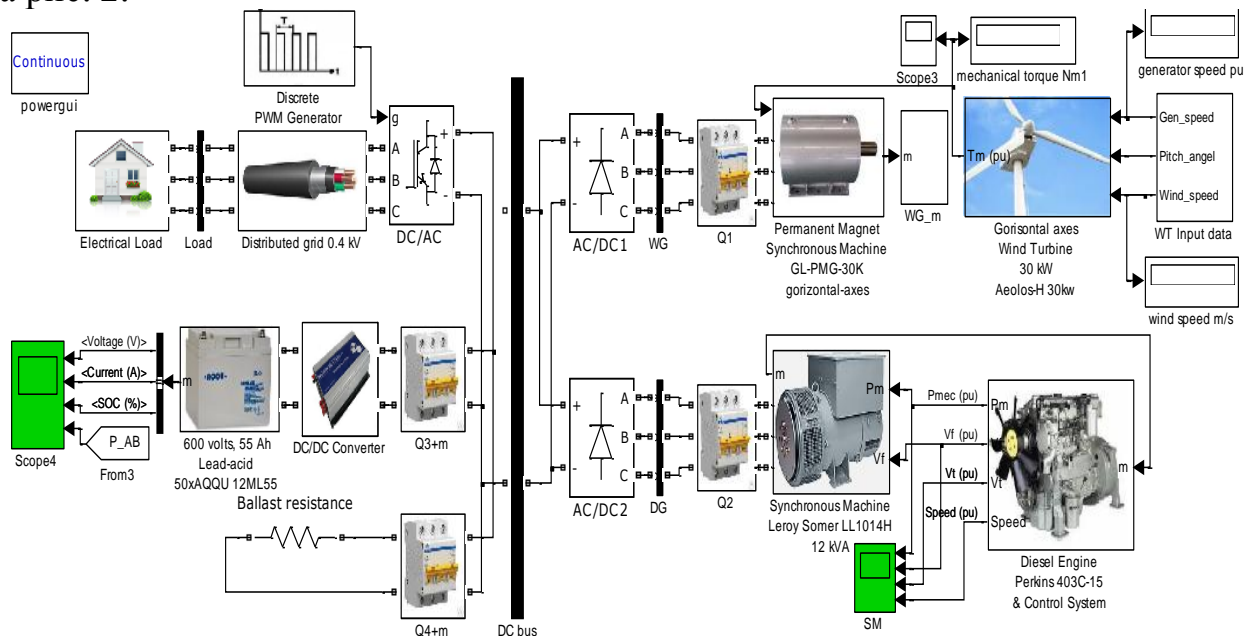


Рис. 2. Общий вид имитационной модели

Основные допущения, принятые при создании модели:

- скорость ветра и мощность нагрузки изменяются дискретно;
- угол атаки лопастей ветротурбины постоянен и равен 0° ;

- в модели ветровой турбины жесткость трансмиссии принимается равной бесконечности;
- модели генераторов и двигателей не учитывают эффект насыщения стали магнитопровода, эффект вытеснения тока в обмотке ротора и потери в магнитопроводе;
- модель системы возбуждения синхронного генератора не учитывает эффект насыщения возбuditеля;
- параметры модели аккумуляторной батареи вычисляются на основе разрядных характеристик и не изменяются для режима заряда;
- внутреннее сопротивление аккумулятора считается постоянным во время циклов заряда-разряда и не зависит от величины тока;
- емкость аккумулятора не зависит от амплитуды тока;
- не учитывается саморазряд аккумулятора;
- аккумулятор не имеет эффекта памяти;
- модель не учитывает изменения температуры.

Использование данных допущений позволяет значительно упростить модель и в отдельных случаях, использовать стандартные модели элементов.

Режим работы ЛСЭС с ВДЭС задается включением/отключением выключателей $Q1-Q4$. Могут моделироваться как режимы подключения нагрузки к отдельному источнику питания, так и параллельная работа ВЭУ и ДГУ.

В дальнейшем предлагается привязать к существующей силовой части систему управления с обратной связью по току и напряжению. Диодные мосты $AC/DC1$ и $AC/DC2$ необходимо заменить на управляемые тиристорные выпрямители, позволяющие осуществить коррекцию выходных параметров автономных источников питания (ВЭУ и ДГУ) [3].

Модернизация модели позволит избежать возникновения уравнильных токов при параллельной работе источников питания и обратного потока мощности в ДГУ, устранив, таким образом, возможные причины нарушения устойчивости исследуемой системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.574.21.0009 о предоставлении субсидии от 17.06.2014). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0009.

Библиографический список

1. **Соснина, Е. Н.** Методы оценки статической устойчивости локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией / Е.Н. Соснина [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.- техн. статей XXXIII регион. науч.-техн. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2014. С. 53–57.
2. Повышение эффективности и устойчивости локальной системы электроснабжения на основе оптимизации работы гибридного источника энергии с ветрогенератором. Этап 1. Выбор направления исследований. Теоретические исследования повышения эффективности и устойчивости локальных систем электроснабжения с ветродизельными электростанциями (ВДЭС). Промежуточный отчет о прикладных научных исследованиях. Шифр 2014-14-576-

- 0050-072. Соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0009 от 17.06.2014 Н.Новгород: НГТУ, 2014. – 157 с. - №ГР 114101670043.
3. **Коваленко, П.В.** Система обеспечения параллельной работы генераторов различной мощности на общую шину постоянного тока / П.В. Коваленко, В.В. Коваленко, С.Ф. Степанов // Вестник СГТУ. 2012. №2 (66). Вып. 2. С. 77–81.

УДК 621.311

Н.В. ГРУНТОВИЧ, С.Г. ЖУКОВЕЦ, С.А. ЖЕРАНОВ, Е.Л. ШЕНЕЦ

ОЦЕНКА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ПО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Статья посвящена методам диагностирования энергоэффективности промышленных производств различных отраслей промышленности с однофакторных моделей зависимости удельного расхода энергоресурса от объема выпуска продукции и исследования структуры энергоресурса для выборки 116 производств различных отраслей промышленности.

Ключевые слова: диагностирование энергоэффективности, горизонтальная регулировочная способность по энергоэффективности, коэффициент чувствительности модели по энергоэффективности.

The article deals with the methods of energy efficiency diagnosis of industrial productions in different branches of industry beginning from single-factor models of dependence of specific energy resource consumption on a product yield and research of the energy resource structure for a sample from 116 productions in different branches of industry.

Key words: energy efficiency diagnosis, horizontal adjusting capability of energy efficiency, sensitivity index of a model of energy efficiency.

Современные промышленные предприятия представляют собой сложнейшие инженерные комплексы, состоящие из отдельных технологических подсистем и функционирующие в условиях внешних и внутренних воздействий. Как потребители электрической энергии (ЭЭ), большинство современных промышленных предприятий характеризуются сложной взаимосвязью между энергетикой и технологией. Это означает, что на конечное потребление ЭЭ затрачиваемой на производство продукции влияет значительное количество факторов.

К объективным факторам, оказывающим влияние на формирование общих и удельных расходов ЭЭ, следует отнести:

- производственную программу выпуска продукции;
- характеристики используемого сырья и окружающей среды;

- состояние технологического оборудования.
К субъективным факторам:
- внедренные энергосберегающие мероприятия;
- квалификационные навыки производственного персонала;
- выбор того или иного состава технологического оборудования для выполнения заданной производственной программы.

Для диагностирования и прогнозирования удельных расходов ТЭР на выпуск продукции промышленных потребителей могут использоваться многофакторные аддитивные уравнения регрессии электропотребления (ЭП) от влияющих факторов. Для большинства промышленных предприятий (ПП) допускается учет только объемов выпускаемой продукции, так как, например, изменение расхода ЭЭ, обусловленное изменением производственной программы, значительно больше изменения, обусловленного остальными факторами. Для потребителей с простой (или сводящейся к ней) взаимосвязью между энергетикой и технологией удельные расходы ТЭР от объемов производства имеют известный вид, кВт·ч/ед. прод:

$$W_{уд.ЭЭ} = w_{уд.техн} + W_{усл.пост} / П, \quad (1)$$

где $W_{усл.пост}$ – составляющая потребления энергоресурса, не зависящая от объема выпускаемой продукции, кВт·ч, (т у.т.); $w_{уд.техн}$ – технологический удельный расход энергоресурса на выпуск единицы продукции, (кВт·ч)/ед. прод.; $П$ – объем производства продукции, ед. изм.

Для 116 производств различных отраслей промышленности были построены однофакторные модели зависимости удельного расхода энергоресурса от объема выпуска продукции и произведена оценка горизонтальной регулировочной способности по энергоэффективности.

Различают горизонтальную регулировочную способность по ЭЭФ и вертикальную регулировочную способность по ЭЭФ (за счет управления технологическими параметрами и характеристиками сырья). Суть горизонтального регулирования $W_{уд.ТЭР}$ состоит в том, что при изменении объемов выпуска продукции рабочая точка гиперболической кривой зависимости $W_{уд.ТЭР} = f(П)$ смещается в сторону уменьшения или увеличения $W_{уд.ТЭР}$, соответственно.

Потенциал горизонтального повышения ЭЭФ рассчитывается относительно минимального объема выпуска продукции по выражению

$$\Delta ЭЭФ = (W_{уд.Пmax} - W_{уд.Пmin}) \cdot 100\% / W_{уд.Пmin}, \quad (2)$$

где $W_{уд.Пmax}$ – значение удельного расхода энергоресурса, соответствующего максимальному объему выпуска продукции; $W_{уд.Пmin}$ – значение удельного расхода энергоресурса, соответствующего минимальному объему выпуска продукции.

Из 116 исследуемых производств, установлено, что 41 промышленное

предприятие имеют горизонтальный потенциал повышения ЭЭФ более 50%, 51 ПП имеют горизонтальный потенциал повышения ЭЭФ от 20 до 50%, 24 ПП имеют горизонтальный потенциал повышения ЭЭФ ниже 20%.

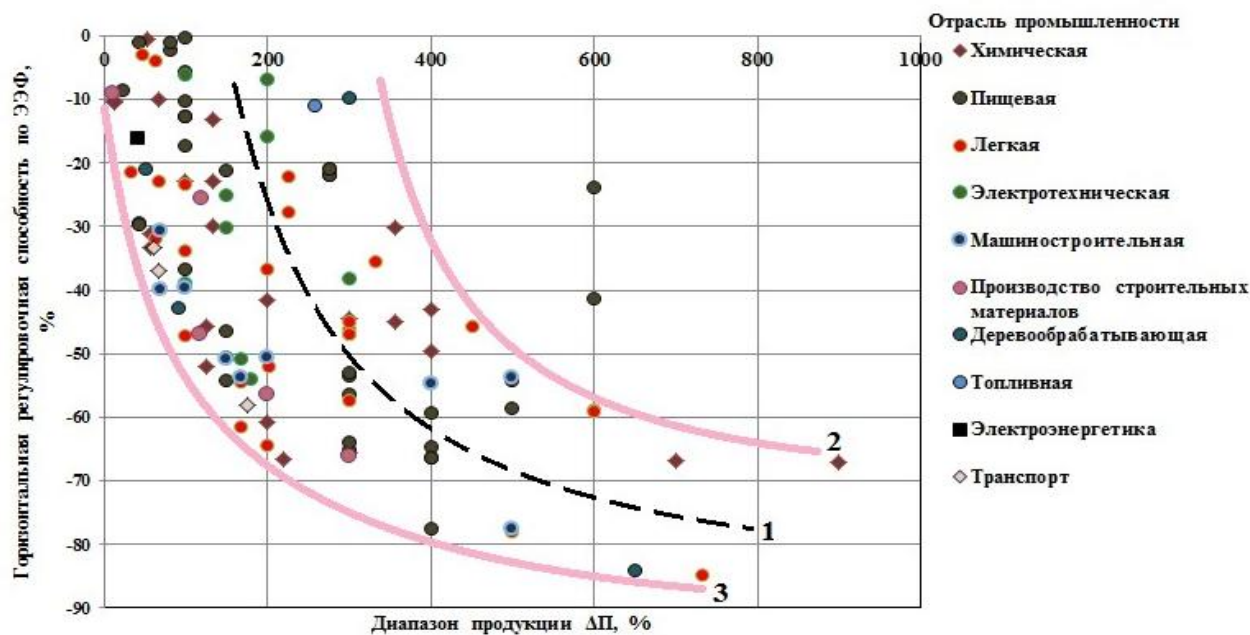


Рис. 1. Область горизонтальной регулировочной способности по ЭЭФ исследуемой выборки ПП

На рис. 1 область горизонтальной регулировочной способности по ЭЭФ ограничена кривыми 2 и 3. При этом если провести условную линию, посередине разделяющую данную область, то получим две области, ограниченные линиями: 1-2 – область низкой регулировочной способности по энергоэффективности; 1-3 – область высокой регулировочной способности по энергоэффективности.

Такие отрасли промышленности, как производство строительных материалов и транспорт имеют высокую регулировочную способность по ЭЭФ, что указывает на работу в условиях частого изменения производственной программы. При непопадании промышленных производств ни в одну из областей (к примеру, на рис. 1, два производства пищевой отрасли промышленности) можно говорить об их неэффективной регулировочной способности, так как темпы роста выпуска продукции во много раз опережают увеличение ЭЭФ.

Именно наличие условно-постоянной составляющей расхода энергоресурсов в общем потреблении ТЭР определяет гиперболический характер зависимости удельных расходов энергоресурсов от объема выпуска продукции. Для электрической энергии к условно-постоянной составляющей расхода относят затраты электроэнергии на освещение, вентиляцию, вспомогательные производственные нужды. Однако для производств, имеющих в технологическом процессе, например печное оборудование, в технологическом расходе ЭЭ также можно выделить условно-постоянную составляющую, которая связана с разогревом и поддержанием в работоспособном состоянии технологического обо-

рудования. Для ЭЭ высокие значения доли $W_{\text{усл.-пост.}}$ могут свидетельствовать о том, что производство не достигло проектной производительности и оно сильно перегружено станочным оборудованием, которое неэффективно используется.

В отличие от моделей ЭЭ, исследуемые модели тепловой энергии и топлива относятся непосредственно к технологии. Структурно затраты тепловой энергии на обогрев и вентиляцию зданий и сооружений, а также на горячее водоснабжение выделяются отдельно. Из исследуемой выборки многие производства имеют высокую долю условно-постоянной технологической составляющей в технологическом расходе энергоресурса. В данную группу вошли: шинное производство, производство метанола, производство спирта, производство листового стекла, производство керамических изделий необходимым условием их энергоэффективности является поддержание высокой технологической загрузки. Для указанных производств влияние условно-постоянной технологической составляющей топлива на формирование результирующей ЭЭФ меньше, чем для условно-постоянной составляющей ЭЭ тех же производств.

Установлено, что из 116 производств 54 имеют вес условно-постоянной составляющей в общем расходе ТЭР свыше 40%. Для указанной группы производств эффективность внедренных мероприятий по энергосбережению будет очень сильно зависеть от загрузки производства.

Предложен новый критерий диагностирования ЭЭФ – коэффициент чувствительности ЭЭФ, о.е.:

$$KЧ = \frac{\Delta ЭЭФ}{\Delta П}, \quad (3)$$

где $\Delta ЭЭФ$ - потенциал горизонтального повышения ЭЭФ относительно минимального объема выпуска продукции, %; $\Delta П$ - рабочий диапазон отклонения выпуска продукции от минимального значения, % .

Данный показатель оценивает темп роста ЭЭФ (снижение удельного расхода энергоресурса) при увеличении объема выпуска продукции.

Таблица 1

Результаты ранжирования $KЧ$ по ЭЭФ 116 ПП

Диапазон изменения $KЧ$ ЭЭФ, о.е.	Количество ПП, ед.	Среднее значение $KЧ$ ЭЭФ в группе, о.е.
до - 0,06	10	-0,028
от - 0,06 до - 0,1	16	-0,08
от - 0,1 до - 0,2	39	-0,15
от - 0,2 до - 0,3	12	-0,23
от - 0,3 до - 0,4	19	-0,34
от - 0,4 до - 0,6	14	-0,48
Ниже - 0,6	6	-0,73

Установлено, что $KЧ$ ЭЭФ находится в диапазоне от 0 до - 0,9. Близкое к 0 значение $KЧ$ указывает, что на изменение удельного расхода производства

изменение объема выпуска продукции практически не оказывает влияние и резерв горизонтального регулирования ЭЭФ (за счет повышения загрузки технологического оборудования) практически исчерпан. Производства, у которых $KЧ$ по ЭЭФ $< -0,2$, должны быть объектами пристального внимания энергоаудиторов, поскольку эффект от внедряемых мероприятий по энергосбережению будет сильно зависеть от существующего уровня загрузки производства.

На рис. 2 представлено поле зависимости $KЧ$ ЭЭФ от вариации диапазона выпуска продукции для 116 производств.

Если $KЧ$ ЭЭФ стремится к -1 , то изменение 1% объема выпуска продукции в сторону его увеличения вызовет такое же изменение (в $\%$) соотношения условно-постоянной составляющей и технологической составляющих расхода ТЭР. Следовательно, для таких производств даже при небольшом изменении загрузки оборудования доля условно-постоянной составляющей ТЭР в общем его расходе будет существенно снижаться. Как видно из рис. 2, шесть производств имеют $KЧ$ ЭЭФ меньше $-0,6$.

Для указанных производств основным источником энергии, который используется для выпуска продукции, является природный газ и эффект от горизонтальной регулировочной способности будет максимальным, что является особенно актуальным в условиях высокой стоимости природного газа.

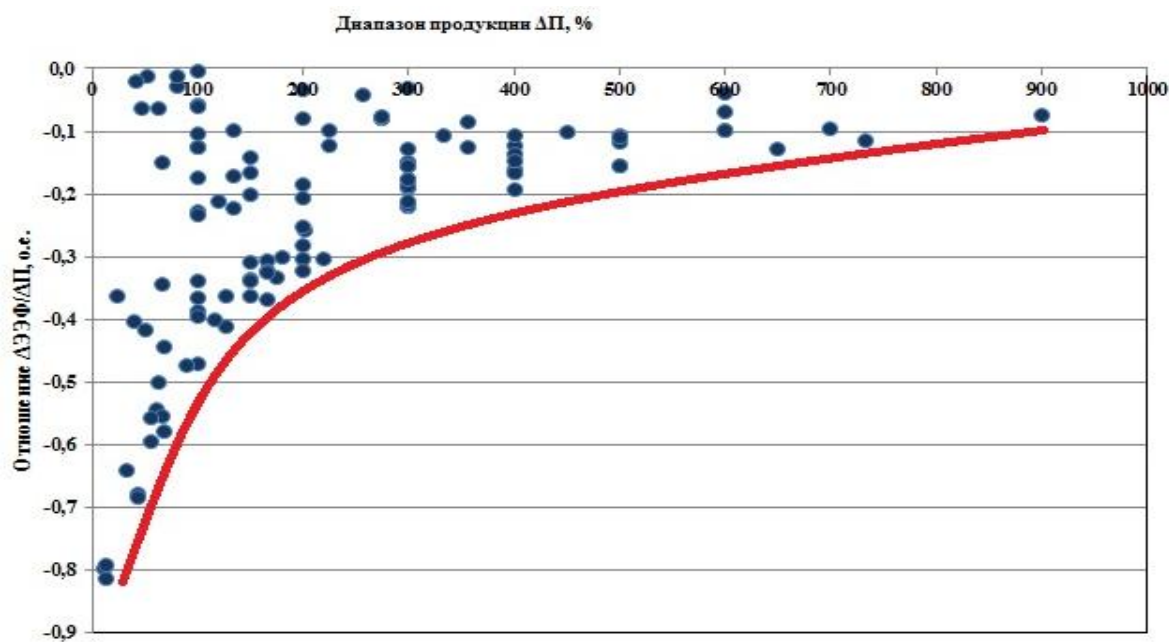


Рис. 2. Поле зависимости $KЧ$ по ЭЭФ от диапазона выпуска продукции 116 производств

Библиографический список

1. **Грунтович, Н.В.** Экспертные системы управления энергоэффективностью и энергетической безопасностью // Энергоэффективность, 2014. №4. С. 16–20.
2. **Токочакова, Н.В.** Управление энергоэффективностью промышленных потребителей на основе моделирования режимов электропотребления // Энергетика. 2006. № 3. С. 67–75.

УДК 621.316

А.В. ШАГИДУЛЛИН, Е.И. ГРАЧЕВА

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ ДО 1КВ

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

Статья посвящена обоснованию проведения различных мероприятий по экономии электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Рассматриваются энергоэффективность и возможный экономический эффект от различных вариантов замены коммутационных аппаратов.

Ключевые слова: автоматический выключатель, магнитный пускатель, эквивалентное сопротивление, низковольтная сеть, потери электрической энергии.

The article is devoted to the justification of a variety of activities for saving energy in low-voltage networks workshop. We consider energy efficiency and the potential economic impact of the various options for replacing switchgear.

Key words: automatic switch, magnetic starter, equivalent resistance, low-voltage network, loss of electrical power.

Нерентабельность ремонта коммутационного оборудования приводит к тому, что оно доживает свой «срок» до отказа. В свою очередь, физический износ оборудования может стать причиной роста эксплуатационных затрат, возникновения технологических нарушений и несчастных случаев.

Таким образом, представляет интерес возможный экономический эффект от замены коммутационного оборудования внутрицеховых сетей до его отказа. Для реализации поставленных целей исследована силовая цепь участка механического цеха, представленный на рис. 1, который включает в себя 16 электроприемников мощностью 0,5 – 5,5 кВт. Данная цеховая сеть питается от распределительного пункта СП-1. Параметры сети следующие: средняя длина линий $l = 16,5$ м, количество отходящих линий от СП-1 $n = 16$, средний допустимый длительный ток кабельной линии марки ВВГнг-LS $I_{\text{доп ср}} = 20,4$ А, среднеквадратичный коэффициент загрузки линий $k_3 = 0,46$, температура окружающей среды $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, напряжение сети $U_{\text{ср}} = 380$ В, средний коэффициент мощности приемника электроэнергии $\cos\varphi = 0,59$.

Эквивалентное сопротивление данной радиальной сети определяется по выражению [1]

$$R'_9 = \frac{0,00125 \cdot I_{\text{доп ср}}^{1,627} \cdot l_{\text{ср}} \left[1 + 0,00428 \left(k_3^2 (70 - \theta_0) + \theta_0 - 20 \right) \right] + \sum r_k}{n}, \quad (1)$$

где l_{cp} – средняя длина проводника, м; θ_0 – температура окружающей среды θ_0 , °С, 70 – допустимая температура нагрева жилы кабеля; $\sum r_k$ – суммарное сопротивление контактов коммутационных аппаратов, установленных на линии [3].

На каждой линии установлены один автоматический выключатель ВА-47 и один магнитный пускатель ПМЛ.

Известно, что во время эксплуатации контакты изнашиваются. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата R_0 увеличивается [4].

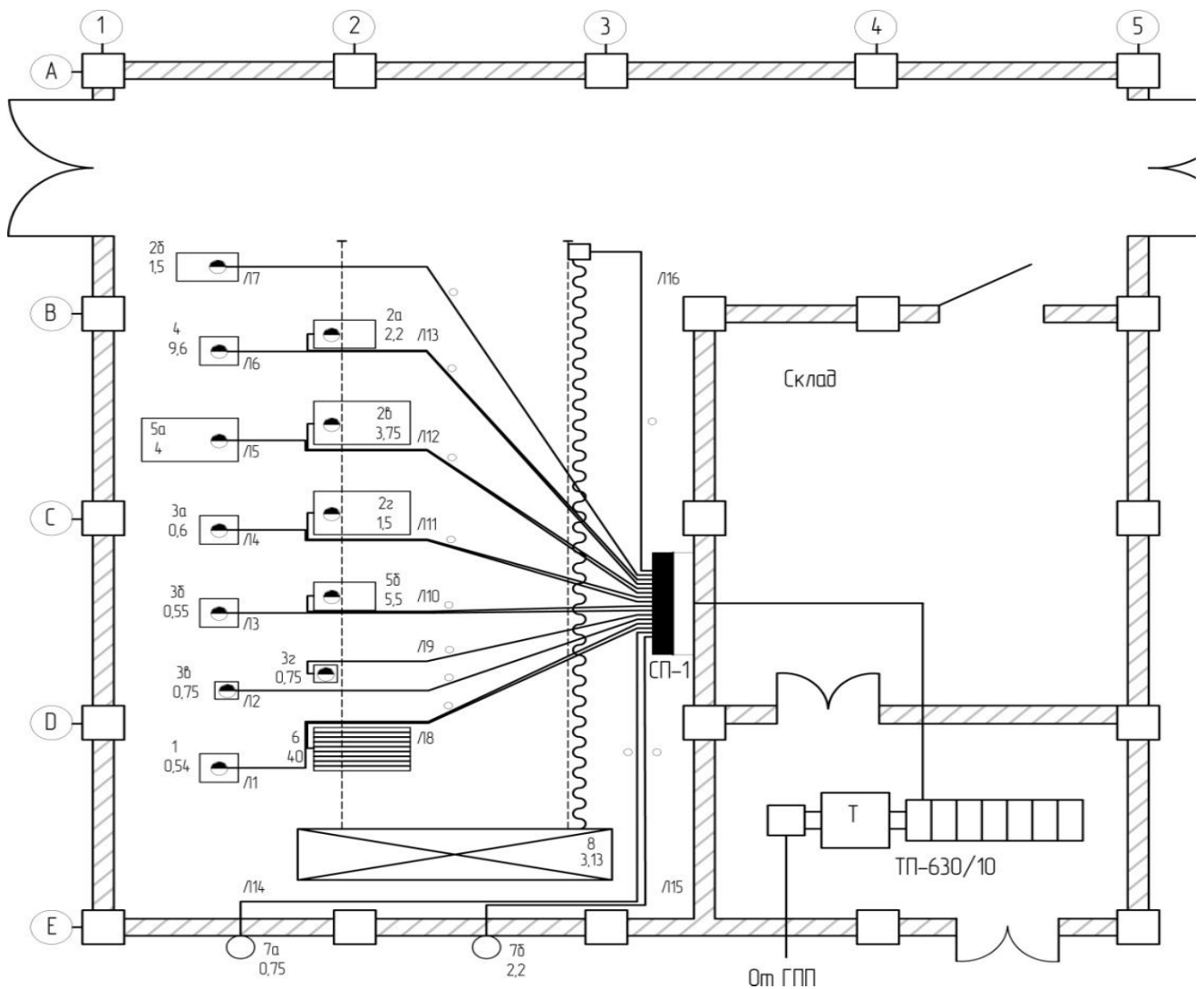


Рис. 1. Радиальная схема цеховой сети

По результатам исследований предполагаются четыре варианта режимов замены коммутационных аппаратов цеховой сети 0,4 кВ в процессе эксплуатации:

1) замена всех автоматических выключателей (16 шт.) и магнитных пускателей (16 шт.) по истечении паспортного срока службы. Автоматические выключатели в режиме работы АС-3 при 3-4 коммутациях в сутки, отработают

свой срок службы в 6.000 коммутаций в среднем за десять лет. Магнитные пускатели в режиме работы АС-3 (12-14 коммутаций в час) электрическую износостойкость в 300.000 коммутаций исчерпают за десять лет;

Таким образом, замена всех аппаратов по истечении ресурса должна быть проведена через 10 лет.

2) замена всех коммутационных аппаратов (32 шт.) через 80% отработанного временного ресурса;

3) замена только автоматических выключателей (16 шт.) по достижении 80% отработанного ресурса;

4) замена только магнитных пускателей (16 шт.) по достижению 80% отработанного ресурса.

Изменение эквивалентного сопротивления участка сети для рассмотренных вариантов замены аппаратов представлено на рис. 2.

С экономической точки зрения представляет интерес рассмотрения срока окупаемости замененных коммутационных аппаратов за счет снижения потерь электроэнергии.

Потери электроэнергии определялись по методу среднеквадратичного тока [6]:

$$\Delta W = 3R \int_0^T I^2(t) dt = 3RI_{\text{СК}}^2 T, \quad (2)$$

где $I_{\text{СК}}$ – среднеквадратичный ток за время T ; T – среднее число часов за смену.

При стоимости электроэнергии 4 руб./кВт, стоимости автоматических выключателей 40 руб./шт., магнитных пускателей 200 руб./шт. и стоимости монтажа нового аппарата - демонтажа старого 50 руб. получаются следующие результаты:

- стоимость замены всех аппаратов составляет 5840 руб.;
- данные по стоимости потерь электроэнергии при проведении различных мероприятий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Динамика изменения стоимости потерь электроэнергии во внутрицеховой сети в зависимости от срока эксплуатации и режимов замены аппаратов

Период работы до замены, лет	Стоимость потерь э/э тыс. руб.		
	6	8	10
Без замены	21,36	24,8	29,36
Замена всех при 100% ресурса	21,36	24,8	17,2
Замена всех при 80% ресурса	21,36	17,2	17,68
Замена АВ при 80% ресурса	21,36	21,2	24,24
Замена МП при 80% ресурса	21,36	20,76	22,84

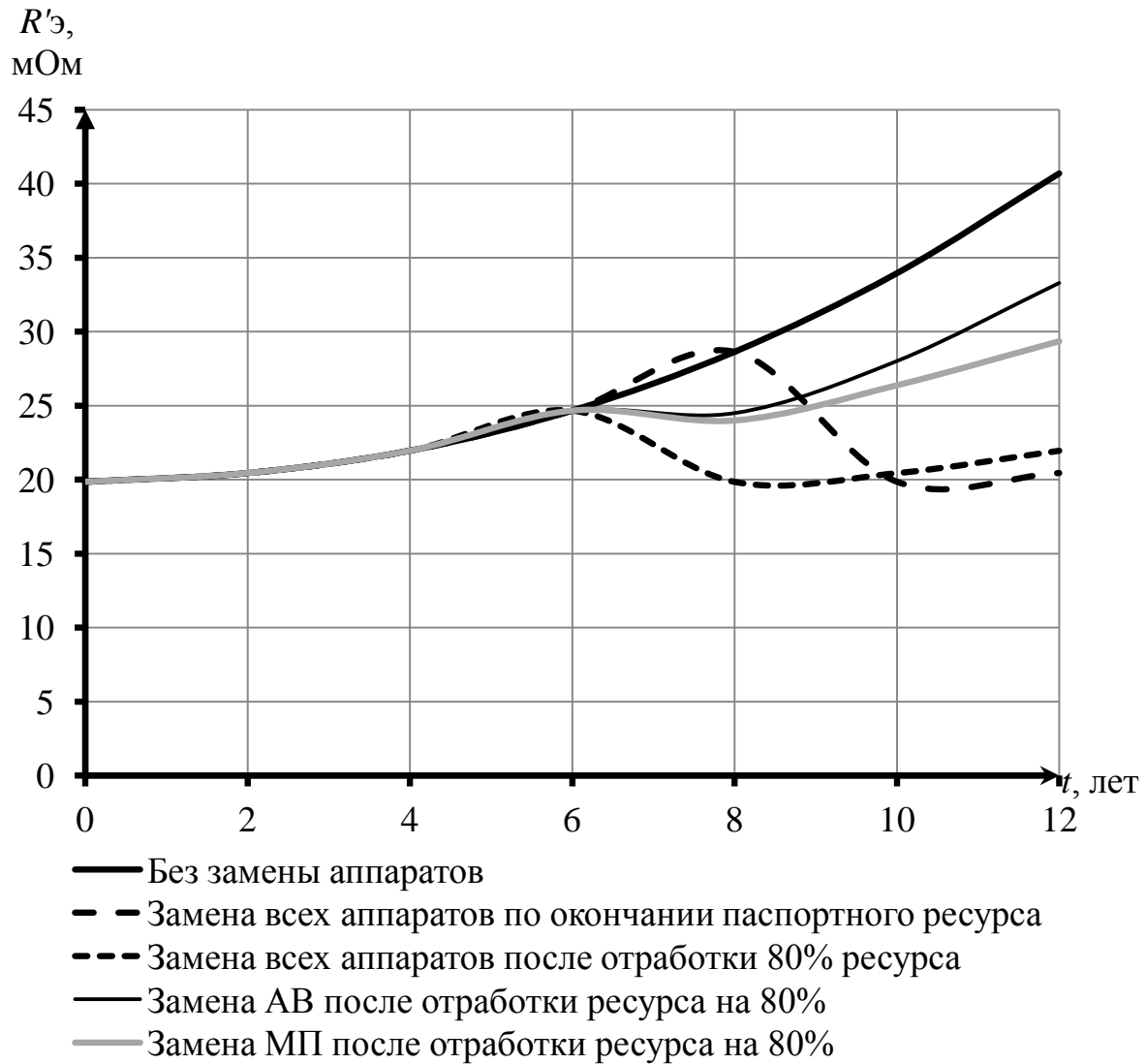


Рис. 2. Изменение эквивалентного сопротивления участка внутрицеховой сети в зависимости от срока эксплуатации и режимов замены низковольтных аппаратов

Замена аппаратов на более раннем сроке обслуживания (80% отработанного ресурса) показала, что более ранняя замена части аппаратов дает свой экономический эффект. Представлял интерес, на каком этапе эксплуатации замена автоматических выключателей и магнитных пускателей становится нерентабельной.

Таким образом, замена всех (32 шт.) коммутационных аппаратов по истечении паспортного срока службы приводит к 50% экономии потерь электроэнергии в линиях цеховой сети в сравнении с продолжающими работать АВ и МП. Замена всех (32 шт.) коммутационных аппаратов при 80% отработанного ресурса позволяет снизить потери электроэнергии на 46%, замена АВ и МП по отдельности – на 18% и 28% соответственно.

При цене автоматического выключателя 40 руб. и магнитного пускателя 200–350 руб. общая стоимость установленных аппаратов составляет 5,8 тыс. руб.

Замена по истечении паспортного срока службы всех (32 шт.) коммутационных аппаратов с учетом снижения потерь электроэнергии при стоимости потерь электроэнергии 4 руб./кВтч позволит сэкономить за 2 года 11,7 тыс. руб., учитывая стоимость монтажных работ. Экономия при замене всех (32 шт.) коммутационных аппаратов при 80% отработанного ресурса с учетом снижения потерь электроэнергии составляет 10,4 тыс. руб. При замене АВ (16 штук) при 80% отработанного ресурса, с учетом снижения потерь электроэнергии, экономия составит 5,0 тыс. руб. Экономия при замене 16 МП составит 5,4 тыс. руб. за счет снижения потерь электроэнергии.

Замена коммутационных аппаратов при отработке ресурса на 80% является эффективным мероприятием, позволяя достичь экономии от замены 32х АВ и МП 10,38 тыс. руб. для участка механического цеха с суммарной мощностью по силовому пункту 26,9 кВт. Замена при отработке ресурса на 60% позволяет окупить аппараты, но особого экономического эффекта это мероприятие не приносит. Замена на 40% отработанного ресурса является убыточной.

Библиографический список

1. **Пищур, А.П.** Оборудование в эксплуатации. Ремонт, ретрофит или полная замена автоматических выключателей? // *Новости ЭлектроТехники*, 2010. № 4(64). ООО "АЗБУКА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА" (официальное представительство TERA-SAKI).
2. **Грачева, Е.И.** Расчет эквивалентного сопротивления радиальных схем при вычислении потерь электроэнергии / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2014. №9.
3. **Грачева, Е.И.** Определение сопротивления контактных соединений и температуры контактных площадок низковольтных аппаратов различными методами / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.Н. Хаерова // *Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации*. 2014. №3.
4. **Шевченко, В.В.** Определение сопротивления контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // *Промышленная энергетика*, 2002. №1. С. 42–43.
5. Разработка алгоритма оценки надежности низковольтных коммутационных аппаратов на основе статистических данных Надежность и безопасность энергетики. – М.: ООО «НПО Энергобезопасность». 2014. №1.
6. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий [и др.]; под ред. В.Н. Казанцева. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

СБОРНИК СТАТЕЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Редактор **Н.Н. Максимова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**
Компьютерный набор и вёрстка **Е.В. Бычков**

Подписано в печать 03.08.2015. Формат 60 x 84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,75.
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.