

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

Нижний Новгород 2018

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. № 1. – 131 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков канд. техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д. техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук, доцент

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

гл. редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук, доцент

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д. тех. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д. тех. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д. тех. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д. тех. наук, профессор
Анатолий Викторович Кузнецов	д. тех. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д. тех. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д. тех. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д. тех. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. тех. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д. тех. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д. тех. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д. тех. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д. тех. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д. тех. наук, профессор
Рустям Нилович Шакиров	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА	4
ХРОНИКИ	5
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	9
Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии	9
Смирнов А.Ю., Кудряшов Д.А. Расширение области применения электропривода регулирующих органов ядерных реакторов	28
Гольдштейн В.Г., Ведерников А.С., Борисова Ю.А. Конструкции и математические модели многоцепных воздушных линий интеллектуальных электрических сетей	36
Тутаев Г.М., Бобров М.А. Экстремальное управление электроприводом с машиной двойного питания по энергетическим критериям ...	49
Федотов А.И., Басыров Р.Ш., Вагапов Г.В., Абдуллин Л.И. Теоретические и практические аспекты мониторинга воздушных линий электропередачи 110 кВ	62
Карпов А.С., Ярошевич В.В. Верификация сертифицированных анализаторов качества электроэнергии при регистрации на действующей подстанции	73
Обалин М.Д., Колобанов П.А. Интеллектуальный алгоритм одностороннего определения места повреждения на линиях электропередачи	84
Кралин А.А., Гуляев В.В., Еременко В.В. Исследование несимметричных режимов работы трехфазных трансформаторов со схемой соединения Y/Y0	93
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	101
Плехов А.С., Титов Д.Ю., Шевырѐв Ю.В., Шевырѐва Н.Ю. Управление качеством электроэнергии слабых сетей посредством активного выпрямителя напряжения	101
Чивенков А.И., Крахмалин И.Г. Универсальный преобразователь как основа для согласования параметров источников распределенной сети с ВИЭ	112
Наши авторы	126

ОТ РЕДАКТОРА



Интеллектуальная электроэнергетика, цифровая электроэнергетика, цифровизация – ведущие тренды современного технoзнания. Открывая новый журнал, мы предоставляем еще одну творческую дискуссионную площадку для обсуждения развития цифровых технологий. В рамках публикуемых статей мы стараемся сформулировать конкретные задачи, наиболее актуальные для современного уровня технического развития и поделиться опытом, накопленным в интеллектуальной электроэнергетике.

Рассматривая различные постановления правительства, экспертно-аналитические доклады, концепции и прочие официальные документы, порой можно сделать вывод о том, что пути развития цифровой электроэнергетики опираются на воспроизведение опыта ведущих мировых компаний и производителей оборудования. Признавая правомерность такого подхода, следует, тем не менее, отметить множество «подводных камней»: кибербезопасность, санкции, закрытые коды программного обеспечения, разрозненность многих научных коллективов. Ряд решений принимается стереотипно, без серьезных инноваций и анализа перспектив дальнейшего развития. Данную ситуацию можно исправить, если глубоко сегментировать направления научных исследований, ориентируя их на достижение конкретных результатов с заданными показателями и параметрами, соответствующими лучшим мировым образцам. Необходима новая научная концепция перехода к цифровой, интеллектуальной электроэнергетике. Миссию ее разработки может на себя взять только большой коллектив квалифицированных специалистов в сфере проектирования и эксплуатации электротехнических комплексов и систем. Центром объединения такого коллектива и призван стать наш журнал.

ХРОНИКИ

ГЕННАДИЙ ЯКОВЛЕВИЧ ВАГИН (к 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

10 марта исполнилось 80 лет доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки РФ, члену Академии электротехнических наук РФ и Международной энергетической академии, профессору кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ Геннадию Яковлевичу Вагину.



Геннадий Яковлевич родился 10 марта 1938 года в г. Городце Горьковской области. В 1956 году, после окончания Дзержинского химико-механического техникума, он начал свою трудовую деятельность в должности энергетика на одном из предприятий Госматериальных резервов в г. Котельниче Кировской области. Потом была служба минным электриком на Тихоокеанском флоте. С 1959 по 1962 гг. Геннадий Яковлевич работал наладчиком электротехнологического оборудования на Заволжском моторном заводе.

С 1963 по 1966 гг. Г.Я. Вагин был руководителем группы проектировщиков в отделе электроснабжения Горьковского отделения института «Электропроект». В 1965 году он окончил Горьковский политехнический институт по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок», в 1966 году стал ассистентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ГПИ им. А.А. Жданова. В 1970 году Г.Я. Вагин защитил кандидатскую диссертацию на тему «Вопросы электроснабжения машин контактной сварки машиностроительной промышленности», в 1976 году был избран заведующим кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий и городов», которую возглавлял до 1994 года. В 1985 году Геннадий Яковлевич защитил докторскую диссертацию на тему «Оптимальное построение систем электроснабжения предприятий с электросварочными установками (теория, методы расчета и проектирования)» в Институте электродинамики АН УССР. В 1986 году ему было присвоено звание профессора по кафедре электроснабжения

промышленных предприятий и городов. С 1994 года по настоящее время является профессором кафедры.

Геннадий Яковлевич – ведущий специалист в области электроснабжения и электротехнических установок, электромагнитной совместимости и экономии энергоресурсов. Под его руководством была разработана и смонтирована первая в СССР установка продольной емкостной компенсации в электрических сварочных сетях на заводе «Красный якорь» в Нижнем Новгороде. Проведены исследования в области электромагнитных помех и электромагнитной совместимости электроприемников, разработаны два прибора для анализа электромагнитных помех – фликерметр и измеритель токов коротких замыканий. С 1986 по 1992 гг. Г.Я. Вагин входил в состав советской рабочей группы международной электротехнической комиссии и принимал активное участие в разработке международных и отечественных стандартов по электромагнитной совместимости в электроэнергетике.

Геннадий Яковлевич Вагин создал в Нижнем Новгороде научную школу по экономии энергоресурсов. В 1994 году по его инициативе была организована подготовка специалистов по экономии энергоресурсов на базе кафедры «Электроэнергетика и электроснабжение». Геннадий Яковлевич принимает активное участие в разработке научных программ федерального значения по экономии энергоресурсов.

Редакция журнала «Интеллектуальная электротехника» желает Геннадию Яковлевичу долгих лет жизни, крепкого здоровья и новых научных достижений.

ВАЛЕРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ГОЛЬДШТЕЙН (К 55-ЛЕТИЮ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ)

55 лет назад началась научно-педагогическая деятельность заслуженного работника высшего образования РФ, доктора технических наук, профессора, действительного члена Академии электротехнических наук РФ, профессора кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета Валерия Геннадьевича Гольдштейна.



Валерий Геннадьевич родился в 1941 году в г. Куйбышеве (Самаре). В 1958 году поступил в Куйбышевский индустриальный институт. В 1963 году окончил институт с отличием по специальности «Электрические станции, сети и системы» и был принят на работу на должность ассистента кафедры «Теоретические основы электротехники». В 1966 году Валерий Геннадьевич поступил в целевую аспирантуру по специальности «Электрофизика» на кафедру «Техника высоких напряжений» Ленинградского политехнического института, в 1970 защитил кандидатскую диссертацию.

После защиты диссертации Валерий Геннадьевич вернулся в Куйбышевский политехнический институт (переименован в 1961 г.) на кафедру «Электрические системы и сети» (с 1985 года «Автоматизированные электроэнергетические системы»), на которой с 1970 года по настоящее время работал ассистентом, старшим преподавателем, доцентом и профессором.

В 1975 году В.Г. Гольдштейн получил ученое звание доцента. По итогам научной деятельности защитил в 2002 году докторскую диссертацию на тему «Электромагнитная совместимость систем электроснабжения нефтяной промышленности при внешних и внутренних импульсных электромагнитных воздействиях», а в 2005 году ему было присвоено звание профессора.

Валерий Геннадьевич внес и продолжает вносить огромный вклад в отечественную и мировую науку, подготовку научных инженерных кадров, развитие электроэнергетики. Им проводится большая работа по связям с научной общественностью и распространению научно-технических знаний в области электротехники в нашей стране и за рубежом. Его дея-

тельность нашла непосредственное отражение в развитии сотрудничества с учеными электротехниками Болгарии, Венгрии, Словакии, Германии, Канады, Чехии, Финляндии, государств центральной Азии.

Валерий Геннадьевич является основателем школы в области электромагнитной совместимости электрооборудования электротехнических комплексов и систем, которая успешно работает в Самарском государственном техническом университете. Под его руководством были защищены 3 докторских, 12 кандидатских диссертации по техническим наукам, подготовлены ведущие специалисты в области электротехнических комплексов и систем в России и за рубежом.

Редакция журнала «Интеллектуальная электротехника» поздравляет Валерия Геннадьевича с юбилеем научно-педагогической деятельности, желает новых профессиональных успехов, реализации идей, здоровья и благополучия.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов

ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ НА ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

В статье раскрываются вопросы реализации плана мероприятий по переходу отечественной электроэнергетической отрасли на цифровые технологии. Представлена общая характеристика направлений перехода к цифровым технологиям. В каждом из направлений выделены проблемы и барьеры, препятствующие развитию и внедрению новых разработок. Обосновывается необходимость поиска компактных, экологических, энергоэффективных решений, соответствующих концепции современных городов. В качестве основы построения цифровой подстанции обозначена релейная защита как наиболее продвинутая в области цифровизации. Рассматривается актуальная задача разработки технических решений для контроллеров присоединения и контроллеров среднего уровня цифровой подстанции на отечественной элементной базе с применением МЭК 61850. Приведено краткое описание перспективных решений в области защиты и управления энергосистем, дана характеристика концепции интегрированной защиты и управления. Отмечена актуальность развития и внедрения в электроэнергетику облачных технологий. Отдельно рассмотрены гибкие системы передачи переменного тока, предназначенные для увеличения устойчивости и пропускной способности систем. В заключение приведено описание идеи твердотельного трансформатора, имеющего ряд преимуществ по сравнению с существующими силовыми трансформаторами.

Ключевые слова: гибкие системы передачи переменного тока, интеллектуальная электрическая сеть, облачные технологии, релейная защита, твердотельный трансформатор, универсальный преобразователь напряжения, цифровые технологии, цифровая подстанция.

1. Введение

В соответствии с представленной в 2011 году «Концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью» и дальнейшим ее развитием Правительством Российской Федерации, разработан план мероприятий по совершенствованию законодатель-

ства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной инициативы [1]. Выполнение данного плана предполагается поэтапно с 2018 по 2035 гг. и предусматривает развитие в сфере надежных и гибких распределительных сетей, развитие распределенной энергетики, создание новых технологий управления перетоками мощности. Ожидаемыми результатами перехода к цифровым технологиям являются: качественное улучшение услуг в сфере электроснабжения, появление и развитие активных энергетических комплексов (активных потребителей), широкое использование интеллектуальных устройств и систем. Вместе с тем можно говорить об отсутствии правового и технического регулирования, необходимого для внедрения новых устройств и технологий. Необходимо определение юридического статуса функционирования активных энергетических комплексов в составе Единой энергетической системы России, требуется совершенствование существующих или даже создание новых механизмов распределения системного экономического эффекта. Речь идет о пересмотре практики перекрестного субсидирования, определении и статусе технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем.

Создание активно-адаптивных энергетических комплексов потребует создание сетевого резерва, что приведет к снижению доходности сетевых организаций. Средняя загрузка магистрального сетевого комплекса составляет 26 %, а распределительного – 32 %, у генерирующих компаний среднегодовой коэффициент использования установленной мощности составляет около 50%. Особая роль отводится объединениям потребителей с управляемой нагрузкой, с распределенной генерацией и накопителями. Необходимо разрабатывать интеллектуальные мультиагентные системы управления, позволяющие в конечном итоге подойти к полноценным «умным сетям», открывающим возможности более эффективного управления имеющимися мощностями. Такой подход может привести не только к сокращению потребности в новых мощностях, но и к оптимизации сетевой инфраструктуры. Распределительные сети напряжением ниже 110 кВ с активными и пассивными потребителями, с объектами распределенной генерации должны стать активно-адаптивными комплексами – платформами с глобальной информационной средой, в которой интеллектуальные программно-аппаратные средства осуществляют энергообмен без участия человека. Не останутся без внимания и изолированные территории, развитие которых невозможно без гибридных источников и систем управления ими. Очевидно, что существующая система категорирования потребителей по надежности устарела, и требуются новые целевые показатели надежности.

Основные нормы, регулирующие правила использования информационной сети, требуют новых реестров, регламентов и технологий, не использовавшихся ранее в электроэнергетике. Субъекты распределенной энергетики четко не определены ни на оптовом, ни на розничном рынке. Существующее положение в ценообразовании, тарифообразовании и технологическом присоединении к сети общего пользования просто закрывают возможности для развития распределенной энергетики. Для широкого и быстрого внедрения технологий и технических решений потребуются широкий спектр унифицированных (стандартных) технических требований, которые должны стимулироваться как передовые научные исследования. Только в этом случае могут появиться значительные научные заделы, в том числе и глобальные.

Одним из ключевых является вопрос совершенствования систем контроля и учета потребления, алгоритмов управления данными и их восстановления. Результатом должны стать «умные контракты» с подтверждением достоверности данных по объему потребления. В таких условиях потребуются дополнительные определения правил работы субъектов электроэнергетики. Электроэнергетика может стать важным социальным и инвестиционным фактором в целом регионе. Например, в регион с достаточными трудовыми ресурсами, но дефицитной энергетикой трудно привлечь инвестиции для развития технологического производства. Инвесторы, как правило, реализуют вложения в своей собственной сфере технологий. В энергетику и в электроэнергетику направляют инвестиции либо сами энергетики, либо банки, либо государство. Так, бурное развитие электроэнергетики в 1950-1960-е гг. происходило за счет государственного инвестирования. Дефицит электроэнергетики приводит к сдерживанию инвестиций в регион, следствием этого является миграция квалифицированных кадров. Поэтому для формирования распределенной экономики в России необходима бездефицитная, распределенная и надежная электроэнергетика.

Современная электроэнергетика трансформируется, происходит миграция населения в города, что требует увеличения и концентрации мощностей с высокой надежностью. Стоимость земли в городах растет, что соизмеримо со стоимостью основного оборудования. Поэтому инженеры, разработчики и проектировщики ищут новые компактные экологические решения, вписывающиеся в жизнь современного города для удовлетворения постоянно растущего спроса и социальной стабильности. Цифровые сети с интеллектуальными системами управления становятся неотъемлемой частью энергетической системы. Появление стандарта МЭК 61850 сопровождалось преждевременными оценками окончательной готовности,

но на самом деле речь идет только о первой стадии управления технологическими и коммерческими процессами.

Международный стандарт МЭК 61850 применяется к системам автоматизации подстанции (SAS). В нем приведены технические определения и описания процессов конфигурации и параметризации функций, требуемых для организации обмена данными между микропроцессорными устройствами на подстанции, а также требования к взаимосвязанным системам. Таким образом, данный стандарт сам по себе не является протоколом, однако используется для настройки параметров конфигурации микропроцессорных устройств с целью обеспечения функциональной совместимости при обмене данными с использованием протокола. Частично стандарт МЭК 61850 базировался на концепции автоматизации подстанции *UCA2.0*, которая была разработана в США под эгидой Электроэнергетического научно-исследовательского института (EPRI). Работа над обоими стандартами была развернута в начале 1990-х гг. В 1997 году *IEEE/EPRI* и международная электротехническая комиссия (МЭК/IEC) пришли к решению объединить оба стандарта для создания глобальной и уникальной системы автоматизации подстанции. Часть 3 «Общие требования» стандарта МЭК 61850 была первой частью, опубликованной в январе 2002 года. После этого были выпущены остальные, посвященные, в частности, моделям данных и коммуникационным услугам, и в целом стандарт был подготовлен к использованию в 2004 году.

В результате процесс внедрения стандарта в промышленность занял около десяти лет, и приблизительно двадцать лет прошло с того момента, как рабочие группы впервые приступили к концептуальной проработке. Совершенно оправданно предполагается, что будет продолжаться дальнейшее развитие стандарта с выпуском новых частей и новых редакций выпущенных ранее версий. Тем не менее, это подтвержденная технология, по которой уже работают свыше 6000 объектов по всему миру, поддерживаемая приблизительно 300 сертифицированными серверными микропроцессорными электронными устройствами и 16 сертифицированными клиентскими системами и микропроцессорными электронными устройствами. Стандарт предусматривает интеграцию всех функций защиты, управления, измерения и мониторинга в системы подстанции (рис. 1). Для обеспечения свободного присвоения функций микропроцессорным электронным устройствам предусмотрена функциональная совместимость между теми операциями, которые подлежат выполнению на подстанции, однако эти функции реализованы в оборудовании (физических устройствах) различных производителей. Функции могут быть физически распределены между компонентами,

выполняемыми в различных микропроцессорных устройствах, которые обмениваются данными друг с другом (распределенная функция). Продолжает ухудшаться состояние российского энергетического машиностроения, электротехнической промышленности, инжиниринга и пр. Доля России на мировом рынке современного энергетического оборудования, в том числе, интеллектуальных устройств и систем управления, составляет уже менее 1%. Динамика годовых темпов роста сегмента энергетического оборудования, согласно прогнозам, должны превысить 10% в год. Наблюдается тенденция прихода на этот рынок сильных компаний в области информационно-коммуникационных технологий и систем управления.

Рассматривая постановление правительства [1], экспертно-аналитический доклад [2] и другие официальные документы, можно сделать вывод о том, что пути перехода к цифровой электроэнергетике основываются на копировании опыта ведущих мировых компаний и ведущих производителей оборудования. С таким подходом трудно не согласиться, но необходимо учитывать также многие «подводные камни»: кибербезопасность, санкции, закрытые коды программного обеспечения. Ряд научных коллективов сегодня работает разрозненно, в инициативном порядке: самостоятельно ставит и выполняет задачи, многие из которых решаются стереотипно, без серьезных технических и технологических инноваций. Данную ситуацию можно исправить, если глубоко сегментировать направления научных исследований и ориентировать их на достижение конкретных результатов с заданными показателями и параметрами, соответствующими лучшим мировым образцам. Необходима новая научная концепция перехода к цифровой электроэнергетике. Подобную миссию может на себя взять только большой научно-исследовательский коллектив квалифицированных электроэнергетиков в области проектирования и эксплуатации.

С чего начать на сегодняшнем уровне развития цифровых технологий в электроэнергетике?

Наиболее продвинутой в области цифровизации является релейная защита как основа построения цифровой подстанции.

Во-первых: стандарт МЭК 61850 привел в соответствие все новые устройства и их архитектуры.

Во-вторых: информация о текущих режимах, собираемая в этих устройствах – самая исчерпывающая, самая точная и при необходимости – самая тиражируемая для других устройств.

В-третьих: модульность функциональных устройств и программного обеспечения, открывает широкие возможности для совершенствования.

В-четвертых: высокая степень интеграции устройств позволяет расширять поле возможностей.

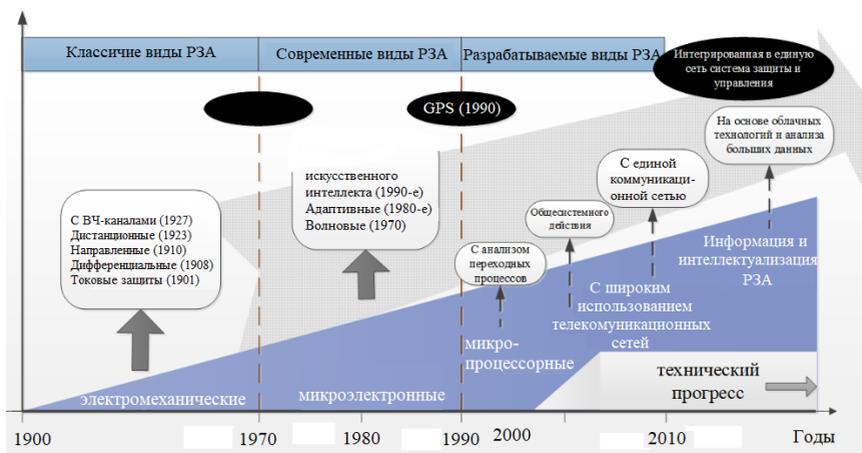


Рис. 1. Развитие технологий, применяемых при строительстве трансформаторных подстанций

II. Релейная защита и управление (Цифровая подстанция)

В соответствии с «Концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью», разработанной в 2011 году и концепцией «Цифровая подстанция», получившей в 2018 году статус национального проекта, требуется создание технологической, нормативной и производственной базы. Её целью является массовое внедрение в энергетическую отрасль инновационного высокоэффективного продукта – необслуживаемых модульных самодиагностируемых электрических подстанций и станций («цифровых подстанций»), в том числе, с применением централизованных, децентрализованных и гибридных принципов построения систем защиты и автоматики.

В основе проекта «Цифровая подстанция» (ЦПС) лежит управление и информационный обмен между элементами по открытому объектно-ориентированному стандарту МЭК 61850. Архитектура комплекса ЦПС подразумевает наличие устройств, реализующих функции измерения, аналого-цифрового преобразования и формирования потоков SV , обмен сообщениями по МЭК 61850 по шине процесса, учет электроэнергии, релейную защиту и автоматику (РЗА), сигнализацию, регистрацию, управление выключателями. К этим устройствам относятся устройства уровня присоединения (контроллеры присоединения). Функции централизованной РЗА и управления ЦПС, а также связь с контроллерами нижнего и верхнего уровней осуществляется устройствами (контроллерами) среднего уровня.

Российские производители устройств релейной защиты и автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) в настоящее время используют исключительно импортные компоненты, доля которых составляет не менее 56%. С учетом дальнейшего развития цифровых подстанций и интеллектуализации электрических сетей в России, разработка технических решений для контроллеров присоединения и контроллеров среднего уровня цифровой подстанции на отечественной элементной базе с применением МЭК 61850 является актуальной задачей, способствующей повышению информационной безопасности энергетических объектов и снижению затрат на последующее сопровождение программного обеспечения.

III. Перспективные решения в области защиты и управления энергосистем

Централизованная защита участка электрической сети

Стремительное развитие коммуникационных технологий позволяет реализовать ширококомасштабный обмен информацией. В связи с этим возникло понятие централизованной защиты участка электрической сети – ЦЗУ, *Wide area protection (WAP)*. Основой такой системы стал вариант защиты на переходных процессах, предложенный в 1996 году [3], в котором синхронизация во времени с помощью *GPS* сыграла главную роль [4]. Централизованная защита участка сети с применением новых алгоритмов реализуется на основе измерений от несколько информационных точек, способна обеспечить быстрое, надежное и точное обнаружение повреждений. ЦЗУ широко обсуждаемая тема исследований с большим числом опубликованных результатов в последние годы.

Интегрированная защита

С развитием цифровых технологий все больше и больше функций реализуется внутри одного терминала защиты (линий, трансформаторов, генераторов и т.д.) для достижения определенной степени интеграции. Например, цифровая релейная защита линий электропередачи (ЛЭП) может иметь дистанционную или дифференциальную токовую защиту в качестве основной, направленную или ступенчатую токовую защиту в качестве резервной. Последние разработки в микропроцессорных элементах и коммуникационных технологиях открыли новые возможности для релейной защиты [3]. В отличие от централизованной защиты участка сети (централизованной защиты цифровой подстанции), интегрированное решение не просто объединяет аппаратную и программную часть защитных реле, но и основывается на разработке новых алгоритмов с учетом множественных измерений (избыточности) и позволяет улучшить характеристики защиты [5].

Управление участками электрической сети

Внедрение цифровых синхронных измерений в различных точках электрической сети значительно расширит зону управления, осуществляемого на цифровых подстанциях. Такие измерения содержат информацию о комплексах токов и напряжений, синхронизированных с высокой точностью с помощью *GPS*. На их основе могут быть построены системы мониторинга электрической сети, а также различные программные приложения для повышения наблюдаемости и надежности, включающие в себя: усовершенствованную оценку состояния [6], динамические модели онлайн оценки режима [7], управление перегрузками, оценку стабильности [5], обнаружения и компенсации межсистемных колебаний [3]. Также проводились исследования в области интегрирования функций защиты и управления [4, 8].

IV. Концепция интегрированной защиты и управления

Исходя из рассмотренных множественных измерений, была предложена концепция интегрированной защиты и управления (ИЗУ). Концепция [4] состоит в интеграции функций защиты и управления, в частности на региональном уровне, направленных на предоставление ряда преимуществ для будущей системы. Она предполагает объединение возможностей трех иерархических уровней для предотвращения каскадного отключения электрической сети на большой территории.

Для реализации системы управления разработана специальная синхронизированная быстродействующая система коммуникаций. Ключевым элементом в системе интегрированной защиты и управления является информационная платформа, которая получает синхронизированные данные в реальном масштабе времени от сети связи. Информационная платформа также поддерживает приложения специально разработанной облачной вычислительной системы для реализации ряда дополнительных функций на уровне цифровых подстанций и сетей электроснабжения. Предлагаемая в [9] региональная система защиты и управления представлена на рис. 2. Быстрые и глубокие изменения в системах передачи и распределения электрической энергии, появление нового оборудования, например, управляемых линий электропередачи переменного тока, систем хранения электроэнергии, возобновляемых источников и др. привели к существенному изменению характеристик и усложнению алгоритмов управления системами электроснабжения. Следовательно, существующие системы защиты и управления не могут эффективно реализовать заданные им функции.

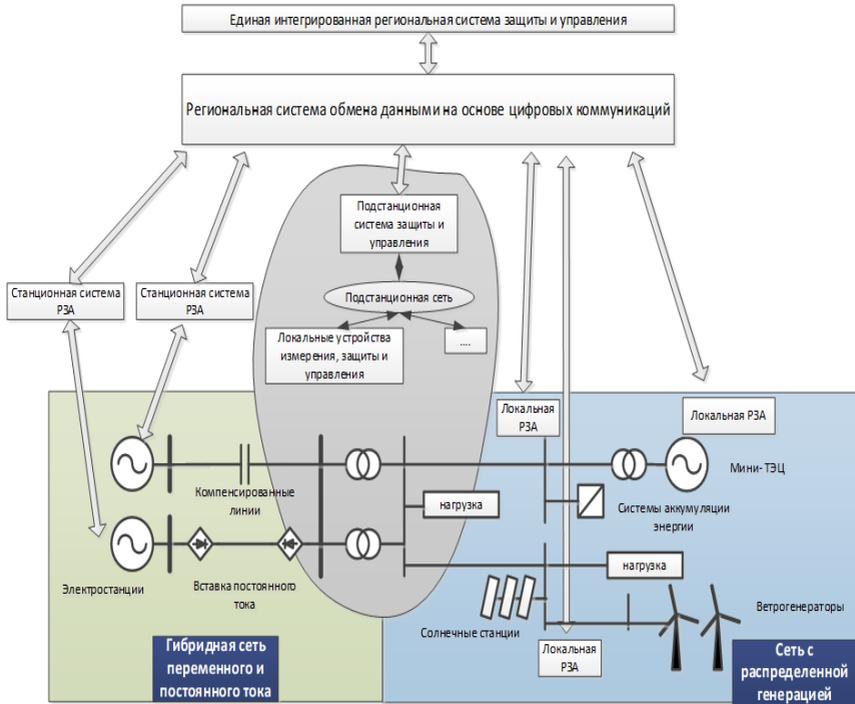


Рис. 2. Архитектура интегрированной системы защиты и управления

Как показано на рис. 2, система ИЗУ состоит из различного оборудования и разделена на группы. Основными частями системы являются высокоскоростная сеть коммуникаций, а также информационная система синхронизации в реальном масштабе времени. В перспективе функции ИЗУ расширяются для достижения интеграции диспетчерско-технологического управления с релейной защитой и SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) – системами на региональном уровне. На локальном уровне предполагается интеграция функций различных устройств. Это относится к следующему оборудованию цифровых подстанций: устройства сопряжения, интеллектуальные терминалы, устройства метрологических измерений, устройства синхронных векторных измерений (СВИ) и релейная защита присоединения. Оборудование отвечает за выборки токов, напряжений и других данных в режиме реального времени и отправку информации на уровень шины подстанции в систему защиты и управления ИЗУ. Такое оборудование позволит интегрировать цепи первичного силового оборудования и

добиться высокой интеграции на уровне присоединения. На уровне цифровой подстанции интегрируются функции защиты линий, шин, трансформаторов (автотрансформаторов), автоматики управления выключателем, реклоузеров, автоматических оперативных переключений, определения места повреждения, автоматики регулирования напряжения и других функций управления подстанции. Используется информация и специальное программное обеспечение для резервирования, автоматического управления доступом на подстанцию и др.

На верхнем уровне ИЗУ интеграция функций релейной защиты и управления приводит к повышению быстродействия защиты. Кроме того, интегрируются функции определения места повреждения, автоматики регулирования напряжения, контроля напряжения и частоты, обнаружения качаний в энергосистеме и др. В отличие от обычной защиты и управления, разделенных как при проектировании, так и эксплуатации, ИЗУ представляет собой оптимальную комбинированную систему, которая реализует функции на региональном уровне.

V. Применение облачных технологий

Основываясь на рассмотренной ранее информационной платформе, распределенная система с применением облачных технологий предназначена для реализации на региональном уровне таких функций цифровой подстанции, как определение места повреждения, определение поврежденного участка ЛЭП, контроль качества электрической энергии, согласование уставок защит и др. Расширенные функции также включают: контроль состояния первичного оборудования, управление техническим обслуживанием и ремонтом и другие эксплуатационные задачи (рис. 3).

В настоящее время множество вторичного оборудования различных производителей устанавливается на каждой подстанции. Применение облачных технологий значительно сократит инвестиции в оборудование общей телекоммуникационной системы. Облако на подстанционном уровне получает данные с уровня процесса, а региональное облако получает данные из информационной платформы.

На верхнем уровне реализуются статические и динамические измерения, оценка состояния выключателей, извлечение информации для специальных алгоритмов вычислительных средств и др. Применение облачных технологий позволяет уменьшить нагрузку на каналы связи, обеспечить компактность хранения данных, применить стандартное общедоступное программное обеспечение и получить другие преимущества.

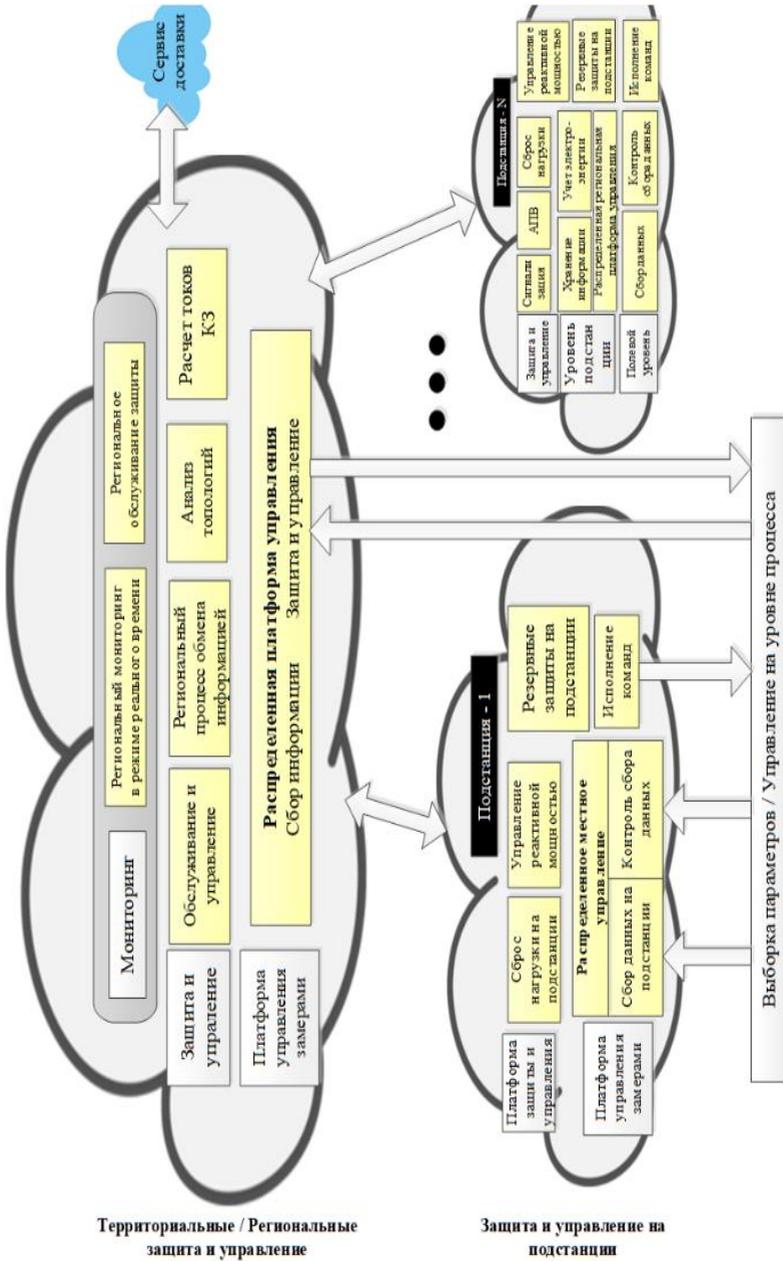


Рис. 3. Принципы применения облачных технологий

Создание базового комплекта программно-аппаратного комплекса цифровой подстанции (ПАК ЦПС) в составе устройств уровня присоединения и среднего уровня, аппаратная и программная части которого выполнены на отечественной базе и масштабируются под конкретный энергетический объект, объединяя в единую интегрированную архитектуру подстанции цифровые устройства автоматики, защиты и управления, учета и АСУ ТП, представлено на рис. 4.

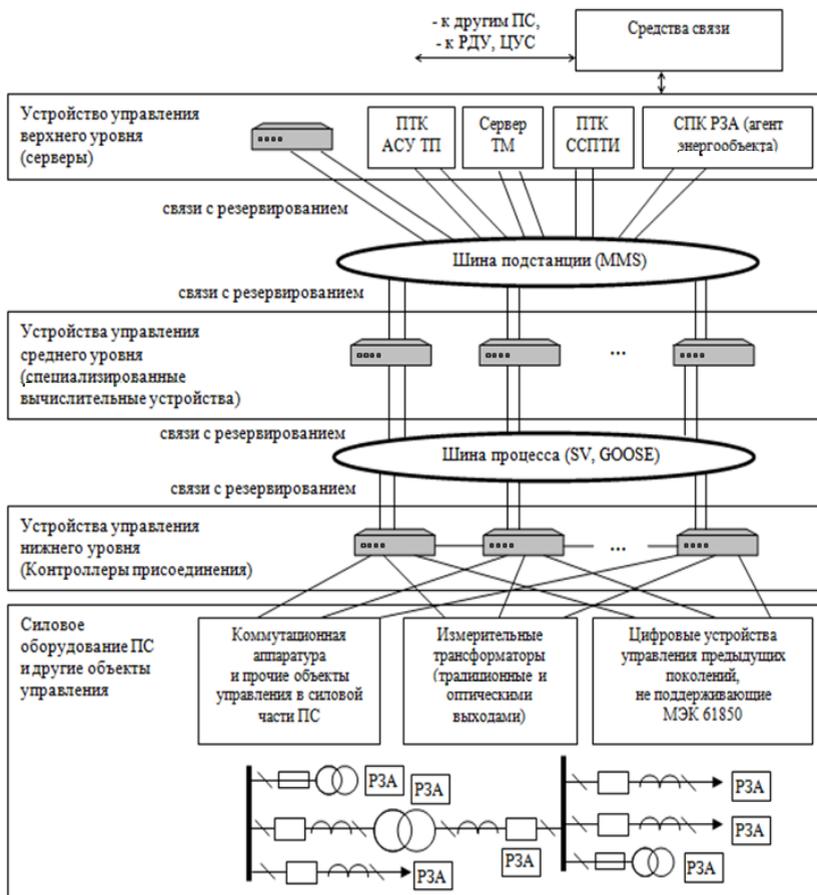


Рис. 4. Структура программно-технического комплекса цифровой подстанции с применением МЭК 61850

*Функционал устройств уровня присоединения
(контроллеров присоединения)*

1. Обеспечение анализа, диагностики, преобразования сигналов от оборудования цифровой подстанции (трансформаторы тока и напряжения, средства релейной защиты, измерительные приборы, приборы учета электрической энергии) для передачи в системы управления верхнего уровня и диспетчерские центры.

2. Интегрирование в одном устройстве функций измерения, защиты и управления уровня присоединения.

3. Подключение к шине процесса, согласно стандарту МЭК 61850.4. Использование отечественной элементной базы, в том числе в части центрального процессора (ЦП), и отечественного прикладного программного обеспечения, включая средства параметрирования.

5. Поддержка программного обеспечения контроллеров присоединения АСУ ТП цифровой подстанции стандарта МЭК 61850 (реализация полной поддержки протоколов *MMS, GOOSE, SV*).

6. Резервируемость, промышленного исполнения. Дублированные модули цифрового обмена (*Industrial Ethernet*) в соответствии с требованиями стандарта *ISO Ethernet IEEE 802/3*, с поддержкой *RSTP* и технологии резервирования *PRP*. Наличие двух источников питания.

Контроллеры присоединений должны иметь собственные средства диагностики с записью сигналов диагностики и событий во внутренний буфер событий и передачей их для обработки на верхний уровень АСУ ТП. Контроллеры должны иметь синхронизацию и выполнять передачу сигналов по цифровым каналам связи с использованием протоколов, обеспечивающих передачу данных с метками времени.

Модули аналоговых входов контроллера присоединения должны осуществлять измерения с присвоением метки времени, оценку достоверности и обработку аналоговых сигналов. В ходе первичной обработки информации они должны выполнять (в общем случае):

- масштабирование (вычисление реальных значений физических величин в именованных единицах с учётом коэффициентов трансформации трансформаторов тока и напряжения и т. д.);
- вычисление расчётных величин (линейные напряжения по фазным, $3U_0$ и $3I_0$, вычисление активной и реактивной мощности, $\cos\phi$ и т. д.).

Помимо самодиагностики микропроцессорных устройств, при первичной обработке информации в общем случае должна производиться проверка достоверности входных аналоговых сигналов. С этой целью могут использоваться различные алгоритмы проверки и обеспечения достоверности: проверка нахождения сигнала в допустимом диапазоне, общая проверка (по дублирующему сигналу, программная проверка математиче-

ски связанных параметров – при наличии такой возможности). Для исключения из обработки малозначительных изменений аналоговых сигналов необходимо осуществлять:

- контроль выхода параметра за заданные пределы (апертуру), устанавливаемые вокруг последнего зафиксированного значения сигнала;
- поочередную обработку значений сигналов, нарушивших апертуру.

Функционал устройств (контроллеров) среднего уровня

Для подстанций (ПС) 220-750 кВ с обслуживающим персоналом контроллер среднего уровня выполняет функции резервирования РЗА, противоаварийной автоматики (резервирование контроллеров присоединения), хранения (архивирование) данных по режиму работы и аварийных событий (осциллографирование). Для ПС 6-110 кВ без обслуживающего персонала с небольшим количеством присоединений контроллер среднего уровня выполняет функции передачи информации по телемеханике, по учету электрической энергии, реализовывает функцию дистанционного оперативного управления. Является масштабированным решением для удаленного автоматизированного рабочего места (АРМ). Концепция и принцип построения ПАК ЦПС таковы, что используют модульный принцип изготовления на микропроцессорной элементной базе.

Состав устройств нижнего и среднего уровней имеет стандартные заменяемые компоненты, выполненные с высокой заводской готовностью и изготовленные с соблюдением необходимых ГОСТов и нормативов. Модульная архитектура из стандартных сертифицированных промышленно производимых компонентов АСУ ТП дает независимость от элементной базы. Это позволяет минимизировать затраты на производство, исключив изготовление отдельных компонентов и организовав только сборочное производство. Таким образом, производство не потребует в большом количестве привлечения квалифицированной, дорогостоящей рабочей силы и энергозатрат. Функционал и алгоритмы устройств нижнего уровня и устройств среднего уровня реализуются программным способом в средствах вычислительной техники в соответствии с МЭК 61850.

VI. Гибкие системы передачи переменного тока

Гибкие системы передачи переменного тока (*Flexible AC Transmission Systems – FACTS*) включают элементы силовой электроники и предназначены для увеличения устойчивости и пропускной способности систем электропередачи [10]. Конструктивную основу *FACTS* составляют четыре типа контроллеров (регуляторов):

- последовательные контроллеры (регуляторы): осуществляют регулирование уровнями напряжения или реактивной мощностью ЛЭП; например, последовательный статический синхронный компенсатор;

- шунтирующие контроллеры (регуляторы): осуществляют регулирование в точке присоединения; например, статический синхронный компенсатор и статический регулируемый компенсатор;
- смешанные последовательно-параллельные контроллеры (регуляторы): используются в системах передачи с множеством ЛЭП, реализуют независимую компенсацию реактивной мощности для каждой линии, а также передачу активной между линиями; например, межлинейный регулятор потока мощности;
- смешанные последовательно-шунтирующие контроллеры (регуляторы): представляют собой комбинацию последовательных и шунтирующих регуляторов; например, унифицированный регулятор потока мощности.

С момента разработки устройств FACTS на протяжении более двух десятилетий проходила их успешная эксплуатация на нескольких подстанциях по всему миру. Несмотря на относительно высокую стоимость, такие устройства обеспечивают важные преимущества для энергосистем:

- регулирование потоков мощности для обеспечения оптимальной нагрузки энергосистем;
- увеличение нагрузочной способности ЛЭП вплоть до их тепловых пределов;
- увеличение системной устойчивости и надежности, ограничение токов короткого замыкания, управление каскадными отключениями и устранение низкочастотных колебаний в энергосистеме;
- увеличение пропускной способности ЛЭП с одновременным уменьшением реактивной мощности.

FACTS-технологии увеличивают передаваемую мощность и пропускную способность линий электропередачи за счет управления параметрами линий. Совершенствование силовой полупроводниковой базы и снижение стоимости *FACTS*-контроллеров открывает возможность широкомасштабного их применения. Предполагается, что эти технологии будут широко использоваться в будущем.

В НГТУ разработан экспериментальный образец универсального преобразователя напряжения для подключения разнородных источников электроэнергии (работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 гг.» по теме «Разработка технических решений для создания энергоэффективной системы электроснабжения автономного потребителя на основе комбинированного использования возобновляемых источников энергии и устройств оптимального управления» (ГК №14.516.11.0006 от 15.03.2013).

Универсальный преобразователь параметров напряжения (УПН) обеспечивает подключение к входным цепям как источников переменного, так и источников постоянного напряжения, формируя при этом на выходе трехфазное напряжение 380 В частотой 50 Гц, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 32144-2013.

В качестве основного базового элемента универсального преобразователя выбран модифицированный трехфазный инвертор напряжения, обеспечивающий работу в режимах активного выпрямителя и инвертора напряжения (AC/DC ; DC/AC). Общая структура преобразователя строится по принципу двойного преобразования с промежуточным звеном постоянного тока (емкостной накопитель). Схема модифицированного инвертора обеспечивает заряд емкостного накопителя в режимах активного выпрямителя переменного напряжения или конвертера постоянного напряжения в зависимости от типов основного и резервного источников энергии. Базовая схема инвертора работает в штатном режиме, обеспечивая гарантированное питание потребителей стабилизированным напряжением ($ACDC/DC/AC$).

VII. Твердотельный трансформатор

Твердотельный трансформатор (*Solid State Transformer – SST*) выполняет такую же функцию повышения или понижения уровней напряжения, как и обычный трансформатор с железным сердечником. Однако, новый образец имеет ряд преимуществ и устраняет некоторые проблемы существующих аналогов. Высокочастотный преобразователь и трансформатор (рис. 5) составляют сердце твердотельного трансформатора, который выполняется с применением материалов на основе карбида кремния (*Silicon Carbide – SiC*). Главные преимущества твердотельного трансформатора – меньшие размеры и вес.

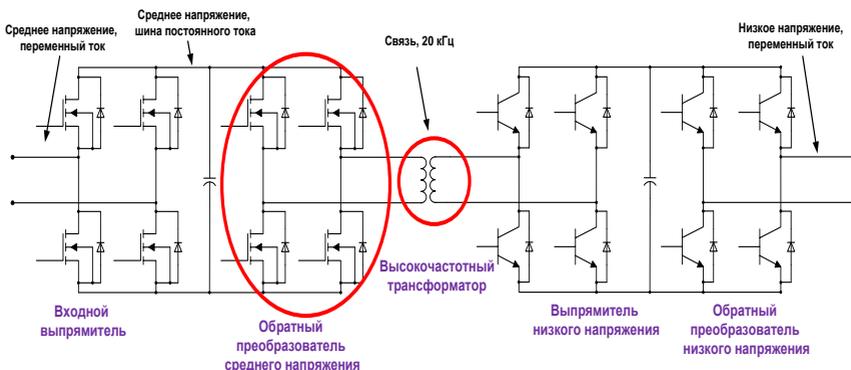


Рис. 5. Схемное решение модуля твердотельного трансформатора

На рис. 6 показаны схемы для обычного и твердотельного трансформаторов в приложении к ЦПС. Поскольку в твердотельном трансформаторе используются полупроводниковые ключевые элементы, при их закрывании переменный ток не будет протекать через высокочастотный трансформатор.

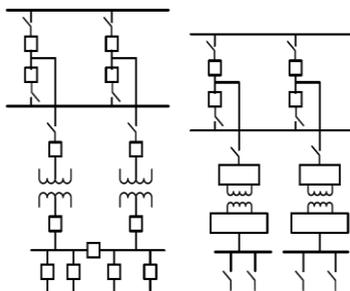


Рис. 6. Структурные схемы для обычного и твердотельного трансформаторов

Таким образом, высокочастотные преобразователь и трансформатор могут функционировать как автоматический выключатель. Площадь подстанции существенно уменьшается благодаря меньшему размеру твердотельного трансформатора (до 75%) и отсутствию автоматических выключателей. Важнейшим фактором, ограничивающим применение твердотельных трансформаторов, является высокая стоимость, в 20 раз превышающая обычный уровень.

© Лоскутов А.Б., 2018

Библиографический список

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2018 г. № 830-р, Москва. – 17 с.
- [2] Княгинина В.Н., Холкина Д.В. Цифровой переход в электроэнергетике России. Экспертно-аналитический доклад. М.: Центр стратегических разработок, 2017. – 47 с.
- [3] Bo Z.Q., Zhang B.H., Dong X.Z., Zhang B.H., He J.H. The development of protection intellection and smart relay network // Power System Protection and Control. 2013. № 41 (2). С. 1-12.
- [4] Guo Y., Wu W.C., Zhang B.M. A distributed state estimation method for power systems incorporated with linear and nonlinear models // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. № 64. С. 608-616.

- [5] Bo Z.Q., Wang L., Zhou F., Luo K., Han M., Yin W., Liu J.Y. Substation cloud computing for secondary auxiliary equipment // 2014 International Conference on Power System Technology. Октябрь 20-22, 2014, Чэнду, Китай.
- [6] Bo Z.Q., He J.H., Dong X.Z. Integrated protection of power network // Relay. 2005. № 33. С. 33-41.
- [7] Gao H.L., Liu Y.Q., Su J.J. New type of substation – area backup protection for intelligent substation // China Smart Grid Seminar, 2012.
- [8] Chen R.Z., Wu W.C., Sun H.B., Zhang B.M. A two-level online parameter identification approach // IEEE Power & Energy Society General Meeting. Июль 21-25, 2013, Ванкувер, Канада.
- [9] Bo Z.Q., Wang Q.P., Wang L., Zhou F.Q., Ge S.M., Zhang B.M. Architecture design for integrated wide area protection and control systems // 7th Asia – Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2015). Апрель 12-14, 2015, Пекин, Китай.
- [10] Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А., Кечкин А.Ю. Исследование статической устойчивости электротехнических комплексов виртуальных электростанций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. №2 (54). С. 121-129.

A.B. Loskutov

SOLVING PROBLEMS IN TRANSITION OF ELECTRICAL INDUSTRY TO DIGITAL TECHNOLOGIES

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

Abstract. The article is devoted to the implementation of the measures plan for the transition of the domestic electric power industry to digital technologies. General characteristic of the transition directions to digital technologies are given. In each of the directions identified problems and barriers that impede the development and implementation of new technologies. The need to search for compact, ecological, energy efficient solutions, corresponding to the concept of modern cities, was noted. As a basis for development a digital substation, relay protection is identified as the most advanced in the field of digitalization. The current task is the development of technical solutions for connection controllers and medium-level controllers of the digital substation on the domestic element base with the use of IEC 61850. A short description of the perspective solutions in the field of protection and control of power systems is given and the concept of integrated protection and control is given. The relevance of the development and implementation of cloud technologies in the power industry is noted. Flexible AC transmission systems, designed to increase the stability and throughput of systems, are considered. In conclusion, the description of the idea of a solid state transformer, which has advantages in comparison with existing power transformers, is given.

Keywords: cloud technologies, digital technologies, digital substation, flexible AC transmission systems, intelligent electric network, relay protection, solid state transformer, universal voltage converter.

References

- [1] Ordinance of the Russian Federation Government of 28 April 2018 no. 830–p, Moscow.
- [2] V.N. Knyaginina and D.V. Kholkina. Digital transition in the power industry of Russia. Center for Strategic Research, Moscow, Expert-analytical report, 2017.
- [3] Z.Q. Bo, B.H. Zhang, X.Z. Dong, B.H. Zhang and J.H. He. The development of protection intellectualization and smart relay network // *Power System Protection and Control*, no. 41 (2), pp. 1-12, 2013.
- [4] Y. Guo, W.C. Wu and B.M. Zhang. A distributed state estimation method for power systems incorporated with linear and nonlinear models // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 608-616, Jan. 2015.
- [5] Z.Q. Bo, L. Wang, F. Zhou, K. Luo, M. Han, W. Yin and J.Y. Liu. Substation cloud computing for secondary auxiliary equipment // In proc. 2014 International Conference on Power System Technology, Oct. 20-22, 2014, Chengdu, China.
- [6] Z.Q. Bo, J.H. He and X.Z. Dong. Integrated protection of power network. *Relay*, no. 33, pp. 33-41, 2005.
- [7] H.L. Gao, Y.Q. Liu and J.J. Su. New type of substation – area backup protection for intelligent substation. in proc. China Smart Grid Seminar, 2012.
- [8] R.Z. Chen, W.C. Wu, H.B. Sun and B.M. Zhang. A two-level online parameter identification approach // in proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada.
- [9] Z.Q. Bo, Q.P. Wang, L. Wang, F.Q. Zhou, S.M. Ge and B.M. Zhang. Architecture design for integrated wide area protection and control systems // in proc. 7th Asia – Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2015), Apr. 12-14, 2015, Beijing, China.
- [10] E. Sosnina, A. Shalukho, I. Lipuzhin and A. Kechkin. Static stability investigation of virtual power plants electrotechnical complexes // *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, vol. 2, pp. 121-129, 2017.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов, Д.А. Кудряшов

РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И.И. Африкантова

В статье рассмотрены технические решения, позволяющие обеспечить одновременную индикацию и силовое воздействие в синхронном приводе, предназначенном для перемещения регулирующих органов ядерного реактора. Привод включает в себя преобразователь частоты и шаговый двигатель, осуществляющий силовое воздействие на регулирующий орган и одновременное перемещение подвижного элемента устройства контроля движения. В качестве устройства контроля движения рассмотрены синхронные генераторы и датчики индуктивного типа, как наиболее надёжные и позволяющие работать в широком диапазоне температур. Проведен анализ датчиков насыщения и датчиков электродвижущей силы (ЭДС), последние из которых осуществляют силовое воздействие на подвижную часть привода с целью стабилизации скорости движения. Для определения положения ротора посредством датчика ЭДС использован компаратор, вырабатывающий импульсы напряжения на входе сумматора. Компаратор позволяет определить перемещение, пройденное от некоторого базового уровня путём подсчёта количества поступивших импульсов. Выполнено исследование работы устройства контроля движения в составе привода исследована на сеточной модели. Расчёты проведены для режима полного обесточивания. Установлено, что по окончании переходного процесса разгона ротора момент от веса подвижных масс уравновешивается электромагнитным моментом устройства контроля движения и нагрузка опускается равномерно. Это позволяет исключить воздействие избыточных ударных нагрузок в конце хода регулирующего органа.

Ключевые слова: генераторная характеристика, датчик положения, постоянный магнит, регулирующий орган, шаговый привод, электропривод.

1. Введение

Одним из требований, предъявляемых к электроприводам регулирующих органов судовых энергетических реакторов, является обеспечение абсолютной безопасности при эксплуатации. Для гарантии надежного и безотказного функционирования устройств регулирования мощности реактора важно решить задачу по обеспечению одновременной индикации и силовому воздействию на регулирующие органы ядерного реактора, а

также сохранить выполнение данных функций при полном исчезновении электропитания.

Исполнительный механизм (ИМ) системы управления и защиты (СУЗ) состоит из привода СУЗ, рабочего органа и соединительных элементов и предназначен для изменения реактивности ядерного реактора. Синхронный привод с частотным управлением включает в себя формирователь импульсов и шаговый двигатель (ШД). Ротор ШД вращает входной вал преобразователя движения, который перемещает регулирующий орган (РО). Одновременно с преобразователем движения ШД перемещает подвижный элемент устройства контроля движения (УКД) [1].

II. Постановка задачи исследования

Одной из важных функций УКД является контроль скорости опускания при обесточивании привода. Это реализуется при помощи электромагнитного тормоза, совмещенного с ШД в одной машине [2, 3], или отдельного устройства, установленного с двигателем на общем валу [4]. Необходимость устройства контроля скорости опускания обусловлена неравномерностью изменения реактивности при перемещении РО вглубь ядерного реактора. По мере погружения в активную зону эффективность РО возрастает, и его дальнейший разгон целесообразно ограничить, вплоть до перехода к равномерному движению в конце хода [5]. Таким образом, ускорение, a , следовательно, и закон изменения электромагнитного момента, развиваемого устройством контроля скорости опускания РО, должен соответствовать зависимости эффективности регулирующего стержня от глубины погружения в активную зону (рис. 1, а).

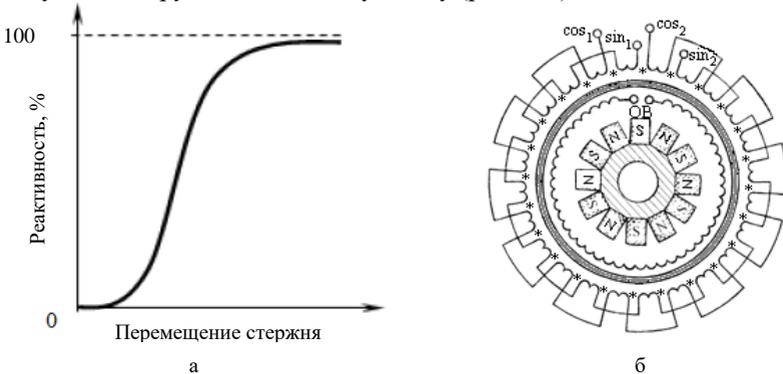


Рис. 1. Зависимость изменения реактивности при движении РО (а); конструкция датчика насыщения (б)

Такой закон обеспечивается переводом шагового двигателя или отдельного УКД в генераторный режим, с торможением на емкостную

нагрузку. Как в разомкнутом, так и в замкнутом электроприводе необходим контроль за фактическим перемещением подвижной части ИМ в заданное положение, поскольку в замкнутом приводе возможно перерегулирование, а в разомкнутом – неполное перемещение из-за пропуска шагов под влиянием случайных бросков нагрузки.

III. Материалы и методы

Конструкции применяемых датчиков могут быть различными и должны выбираться, исходя из заданного типа и компоновки реакторной установки. Наибольшее распространение получили датчики индуктивного типа как наиболее надежные, долговечные и приспособленные к работе в широком диапазоне температур и частот [5, 6]. Удачным решением в электроприводе с передачей движения через большие воздушные промежутки между статором и ротором является использование индуктивных датчиков с постоянными магнитами. В зависимости от использования эффекта от воз действия поля постоянных магнитов различают датчики насыщения и датчики ЭДС (тахогенераторы) [7, 8].

На кольцеобразный сердечник датчика насыщения (рис. 1, б) намотаны катушки обмотки возбуждения и нескольких, по числу фаз двигателя, сигнальных обмоток. Поворот магнита вместе с ротором на одно полюсное деление изменяет состояние насыщающихся структур сердечника и обеспечивает смену максимума и минимума напряжения, наведенного в фазах синусной и косинусной обмоток.

Датчик ЭДС представляет собой магнитоэлектрический генератор, снабженный компаратором [7]. Напряжение с генератора подается на гасящий резистор $R1$, поступает на прямой вход операционного усилителя $DA1$. На этом входе с помощью диодов $VD1$ и $VD2$ в зависимости от угла поворота ротора формируется последовательность положительных и отрицательных полуволн напряжения относительно инверсного входа операционного усилителя $DA1$ (рис. 2, а). Компаратор преобразует входные напряжения $DA1$ в последовательность знакопеременных импульсов. По количеству импульсов определяются текущий угол поворота ротора генератора и величина перемещения подвижной части исполнительного механизма.

IV. Математическая модель

В ходе работы было установлено, что количество импульсов, подаваемых на вход компаратора, не зависит от того, подключена ли к его фазам другая электрическая нагрузка или нет. Следовательно, одну или несколько фаз датчика ЭДС можно замкнуть на внешнюю цепь для создания тормозного электромагнитного момента. Это позволит изменить частоту баланса между вращающим моментом и уравнивающим его результирующим моментом нагрузки:

$$M_{\text{дв}} = - \left[\sum M_{\text{нагр}} + M_{\text{ген}}(\omega) \right], \quad (1)$$

где $M_{\text{дв}}$ – вращающий момент электродвигателя; $\sum M_{\text{нагр}}$ – суммарный момент нагрузки; $M_{\text{ген}}(\omega)$ – электромагнитный момент датчика.

При емкостной нагрузке стабилизация частоты вращения имеет место на восходящих ветвях характеристик (рис 2, б). Из пяти приведенных генераторных характеристик на данном рисунке, первая соответствует наибольшему емкостному сопротивлению.

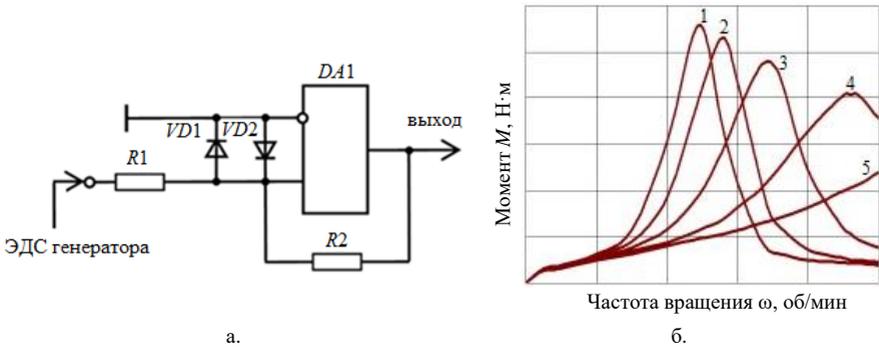


Рис. 2. Схема компаратора для определения положения ротора и подвижной части исполнительного механизма (а); генераторные характеристики при различной емкостной нагрузке (б)

Увеличивая емкость, можно сдвигать положение максимума момента по генераторной характеристике вниз от исходного. Вследствие увеличения добротности резонансных контуров с увеличением емкости конденсаторов, имеет место рост максимума момента. Таким образом, датчик-генератор способен выполнять не только функцию индикации положения, но и стабилизировать скорость движения заданной величиной, т.е. является устройством контроля движения, обеспечивающим силовое воздействие на подвижную часть ИМ.

В соответствии со схемой замещения, состоящей из последовательно соединенных индуктивного сопротивления фазы, ее активного сопротивления и сопротивления нагрузки, которую для поддержания тока делают емкостной, можно выразить ток фазы, представленный амплитудой:

$$I = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (X_1 - X_c)^2}}. \quad (2)$$

Рассчитанный ток подставляется в уравнение электромагнитного момента:

$$M = \frac{m \cdot R \cdot I^2}{\omega}, \quad (3)$$

где m – число фаз обмотки генератора; ω – частота вращения ротора.

Частота максимума момента по генераторной характеристике определяется частотой резонанса напряжений:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\delta} \cdot C}}, \quad (4)$$

где L – индуктивность рассеяния фазы обмотки; ω – частота вращения ротора; C – емкость подключенного к обмотке конденсатора.

V. Результаты исследования

Испытания устройства в составе шагового привода (рис. 3) проводились на цифровой модели путем численного интегрирования уравнения движения (1). Вращающий электромагнитный момент двигателя на каждом шаге интегрирования определялся по его сеточной модели [9, 10].

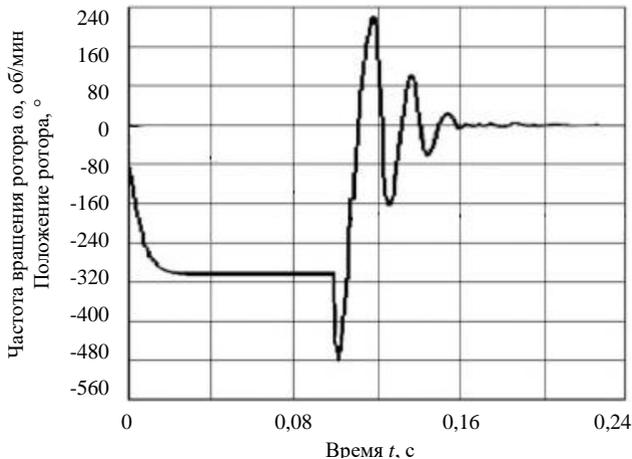


Рис. 3. Оциллограммы движения обесточенного привода

При обесточенном двигателе ($0 < t < 0,1$ с) ротор первоначально разгоняется под действием потенциальной нагрузки, перемещаемой посредством привода. По истечении около 0,03 с. момент от веса подвижных

масс уравнивается электромагнитным моментом устройства контроля движения, и нагрузка опускается равномерно.

VI. Заключение

Датчики ЭДС, представляющие собой магнитоэлектрический генератор, способны выполнять как функцию индикации положения регулирующих органов ядерного реактора, так и стабилизации скорости движения заданной величиной.

Данный электропривод можно использовать для сохранения способности выполнения наиболее важных функций при полном исчезновении питания на транспорте и в системах автоматики с жесткими требованиями к функции самохода.

© Смирнов А.Ю., 2018

© Кудряшов Д.А., 2018

Библиографический список

- [1] Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс). – М.: Форум, 2015. – 192 с.
- [2] Смирнов А.Ю., Кудряшов Д.А. Совершенствование электромеханических устройств управления скоростью перемещения регулирующего органа исполнительных механизмов системы управления и защиты ядерных реакторов // Известия вузов. Электромеханика. 2016. №5 (547). С. 25-30.
- [3] Смирнов А.Ю. Совершенствование индукторной машины для исполнительных механизмов вертикального перемещения // Электротехника. 2003. №10. С.10-15.
- [4] Бамдас А.М., Леонтьев А.И., Титов Е.Г., Юрченко А.И. Исполнительные электродвигатели и элементы автоматики сервоприводов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1971. – 237 с.
- [5] Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Масленок В.А. Основы проектирования механизмов управления ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978. – 272 с.
- [6] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [7] Смирнов А.Ю., Шаров А.В. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2017. – 193 с.
- [8] Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины. М.: Высшая школа, 1985. – 231с.
- [9] Smirnov A.Yu. Grid models intended for investigating electric drives based on induction motors // Russian Electrical Engineering. 2009. № 2. P. 86-90.
- [10] Смирнов А.Ю. Электромеханика. Основы теории и вычислительный анализ электрических машин. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. – 290 с.

A.Yu. Smirnov, D.A. Kudryashov

**EXPANSION OF APPLICATION FIELD OF ELECTRIC
DRIVE OF NUCLEAR REACTORS
REGULATORY BODIES**

Afrikantov Experimental Design Bureau
for Mechanical Engineering

Abstract. The article considers technical solutions that allow simultaneous indication and force influence in a synchronous drive designed to move the regulatory bodies of a nuclear reactor. The drive includes a frequency converter and a stepper motor that acts on the regulating body and simultaneously moves the movable element of the motion control device. Synchronous generators and inductive-type sensors are considered as a motion control device, as the most reliable and allow working in a wide range of temperatures. The saturation sensors and electromagnetic fields (EMF) sensors are analyzed, the latter of which allow for the power action on the moving part of the drive in order to stabilize the speed of movement. A comparator is used to determine the position of the rotor using an EMF sensor that generates voltage pulses at the input of the adder. Comparator allows determining the movement traveled from a certain base level by counting the number of pulses received. The work of the motion control device in the drive structure was investigated on a grid model. Calculations were carried out for the mode of full blackout. It is shown that, at the end of the transient process of accelerating the rotor, the moment from the weight of the mobile masses is balanced by the electromagnetic moment of the motion control device, and the load is lowered uniformly. This makes it possible to exclude the effect of excessive shock loads at the end of the movement of the regulatory bodies.

Keywords: electric drive, generator characteristics, permanent magnet, position sensor, regulatory body, step drive.

References

- [1] A.Yu. Smirnov, Inductor machines. Design and computational analysis (special course). Moscow: Forum, 2015.
- [2] A.Yu. Smirnov and D.A. Kudryashov. Enhancement of electromechanical devices of the rate control of the lowering adjusting gear of the actuators of the system control and protection of nuclear reactors // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*. no. 5 (547), pp. 25-30, 2016.
- [3] A.Yu. Smirnov. Perfection of an inductor machine for vertical movement actuators // *Electrotechnika*, no. 10, pp. 10-15, 2003.
- [4] A.M. Bamdas, A.I. Leontiev, E.G. Titov and A.I. Yurchenko, Executive electric motors and automation elements of servo drives of nuclear reactors. Moscow: Atomizdat, 1971.

-
- [5] I.Ya. Emelyanov, V.V. Voskoboynikov and V.A. Butter. Fundamentals of designing control mechanisms for nuclear reactors. Moscow: Atomizdat, 1978.
 - [6] A.V. Ivanov-Smolensky. Electric machines: a textbook for high schools. Moscow: Energia, 1980.
 - [7] A.Yu. Smirnov and A.V. Sharov. Electric drive with contactless synchronous motors. N. Novgorod: NNSTU, 2017.
 - [8] E.V. Armensky and G.B. Falk. Electric micro machines. Moscow: Higher School, 1985.
 - [9] A.Yu. Smirnov. Grid models intended for investigating electric drives based on induction motors // Russian Electrical Engineering. vol. 80, no. 2, pp. 86-90, 2009.
 - [10] A.Yu. Smirnov. Electromechanics. Fundamentals of the theory and computational analysis of electrical machines. N. Novgorod: NNSTU, 2014.

УДК 621.315.1

В.Г. Гольдштейн, А.С. Ведерников, Ю.А. Борисова

КОНСТРУКЦИИ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МНОГОЦЕПНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Самарский государственный технический университет

Территориальные ограничения в развивающихся электротехнических системах определяют экономическую целесообразность использования комбинированных многоцепных воздушных линий (КМВЛ), сочетающих два или более номинальных напряжения. Важной особенностью КМВЛ является высокая интенсивность электромагнитного взаимодействия между многочисленными проводами в их составе, что делает актуальными вопросы учета в них электрических и магнитных взаимных связей. Существующие средства методического и программного обеспечения не решают в полной мере данные вопросы. Статья посвящена построению математических моделей КМВЛ для анализа в многопроводной постановке стационарных установившихся режимов. Предложено теоретическое решение поставленной задачи с использованием положения теоретической электротехники в части определения симметрий и несимметрий для реальных процессов и современных электроустановок в составе электротехнических систем, теории четырехполюсников с обобщением на многопроводные несимметричные КМВЛ, гиперматричных математических моделей, адаптированных для применения метода фазных координат. Разработаны математические модели обобщенных четырехполюсников в A , B и Y -формах, которые позволяют определить в фазных координатах параметры установившегося режима для КМВЛ любой конструкции.

Ключевые слова: воздушные ЛЭП, гиперматричные уравнения, несимметрия, обобщенный четырёхполюсник, поперечные проводимости, продольные сопротивления, стационарный установившийся режим, фазные координаты, четырёхполюсники.

1. Введение

Важнейшее направление развития современной энергетики – создание интеллектуальных энергосистем (ИЭС) – реализуется с положительной перспективной тенденцией размещения мощных электрических станций по экологическим требованиям за пределами массового поселения людей и доставкой электрической и тепловой энергии потребителям с помощью инновационных средств ее передачи. При этом характерно соединение и географическое сближение электропередачи больших (на уровне ГВт) электрических мощностей и их распределения, то есть системных и распределительных электрических сетей. Эффективным способом решения этой задачи являются многоцепные многопроводные воздушные ли-

нии (ММВЛ). Широко применяется их наиболее простая реализация: двухцепные воздушные линии (ДВЛ), составляющие до 25-30 % всех воздушных линий [1-3].

В условиях жестких территориальных ограничений на развитие электрических сетей (ЭС) экономически целесообразно применение комбинированных линий (КМВЛ), в которых на одних опорах размещаются две и более трёхфазные воздушные линии (ВЛ) разного номинального напряжения (рис. 1).

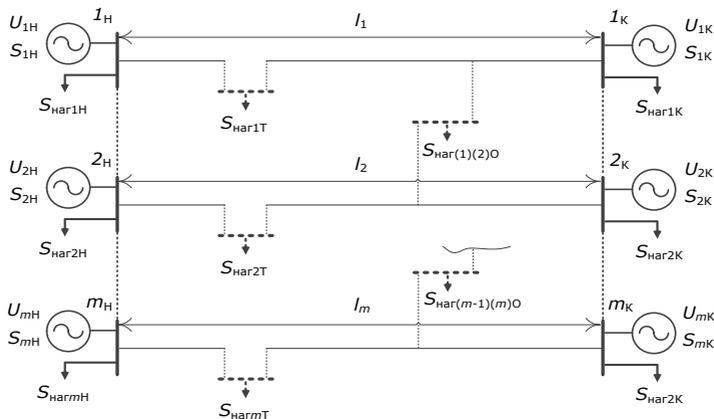


Рис. 1. Обобщённая схема m -цепной КМВЛ (номинальные напряжения $U_{1ном} \neq U_{2ном} \neq U_{mном}$, длины участков $l_1 = l_2 = l_m$).

Это является развитием схем глубокого ввода, сокращает расходы на сооружение понизительных подстанций, позволяет значительно уменьшить площади, отчуждаемые под трассы (ВЛ) и территории подстанций, снизить уровни напряжённостей электромагнитного поля вблизи ВЛ, что особенно актуально для густонаселённых районов мегаполисов.

Компактность КМВЛ определяет высокую интенсивность электромагнитных взаимодействий между их отдельными элементами. В процедурах анализа стационарных электрических режимов для их учета формируется адекватная математическая модель (ММ) в виде полной пассивной диссипативной схемы замещения. Ее элементы в естественном виде – это многочисленные собственные и взаимные сопротивления и проводимости между всеми фазными проводниками всех цепей и грозозащитных тросов (ГЗТ) [3]. Применение интеллектуальных систем управления режимами КМВЛ делает очевидной необходимость усовершенствования математического аппарата с использованием гиперматричных выражений для ком-

плексной модели КМВЛ. Многокомпонентность КМВЛ определяется не только ее многопроводностью, но и совокупностью ряда участков (рис. 1) между ответвлениями на конкретные подстанции.

Не умаляя общности теории анализа режимов КМВЛ, будем далее рассматривать в качестве расчетной модели один ее однородный участок, поскольку полная модель формируется из последовательного соединения всех участков.

II. Методы расчета режимов многопроводных электрических цепей

Рассмотрим подходы к анализу режимов электрических сетей с КМВЛ. В настоящее время существенно меняются исходные представления, связанные с необходимостью уточнения ММ их режимов и элементов. Это в значительной мере связано с необходимостью учета несимметрии реальных объектов и процессов в ЭС из-за беспрецедентного повышения требований к адекватности соответствующих ММ, как основы современных систем управления в ЭС.

Авторами уже было отмечено, что при моделировании режимов КМВЛ чаще всего рассматривается как композиция независимых симметричных трехфазных (трехпроводных) цепей [1]. Это допущение существенно расходится с физикой электромагнитных процессов в взаимосвязанном комплексе КМВЛ. Такое упрощенное представление в настоящее время противоречит требованиям к решениям важных проблем проектирования и эксплуатации КМВЛ. Поэтому отказ от использования допущений о независимости и симметрии, которые более или менее обоснованы в трехпроводной постановке, представляет собой актуальное направление повышения достоверности анализа режимов и состояний многокомпонентных элементов ЭС.

Несимметрии в ЭС [4, 5] делятся на следующие классификационные группы: глобальные (в целом по сети) и локальные (по участкам и элементам); конструктивные (по параметрам сети) и режимные (по параметрам режимов); стационарные и переходные; одно, двух, трех и многофазные; связанные и не связанные с землей; с обрывами фаз; однократные и многократные; комбинированные (обрывы и КЗ) и др.

В ЭС в целом и для КМВЛ, в частности, несимметрия различается по исходным причинам [6-8]. Во-первых, это режимная фазная несимметрия. Причины ее таковы: фазные параметры режимов (мощности, токи и напряжения в элементах ЭС и потребителей) различны по величине, а сдвиги последних по фазе в трехфазных системах конкретных цепей КМВЛ не равны стандартному значению 120° . Во-вторых, это параметрическая пассивная несимметрия. Она возникает, поскольку фазные и междофазные продольные и поперечные активные и реактивные сопротивления и проводимости элементов ЭС в той или иной мере отличаются друг

от друга. В-третьих, это нарушения нормальной работы ЭС: фазные, междофазные КЗ и обрывы (в частности, для воздушных линий электропередачи (ЛЭП)) одного или двух фазных проводов, как для одноцепных, двухцепных, так и для многоцепных ЛЭП.

Применительно к многофазным цепям можно назвать два наиболее распространенных в настоящее время подхода к анализу УР КМВЛ: это метод фазных координат (МФК) [4-6] и метод симметричных составляющих (МСС) [9, 10]. МСС предложен и развит в прошлом веке Ч. Фортестью [9], Ч. Вагнером, Р. Эвансом [10] и другими исследователями. Несмотря на то, что МСС традиционно используется для математического моделирования названных выше несимметрий, для реальных конструкций, например, ВЛ с 1 или 2 ГЗТ, двухцепных и тем более для КМВЛ, симметричные модели являются грубым допущением. Тем не менее, в многочисленных практических расчетах как статических УР, так и токов КЗ по-прежнему используется МСС. При этом часто необоснованно остается без внимания вывод указанных выше авторов: МСС исходно предложен для анализа несимметричных трехфазных параметров режимов при допущении о симметрии схем замещения отдельных последовательностей. Это и позволяет представлять их однопроводными схемами замещения для упрощения процедур расчета иногда даже без использования матричного анализа и в отсутствие соответствующего программного обеспечения и вычислительных средств.

При этом невелики объем вычислений и состав информации, поскольку расчет в схеме каждой последовательности производится на одну фазу. Но, как отмечено выше, погрешности и ошибки из-за названных допущений иногда в принципе не предсказуемы, что превращает анализ процессов в угадывание результата. Неизбежные при этом погрешности результатов, параметров режима, ранее считались допустимыми в инженерных задачах, если их величины не превышали в среднем 5 %. В настоящее время это совершенно не отвечает реальным техническим требованиям. В самом деле, при определении абсолютных значений параметров режимов (токов, напряжений, мощностей, энергии и др.) эти погрешности действительно в ряде случаев незначительно влияют на принятие некоторых технических решений. Но часто нужно находить их разности, в частности, потери мощности и энергии, падения напряжения и др., особенно когда уменьшаемое и вычитаемое имеют близкие значения, что в ЭС наблюдается в большом числе случаев. Поэтому погрешности в разностных результатах достигают 100 % и более.

Показательным примером несимметрии может служить разница в 16 % в продольных погонных реактивных взаимных сопротивлениях для ВЛ-500 кВ с горизонтальной подвеской фаз, приведенная в работе [11,

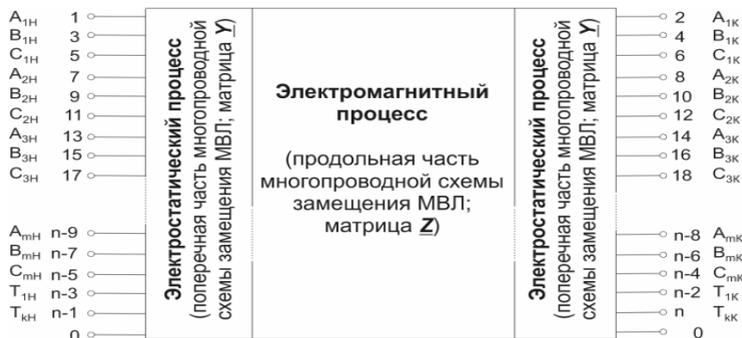
§1.1, рис. 1.3, табл. на стр. 17]. Это один из многочисленных примеров несимметрии, который подтверждает важнейшее положение: для большого числа современных несимметричных задач применение МСС методически не оправдано. Еще одним принципиальным ограничением применения МСС при определении потерь мощности и энергии при пофазной несимметричной нагрузке является то, что суммирование потерь в симметричных составляющих недопустимо из-за квадратичной зависимости величины потерь от тока. Помимо этого, для расчета режимов КМВЛ МСС неприменим без дополнительных допущений, поскольку, строго говоря, в трехфазной постановке определить их сопротивления в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей можно только приближенно. Для расчета процессов в этом случае нельзя использовать независимые трехфазные системы координат. С этой точки зрения применение МФК в многопроводной постановке для расчетов несимметричных установившихся и переходных режимов ЭС с КМВЛ является объективно необходимым.

III. Схема замещения МВЛ в виде обобщенного четырехполюсника

При анализе локальных несимметрий обратим внимание, что с удалением (электрическим и геометрическим) от точки несимметрии, интенсивность отличий фазных параметров, то есть собственно несимметрии, уменьшается [8]. Учитывая это, а также то, что КМВЛ представляет собой уникальный элемент в ЭС, для упрощения построения методики анализа стационарных режимов далее ограничим расчетный комплекс собственно КМВЛ, к узлам которой присоединены обобщенные модели примыкающих частей ЭС (рис. 1).

Применение МФК непосредственно связано с учетом взаимных индуктивных и емкостных влияний разных фаз и цепей, а также ГЗТ КМВЛ. С этой целью используется представление процессов ММВЛ в виде обобщенного четырехполюсника (ОЧП) П-образной структуры. В нем электромагнитные квазистационарные физические процессы в ЛЭП в соответствии с известными принципами построения схем замещения ЛЭП [12] разделены (рис. 2) на продольные (в виде активно-индуктивных сопротивлений) и поперечные (в виде емкостных проводимостей) составляющие.

Поперечная часть разделяется пополам и в эквивалентной схеме замещения (ЭСЗ) соответствующие емкости (фазные на землю, междуфазные и междуцепные) задаются половинными значениями по концам КМВЛ. Многопроводная ЭСЗ (рис. 3) формируется в виде, общепринятом в расчетах стационарных режимов для несимметричной КМВЛ с числом цепей $m \geq 2$, количеством проводов $n = m \cdot 3 + k$, где k – число заземленных и незаземленных грозозащитных тросов.

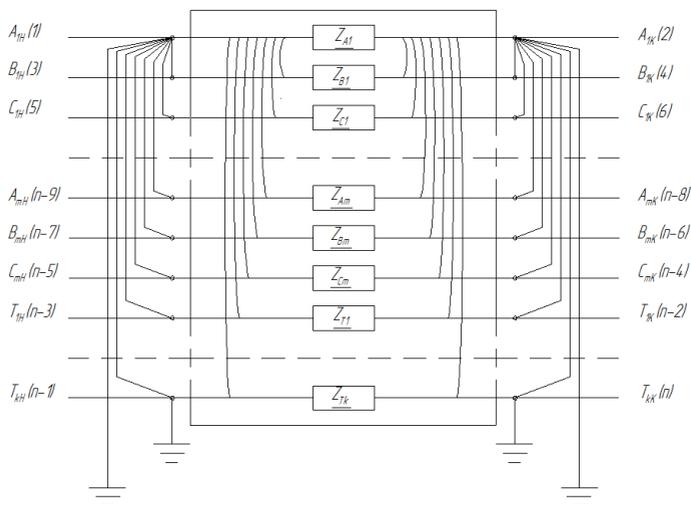
Рис. 2. ОЧП с n – полюсами для m – цепной ММВЛ с k ГЗТ

Все связи ЭСЗ изобразить невозможно [8, с. 674], поэтому на рис. 3 для КМВЛ с одним ГЗТ представлены фрагменты ЭСЗ, отражающие только связи фазы $A1$ (рис. 3, а) и троса T (рис. 3, б). Взаимные индуктивности, распределенные по длине, показаны условно (как это принято для емкостей) в начале и конце каждой фазы и ГЗТ [9].

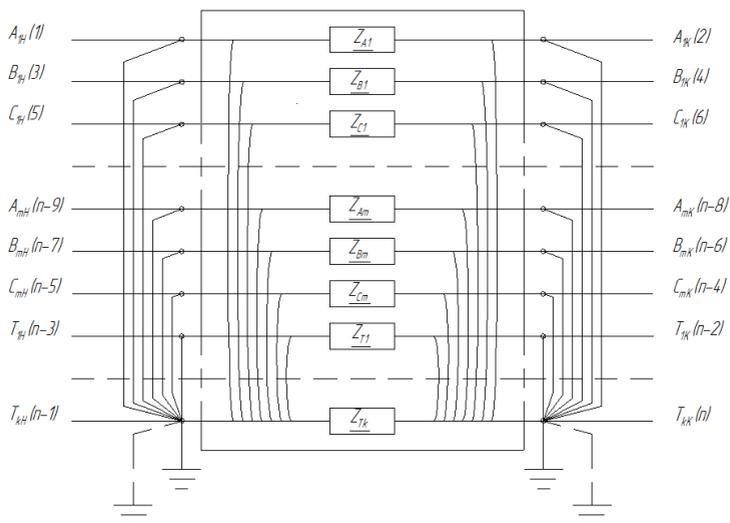
Квадратные, полностью заполненные матрицы собственных и взаимных продольных сопротивлений $Z_{ПС}$ и поперечных проводимостей $Y_{ПП} / 2$ (рис. 3, а и б), которые являются ММ для ЭСЗ КМВЛ, имеют размерность, равную общему числу проводов и тросов КМВЛ – n .

По электромагнитным характеристикам, расположению, геометрическим размерам проводников и среды, длине КМВЛ l в соответствие с теоретическими положениями и справочными данными, где приведены погонные (на 1 км) параметры проводов КМВЛ [12, 13]. В том числе активные r_0 , индуктивные x_{L0} , взаимоиндуктивные x_{M0} сопротивления, реактивные (емкостные) b_{C0} проводимости (без учета короны) и поправочные коэффициенты k_r, k_x, k_{C0} [2].

Для КМВЛ в представленном виде (рис. 2) можно сформировать математические гиперматричные ОЧП модели УР для Π -образных эквивалентных схем в A, B и Y -формах (1-3), связывающих напряжения и токи в начале H и конце K КМВЛ [12].



а.



б.

Рис. 3. Фрагмент эквивалентной схемы в Π -форме m -цепной КМВЛ с одним ГЗТ, состоящая из комплексных сопротивлений с условно изображенными взаимными индуктивными и емкостными связями начал и концов: фазы А и троса Т в двух вариантах: заземленного (а) и изолированного (емкостная связь на землю показана пунктиром) (б)

Значения $z = r + j \cdot x$, $j \cdot x_M$ и $y = -j \cdot b$ элементов матриц $Z_{ПС}$ и $Y_{ПП}$ определяются в виде [8], [11-13]:

$$\begin{aligned} r &= r_0 \cdot l \cdot k_r + j \cdot x_0 \cdot l \cdot k_x; \\ j \cdot x_M &= j \cdot x_{M0} \cdot l \cdot k_x; \\ j \cdot b &= j \cdot b_{C0} \cdot l \cdot k_{C0}. \end{aligned}$$

Все вектора и квадратные матрицы имеют размерность, равную n . Здесь и далее в названных моделях используются упрощенные обозначения для гиперматричных и векторных комплексных параметров собственно ОЧП и его режима в виде:

$$\begin{aligned} 1) \text{ форма } A & \quad A \cdot U_K + B \cdot I_K = U_H; \\ & \quad C \cdot U_K + D \cdot I_K = I_H. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 2) \text{ форма } B & \quad 3 \cdot D \cdot U_H + B \cdot I_H = U_K; \\ & \quad C \cdot U_H + A \cdot I_H = I_K. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 3) \text{ форма } Y & \quad Y_{HH} \cdot U_H + Y_{HK} \cdot U_K = I_H; \\ & \quad Y_{KH} \cdot U_H + Y_{KK} \cdot U_K = I_K. \end{aligned} \quad (3)$$

где U_H , I_H , U_K , I_K – вектора значений напряжений и токов фазных проводов и ГЗТ в режиме ОЧП, которые в зависимости от условий задачи анализа режима КМВЛ делают каждое выражение (1-3) или системой линейных алгебраических уравнений, например, для A -формы при известных U_H , I_H и неизвестных U_K , I_K , или суммой произведений $A \cdot U_K + B \cdot I_K$ – при известных U_K , I_K и неизвестных U_H , I_H . Очевидна аналогия для форм B , Y и перекрестных парных сочетаний 4 названных векторов.

При использовании моделей (1-3) важным моментом является определение матричных коэффициентов – констант ОЧП. Эта позиция построения моделей в A , B и Y -формах решена в теоретической электротехнике для однопроводных моделей [12]. Для моделей, с помощью которых описываются процессы в многопроводных КМВЛ, можно использовать их матричные аналоги.

Так, например, для обобщенной П-образной схемы (рис. 1), используя квадратные матрицы комплексных продольных сопротивлений $Z_{ПС}$ (рис. 2) и половин поперечных проводимостей $Y_{ПП}/2$ (рис. 3), включенных в H начале и K конце КМВЛ [12], можно записать с соблюдением корректного порядка матричных умножений:

$$\begin{aligned} U_H &= U_K + Z_{ПС} \cdot (Y_{ПП}/2 \cdot U_K + I_K) = (E + Z_{ПС} \cdot Y_{ПП}/2) \cdot U_K + Z_{ПС} \cdot I_K = \\ &= \underline{A \cdot U_K + B \cdot I_K}; \\ I_H &= Y_{ПП}/2 \cdot [Z_{ПС} \cdot (Y_{ПП}/2 \cdot U_K + I_K) + U_K] + I_K + Y_{ПП}/2 \cdot U_K = \\ &= Y_{ПП} \cdot (E + Z_{ПС} \cdot Y_{ПП}/4) + (E + Z_{ПС} \cdot Y_{ПП}/2) \cdot I_K = \underline{C \cdot U_K + D \cdot I_K}, \end{aligned}$$

где E – матричная единица, а параметры ОЧП для A и B – форм ОЧП, выражаются матрично через $Z_{\text{ПС}}$ и $Y_{\text{ПП}}$. Теперь:

$$\begin{aligned} A &= D = (E + Z_{\text{ПС}} \cdot Y_{\text{ПП}} / 2); \\ B &= Z_{\text{ПС}}; \\ C &= Y_{\text{ПП}} \cdot (E + Z_{\text{ПС}} \cdot Y_{\text{ПП}} / 4), \end{aligned}$$

для форм B и Y , а коэффициенты – константы ОЧП $Y_{\text{НН}}$, $Y_{\text{НК}}$, $Y_{\text{КН}}$, $Y_{\text{КК}}$ можно выразить через A , B , C , D по известным формулам для четырехполюсников [12]:

$$\begin{aligned} Y_{\text{НН}} &= B^{-1} \cdot D; \\ Y_{\text{НК}} &= -B^{-1}; \\ Y_{\text{КН}} &= Y_{\text{НК}}; \\ Y_{\text{КК}} &= B^{-1} \cdot A. \end{aligned}$$

Полученное решение позволяет эффективно моделировать большой круг практических задач, связанных с анализом УР для такого перспективного современного объекта, как КМВЛ. Обратим внимание на то, что формальная неуниверсальность полученного решения из-за принятого выше допущения о построении ММ только для собственно КМВЛ, с практической точки зрения не является очень жестким ограничением. Как уже говорилось выше, КМВЛ является уникальным элементом в ЭС, что позволяет не рассматривать ее взаимодействие с аналогичными многоцепными объектами.

Эквивалентирование, необходимое для определения граничных значений напряжений и токов, при реализации ММ (1–3), может быть адекватно выполнено с помощью программного обеспечения, работающего в рамках расчета режимов при однопроводном задании ЭСЗ [8, 11-13].

IV. Заключение

Произведен анализ существующих подходов к решению задач УР в несимметричных объектах и процессах ЭС. В результате анализа обоснована несостоятельность допущений о симметрии в решении поставленной задачи. Предложена методика решения задач УР в ЭС, содержащих КМВЛ, с помощью теории ОЧП и МФК.

Результаты работы можно сформулировать как ряд ключевых выводов.

1. КМВЛ являются специфическим объектом ЭС, для которого в значительной мере актуальны вопросы учета электрических и магнитных взаимных связей между основными элементами

- (многочисленными проводами и ГЗТ) и реальной внутренней несимметрии.
2. Существующие средства методического и программного обеспечения не решают эти вопросы в полной мере.
 3. Предложено теоретическое решение поставленной задачи и пути его реализации.
 4. Для КМВЛ получены ММ в A , B и Y -формах ОЧП, которые позволяют определить в фазных координатах параметры УР для КМВЛ любой конструкции.
 5. Эквивалентирование, необходимое при определении граничных значений напряжений и токов при реализации ММ ОЧП собственно КМВЛ, может быть адекватно выполнено с помощью однопроводного программного обеспечения.

© Гольдштейн В.Г., 2018

© Ведерников А.С., 2018

© Борисова Ю.А., 2018

Библиографический список

- [1] Shishkov E., Vedernikov A., Goldstein V., Podshivalova N. A calculation of steady – state condition of compact – combined power transmission line using phase coordinate method // in Proc. XIII Int. Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems – ELMA 2011, October 2011, Varna, Bulgaria. – P. 215-221.
- [2] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
- [3] Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х. Повышение надежности и энергоэффективности двухцепных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2010. – 272 с.
- [4] Шишков Е.М. Анализ установившихся режимов многоцепных воздушных линий электропередачи на основе метода фазных координат: автореф. дис. канд. техн. наук, ТПУ, Томск, 2013. – 24 с.
- [5] Якимчук Н.Н. Применение метода фазных координат для анализа несимметричных режимов электроэнергетических систем: автореф. дис. канд. техн. наук, ВятГТУ, Киров, 2000.
- [6] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: изд-во Иркут. ун-та, 2005. – 273 с.
- [7] Шишков Е.М., Ведерников А.С., Гольдштейн В.Г. Влияние несимметрии параметров двухцепной воздушной линии электропередачи на установившиеся режимы // Электричество. 2013. № 4, 2013. С. 9-18.
- [8] Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.; Л.: Энергия, 1964. – 704 с.
- [9] Fortescue C.L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. AIEE Transactions, vol. 37, part. II, 1918. – P. 1027-1140.

- [10] Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих. Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 410 с.
- [11] Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Лаптев О.И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы. Новосибирск: НГТУ, 2008. – 343 с.
- [12] Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники, 4-е изд, Том 2. СПб.: Питер, 2004. – 576 с.
- [13] Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей, 4-е изд. М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

V.G. Goldstein, A.S. Vedernikov, J.A. Borisova

CONSTRUCTION AND MATHEMATICAL MODELS OF MULTI-CHAIN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

Samara State Technical University

Abstract. Territorial restrictions in developing electrical systems determine the economic feasibility of using combined multi-chain overhead power transmission lines (QMOPTL), combining two or more rated voltages. An important feature of the QMOPTL is the high intensity of the electromagnetic interaction between the numerous wires in their composition, which makes it urgent to take into account the electrical and magnetic mutual relations in the QMOPTL. These issues are not solved with the help of existing methodical and software tools in full. The article is devoted to the development of QMOPTL mathematical models for analysis of stationary steady-state modes in a multi-wire formulation. The theoretical solution of the problem is proposed with the use of the position of theoretical electrical engineering in the definition of symmetries and asymmetries for real processes and modern electrical installations in the structure of electrical systems, the theory of four – terminal network with generalization to multi-wire asymmetric QMOPTL, hypermatrix mathematical models adapted for applying the phase coordinate method. Mathematical models of four-terminal networks in *A*, *B*, and *Y* forms have been developed that allow one to determine the steady-state parameters in phase coordinates for QMOPTL of any design.

Keywords: equivalent four-terminal network, four-terminal network, hypermatrix equations, longitudinal resistances, overhead power transmission lines, phase coordinate method, steady-state mode, transverse conductances, voltage unbalance.

References

- [1] E. Shishkov, A. Vedernikov, V. Goldstein and N. Podshivalova. A calculation of the steady – state condition of the compact – coupled power transmission line using the phase – coordinate method // in proc. XIII Int. Conf. on Electrical Machines, Drives and Power Systems - ELMA 2011, October 2011, Varna, Bulgaria, pp. 215-221.

-
- [2] V.I. Idelchik. Electrical systems and networks. Moscow: Energoatomizdat, 1989.
 - [3] A.S. Vedernikov, V.G. Goldstein and F.Kh. Khalilov. Increase of reliability and energy efficiency of two-conductor power transmission lines. Moscow: Energoatomizdat, 2010.
 - [4] E.M. Shishkov. Analysis of steady-state regimes of multi-chain overhead power transmission lines based on the method of phase coordinates // Cand. of Tech. S. thesis, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 2013.
 - [5] N.N. Yakimchuk. Application of the method of phase coordinates for the analysis of asymmetric modes of electric power systems // Cand. of Tech. S. thesis, VyatSTU, Kirov, Russia, 2000.
 - [6] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov. Complexly asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Irkut. university, 2005.
 - [7] E.M. Shishkov, A.S. Vedernikov and V. G. Goldstein. Influence of asymmetry of parameters of a two-chain overhead transmission line on the established modes. *Electrichestvo*, vol. 14, pp. 9-18, 2013.
 - [8] S.A. Ulyanov. Electromagnetic transients in electrical systems. Moscow, Leningrad: Energia, 1964.
 - [9] C.L. Fortescue. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of poly-phase networks. *AIEE Transactions*, vol. 37, part II, pp.1027-1140, 1918.
 - [10] C.F. Wagner and R.D. Evans. Symmetrical Components. New York: McGraw-Hill, 1933.
 - [11] K.P. Kadomskaya, Yu.A. Lavrov and O.I. Laptev. High-voltage electrical equipment of the new generation. Basic characteristics and electromagnetic processes. Novosibirsk: NSTU, 2008.
 - [12] K.S. Demirchya, L.R. Neiman, N.V. Korovkin and V.L. Chechurin. Theoretical Foundations of Electrical Engineering, ed. 4, T. 2. St. Petersburg: Piter, 2006.
 - [13] D.L. Faybisovich. Handbook on the design of electrical networks, ed. 4. Moscow: ENAS, 2012.

УДК 621.313.333.1

Г.М. Тутаев, М.А. Бобров

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Для электротехнических комплексов с электроприводами крайне важными являются вопросы повышения их эффективности. Статья посвящена задаче экстремального управления электроприводами переменного тока, в частности, задаче экстремального по энергетическим критериям управления электроприводом на базе асинхронизированного вентильного двигателя (АВД). Энергетическими критериями являются минимум потребляемых обмотками токов или минимум суммарных потерь, что обеспечивает повышение КПД двигателя и ограничивает его нагрев. При задании условий технологического процесса компоненты вектора состояний представлены требуемым электромагнитным моментом и заданной угловой скоростью ротора. Варьируемыми величинами, образующими вектор управления, являются фаза вектора статорного тока, основной магнитный поток и частота возбуждения. Показано, что для решения экстремальных задач управления электроприводами с АВД возможно использование классического метода Эйлера. Рассмотренные постановки задач поиска экстремальных управлений машиной двойного питания по энергетическим критериям связаны с необходимостью изменения магнитного состояния двигателя, что неприемлемо для динамичных приводов. Поэтому в таких случаях целесообразно применение алгоритмов управления с постоянным магнитным потоком во избежание значительных форсировок выходного напряжения преобразователя частоты. С другой стороны, для обеспечения минимума суммарных потерь при низких нагрузках необходимо значительно уменьшать магнитный поток. Однако возникает опасность полного размагничивания двигателя. В связи с этим целесообразным является ограничение нижней границы магнитного потока до величины 10-20 % от номинального значения. При этом установлено, что зависимость магнитного потока от тока намагничивания носит нелинейный характер и при решении экстремальных задач возникает необходимость аппроксимации кривой намагничивания функцией, позволяющей однозначно поставить в зависимость току намагничивания значение магнитного потока.

Ключевые слова: асинхронизированный вентильный двигатель, вектор состояний, вектор управлений, критерий оптимальности, математическая модель, функция качества, экстремальное управление.

1. Введение

В теории целенаправленного функционирования систем существует понятие энергоэффективности [1], которое можно распространить на си-

стемы автоматизированного электропривода или, как более частный случай, на базовые электрические машины. В этом случае под энергетической эффективностью какого-либо закона управления следует понимать уровень соответствия фактического расходования энергоресурсов их рациональному расходованию при выполнении двигателем технологической задачи в составе электропривода (ЭП) [2].

Известно, что оптимизация режимов работы асинхронного двигателя по энергетическим критериям приводит к необходимости изменения магнитного состояния электрической машины в функции электромагнитного момента. При классическом частотном регулировании это обеспечивает электроприводам чрезвычайно низкие динамические характеристики. В связи с этим весьма актуальна задача синтеза алгоритмов управления, позволяющих в условиях ограничения ресурсов преобразователей частоты совместить статическую оптимизацию с приемлемым для общепромышленных ЭП быстродействием [3].

На практике решение задачи энергоэффективного управления обеспечивается реализацией заранее определенных оптимальных значений управляемых координат двигателя на базе текущей идентификации его переменных параметров [4].

II. Материалы и методы

Функционирование ЭП происходит в условиях выполнения им какой-либо технологической задачи и требует регулирования скорости при изменяющемся сопротивлении нагрузки на валу. Тогда каждому моменту времени будет соответствовать некоторое состояние производственного механизма с заданными значениями скорости ω_c и момента сопротивления m_c , которые образуют вектор состояния $\dot{X}_c = (m_c, \omega_c)$. Координаты этого вектора изменяют свои значения при выполнении механизмом технологической задачи. Так как кинематические цепи любого агрегата имеют ограниченную мощность, то, очевидно, существует некая область допустимых состояний Q_{Xc} по вектору состояний \dot{X}_c . В этой области существуют подмножества моментов сопротивлений Q_{mc} и угловых скоростей $Q_{\omega c}$, верхние и нижние границы которых представляют собой предельно допустимые значения координат вектора \dot{X}_c .

Работа механизма в заданной области допустимых состояний Q_{Xc} обеспечивается ЭП, состоящим из базового двигателя и управляемого преобразователя частоты (ПЧ).

Функциональную связь между входными воздействиями и управляемыми переменными в модели двигателя можно отразить соотношением $\dot{Y} = F(U, m_c, C)$, где $\dot{Y} = (y_1, \dots, y_k)$ – вектор состояния выходов модели. Его компонентами могут быть, например, электромагнитный момент m , токи фаз, угловая скорость ротора ω_r ; F – оператор преобразования модели; $\dot{U} =$

(u_1, \dots, u_n) – вектор состояния управляемых входов, например, напряжения U_s, U_r , скольжение, частота ω_s ; m_c – внешнее возмущение в виде момента сопротивления механизма; $\dot{C} = (c_1, \dots, c_m)$ – вектор параметров модели (активные сопротивления обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность L_m , индуктивности рассеяния фаз).

В первом приближении можно считать, что вектор состояния управляемых входов модели двигателя $\dot{U} = (u_1, \dots, u_n)$ формируется ПЧ. Тогда, ограничив значения координат этого вектора областью допустимых управлений Q_U , мы учтем ограничение силового преобразователя по выходному напряжению.

Сформулируем условия выполнения электроприводом технологической задачи. Из компонент вектора состояний \dot{Y} сформируем вектор $\dot{X} = (m, \omega)$. Поскольку двигатель обладает ограниченной мощностью, то для него существует область допустимых состояний Q_X .

Тогда для всех значений $\dot{X}_c \in Q_{Xc}$ необходимым и достаточным условием выполнения задачи будет:

$$\begin{cases} Q_X \supseteq Q_{Xc}; \\ \dot{X} = \dot{X}_c. \end{cases} \quad (1)$$

Дополнительным условием решения технологической задачи с помощью ЭП является принадлежность компоненты управления, формируемой ПЧ, к допустимой области управлений – $\dot{U} \in Q_U$.

Для установившегося режима работы привода векторы управления \dot{U} и состояния \dot{X} двигателя связаны соотношением:

$$f = (\dot{U}, \dot{X}) = 0, \quad (2)$$

где f – скалярная функция [5].

Анализ последнего соотношения говорит о том, что для каждого управления \dot{U} из допустимой области Q_U существует множество $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ значений вектора состояний двигателя \dot{X} , удовлетворяющих этому соотношению. Но и для каждого состояния $\dot{X} \in Q_X$ существует множество управлений $\{U_1, U_2, \dots, U_k\}$, которые также удовлетворяют этому соотношению. Таким образом, технологическая задача $\dot{X} = \dot{X}_c$ имеет множество решений при варьировании управлений \dot{U} .

Каждое такое решение, т.е. управление $\dot{U} \in Q_U$, обеспечивающее $\dot{X} = \dot{X}_c$, можно оценить некоторой совокупностью показателей качества $\{w_1, w_2, \dots, w_k\}$, которыми могут выступать КПД, потери в элементах привода,

потребляемые обмотками токи и т.д. Показатели качества w_i будут функциями координат векторов управления \dot{U} и состояний двигателя \dot{X} :

$$w_i = w_i(\dot{U}, \dot{X}), \quad i = \overline{1, k}. \quad (3)$$

Векторы \dot{U} и \dot{X} связаны соотношением $f = (\dot{U}, \dot{X}) = 0$. Показатели качества w_i можно считать компонентами вектора функции качества $\dot{W}(\dot{U}, \dot{X}) = (w_1, w_2, \dots, w_k)$, из числа которых можно выделить какую-то одну оценку в качестве основной. Причем на значения компонент вектора \dot{W} могут быть наложены ограничения типа $\min(\max)$.

Тогда обобщенная задача экстремального управления электроприводом, обеспечивающая наиболее полное использование энергетических ресурсов ПЧ формулируется следующим образом [5, с. 127]:

«Пусть силовая часть электропривода описывается соотношением $f = (\dot{U}, \dot{X}) = 0$ и по эффективности своего функционирования характеризуется некоторым числом k оценок качества $w_i = w_i(\dot{U}, \dot{X}), \quad i = \overline{1, k}$, среди которых имеется основная, минимизируемая или максимизируемая оценка. Требуется найти оптимальное управление $U_i^o(\dot{X})$, которое при ограничении одной или нескольких оценок качества обеспечивает в двигательном режиме верхнюю грань механической мощности $P_{\text{мех}} = m \cdot \omega$, а при снятии ограничений доставляет нижнюю (верхнюю) грань основной оценки качества»:

$$\begin{aligned} U_i^o(y) &= \arg \sup_U P_{\text{мех}}(U, y), U \in Q_U; \\ U_i^o(y) &= \arg \inf(\sup) w_i(U, y), U \in Q_U, \dot{X} = \dot{X}_c \in Q_{\dot{X}_c}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $y = X_c$ – одна из заданных составляющих вектора состояния – либо скорость, либо момент. В первом случае задача управления – получение максимального момента при заданной скорости, во втором – максимальной скорости при заданном моменте.

Поскольку в общем случае функция качества $\dot{W}(\dot{U}, \dot{X}) = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ и ограничения являются нелинейными, то при изменении угловой скорости и нагрузки привода в широком диапазоне решение этой задачи необходимо искать численными методами. Их выбор определяется свойствами функций качества и признаками задачи экстремального управления, такими как число минимаксных функций качества, размерность вектора управлений \dot{U} , принадлежность наилучшего управления $U_i^o(\dot{X})$ к допустимой области управлений Q_U .

III. Асинхронизированный вентильный двигатель

Асинхронизированный вентильный двигатель (АВД) представляет собой вариант двигателя двойного питания (ДДП) со статическими преобразователями частоты в статоре и роторе (рис. 1) [6].

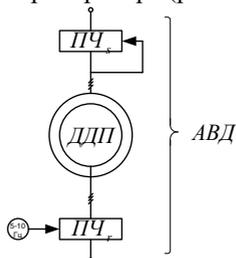


Рис. 1. Структурная схема АВД.

Обмотка статора, якорь АВД, питается от преобразователя частоты ПЧ_с, инвертор тока которого управляется по фазе напряжения якоря, чем имитируется положение щеток на коллекторе ДДП. Обмотка ротора – обмотка возбуждения – подключена к своему собственному преобразователю частоты ПЧ_р, с регулируемой вплоть до перехода на встречное вращение магнитного поля и ротора частотой. Это позволяет снизить потери в двигателе и преобразователях частоты.

При заданных условиях технологического процесса электромагнитном моменте и угловой скорости ротора $X = (m, \omega)$, АВД имеет три изменяемых переменных. Это фаза вектора тока статора относительно его вектора напряжения φ_1 (для тиристорного ПЧ – угол опережения коммутации β), намагничивание двигателя, определяемое главным магнитным потоком Ψ_δ , и частота возбуждения (частота токов ротора) ω_2 .

Выбор критериев оптимальности обусловлен выполняемой технологической задачей и условиями функционирования электропривода. Важное практическое значение имеет задача обеспечения минимальных значений потерь, что необходимо для повышения коэффициента полезного действия в широком диапазоне регулирования угловой скорости и изменении момента сопротивления на валу, а также в целях ограничения нагрева двигателя. Критериями также могут выступать и токи обмоток. Это позволяет получить достаточно близкие к минимуму потерь режимы двигателя.

IV. Задача экстремального управления приводом с АВД

В рамках изложенного выше подхода рассмотрим задачу экстремального управления приводом с АВД по критерию минимума суммарных потерь, которые представляют собой совокупность электромагнитных, механических и добавочных потерь.

$$\Delta P = P_{\text{scop}} + P_{\text{sst}} + P_{\text{rscop}} + P_{\text{rst}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}} = P_{\text{с}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}, \quad (5)$$

где P_{scop} , P_{rscop} – потери в меди обмоток статора и ротора, P_{sst} , P_{rst} – потери в стали статора и ротора, $P_{\text{мех}}$, $P_{\text{доб}}$ – механические и добавочные потери.

Механические потери не могут быть оптимизированы, поскольку скорость ротора задана и не зависит от компонент вектора управлений. Добавочные потери при нагрузках не выше номинальных имеют незначительную величину.

Считаем, что электромагнитный момент и угловая скорость ротора заданы условиями технологического процесса и образуют компоненты вектора состояний $\dot{X} = \dot{X}_c = (m, \omega)$. Тогда, согласно концепции многоканального управления ЭП с АВД [7], будем иметь три варьируемых переменных, образующих вектор управлений: фазу вектора статорного тока $\beta = \varphi_1$, основной магнитный поток Ψ_δ и частоту возбуждения ω_2 – $\dot{U} = (\beta = \varphi_1, \dot{\Psi}, \omega_2)$.

В векторной форме для установившегося режима работы уравнения математической модели АВД [8] примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= \dot{I}_s \cdot R_s + \omega_1 \cdot D \dot{\Psi}_s; & \dot{U}_r &= \dot{I}_r \cdot R_r + \omega_2 \cdot D \dot{\Psi}_r; & \omega_e &= \omega_1 - \omega_2; \\ \dot{\Psi}_s &= L_{ls} \cdot \dot{I}_s + \dot{\Psi}_\delta; & \dot{\Psi}_r &= L_{lr} \cdot \dot{I}_r + \dot{\Psi}_\delta; & D &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \\ \dot{\Psi}_\delta &= L_m \cdot I_m; & \dot{I}_m &= I_s + I_r; & & \\ M_{\text{ЭМ}} &= m = D \dot{\Psi}_\delta \cdot \dot{I}_s; & M_{\text{ЭМ}} &= m = m_c; & & \end{aligned} \quad (6)$$

В работе В.Н. Полякова и Р.Т. Шрейнера показана возможность уменьшения размерности вектора управлений при решении экстремальных задач [5]. Для АВД при условии питания обмоток статора от инвертора тока и использовании вектора основного магнитного потока в качестве опорного целесообразно формировать вектор управлений в виде $\dot{V} = (\dot{I}_s, \omega_2)$.

Тогда уравнения проблемно-ориентированной модели для минимизации суммарных потерь в АВД, в которой независимыми воздействиями будут вектор тока статора \dot{I}_s , частота возбуждения ω_2 и заданный технологической задачей вектор состояний $\dot{X} = \dot{X}_c$, примут вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{\Psi}_\delta &= \frac{m}{I_s}; & \dot{I}_m &= \frac{\dot{\Psi}_\delta}{L_m}; \dot{I}_r = \dot{I}_m - \dot{I}_s; \\
 \dot{\Psi}_s &= L_{ls} \cdot \dot{I}_s + \dot{\Psi}_\delta; & \dot{\Psi}_r &= L_{lr} \cdot \dot{I}_r + \dot{\Psi}_\delta; \\
 \dot{U}_s &= \dot{I}_s \cdot R_s + (\omega_e + \omega_2) \cdot D\dot{\Psi}_s; & \dot{U}_r &= \dot{I}_r \cdot R_r + \omega_2 \cdot D\dot{\Psi}_r,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где составляющие вектора тока статора:

$$\begin{aligned}
 i_{sx} &= I_s \cdot \cos\left(\beta + \theta' + \frac{\pi}{2}\right); \\
 i_{sy} &= I_s \cdot \sin\left(\beta + \theta' + \frac{\pi}{2}\right);
 \end{aligned} \tag{8}$$

заданы модулем тока статора I_s и аргументом $\left(\beta + \theta' + \frac{\pi}{2}\right)$, который представляет собой угол между опорным вектором основного магнитного потока $\dot{\Psi}_\delta$ и вектором тока статора (рис. 2) [9].

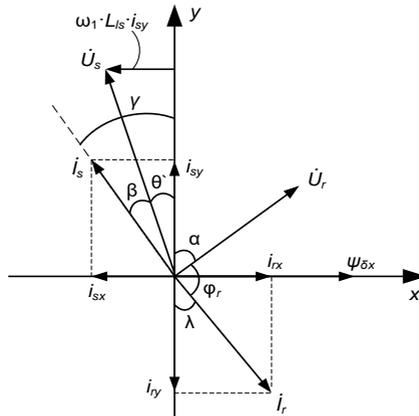


Рис. 2. Векторная диаграмма АВД:

θ' – угол нагрузки АВД; α – фаза вектора напряжения ротора, зависящая от частоты возбуждения; $\theta' + \alpha = \delta$ – угол сдвига фаз между векторами напряжения якоря \dot{U}_s и возбуждения \dot{U}_r , аналогичный углу нагрузки синхронной машины; λ – угол тока возбуждения; $\beta = \varphi_1$ – угол опережения коммутации силовых ключей инвертора тока, равный углу сдвига фаз первых гармоник напряжения и тока статора; $\gamma = \varphi_1 + \theta'$ – угол тока якоря; φ_r – фазовый угол сдвига вектора тока возбуждения

\dot{I}_r относительно вектора напряжения возбуждения \dot{U}_r .

При использовании этой модели электромагнитные потери будут функцией независимых воздействий \dot{I}_s , ω_2 и $\dot{X} = \dot{X}_c$:

$$P_e = (\dot{I}_s, \omega_2, \dot{X}_c) = \sum_{j=s,r} \Delta P_{jcop}(\dot{I}_s, m) + \sum_{j=s,r} \Delta P_{jst}(\dot{I}_s, m), \quad (9)$$

где потери в меди и в стали двигателя определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta P_{scop}(\dot{I}_s, m) &= R_s \cdot |\dot{I}_s|^2(\dot{I}_s, m); \\ \Delta P_{rcop}(\dot{I}_s, m) &= R_r \cdot |\dot{I}_s|^2(\dot{I}_s, m); \\ \Delta P_{sst}(\dot{I}_s, \omega_2, \omega_e) &= \Psi_\delta^2 \cdot k_{cs} \cdot (\omega_e + \omega_2)^{1.5}; \\ \Delta P_{rst}(\dot{I}_s, \omega_2) &= \Psi_\delta^2 \cdot k_{cr} \cdot \omega_2^{1.5}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда задача определения минимума суммарных потерь на безусловный экстремум ($\Delta P \rightarrow \min$) в принятых терминах может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{\dot{V}=(\dot{I}_s, \omega_2)} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c. \quad (11)$$

Анализ критерия оптимальности $\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c)$ показывает, что частота возбуждения оказывает влияние только на потери в стали. Изменение аргумента тока статора приводит к изменению его составляющих i_{sx} , i_{sy} и влияет на потери в меди. При условии $\beta = -\theta'$ приходим к ортогональности векторов $\dot{I}_s \perp \dot{\Psi}_\delta$, $i_{sx} = 0$, $i_{sy} = -i_{ry}$ [9].

Этот режим обеспечивает минимум токов в обмотках при заданном электромагнитном моменте. Отсюда следует очень важный вывод: реализация ортогонального управления снижает размерность вектора управлений. Теперь изменяемыми переменными могут быть частота возбуждения ω_2 и магнитный поток (ток намагничивания).

Тогда критерий минимума суммарных потерь примет вид:

$$\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{\dot{V}=(\dot{\Psi}_\delta, \omega_2)} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c. \quad (12)$$

Причем функция качества $\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c)$ является хорошо организованной, поскольку изменение магнитного состояния более существенно влияет на показатель качества, т.к. при этом меняются и потери в меди, и потери в стали двигателя, тогда как при изменении частоты возбуждения – только потери в стали [10]. Решение экстремальной задачи в этом случае

можно найти классическим методом Эйлера.

В электроприводах, длительно работающих с нагрузками, близкими к номинальным, потери в стали значительно меньше активных потерь. Для таких режимов более применим экстремальный по минимуму токов закон управления.

При выборе в качестве критерия оптимальности минимума токов без учета потерь в стали и реализации ортогонального управления экстремальная задача примет вид:

$$i_{sy}, \dot{I}_r (\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{\dot{V}=(\Psi_\delta)} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c. \quad (13)$$

Учитывая, что при ортогональном управлении выполняются условия $i_{sy} = -i_{ry}$, $|\dot{\Psi}_\delta| = \Psi_{\delta x} = L_m \cdot i_{rx}$, т.е. варьирование магнитного потока осуществляется намагничивающей составляющей тока ротора. Вторая составляющая является моментобразующей. Тогда при заданном электромагнитном моменте $m = m_c$ необходимо найти такое сочетание проекций тока ротора, при котором модули токов статора и ротора будут минимальны. Проекция тока ротора могут быть заданы как:

$$\begin{aligned} i_{rx} &= \dot{I}_r \cdot \cos \lambda'; \\ i_{ry} &= \dot{I}_r \cdot \sin \lambda', \end{aligned} \quad (14)$$

где λ' – угол между векторами тока ротора и основного магнитного потока.

При такой постановке задача минимизации токов сводится к поиску оптимальной фазы между векторами тока и потока:

$$i_{sy}, \dot{I}_r (\lambda', m = m_c) \rightarrow \min_{\lambda'} \Rightarrow \lambda'^o(m), m_c \in Q_{m_c}. \quad (15)$$

Поиск решения можно также вести классическим методом Эйлера.

Рассмотренная нами задача минимизации суммарных потерь без ограничений ($\Delta P \rightarrow \min$) предполагает изменение основного магнитного потока в широком диапазоне. При значительных изменениях нагрузки для поддержания скорости на заданном уровне необходимо быстрое изменение потока за счет значительного форсирования напряжения. В реальных ПЧ запас по напряжению ограничен, и применить алгоритм минимума потерь будет невозможно. В таких условиях целесообразно применение алгоритма минимума суммарных потерь при неизменном заданном потоке Ψ_δ .

Задача формулируется следующим образом. Задан критерий оптимизации $\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c)$, где $\dot{X}_c \in Q_c$. Требуется найти управление $\forall i_0 \in QV$, обеспечивающее минимум целевой функции. При этом на область допустимых управлений наложено ограничение $\Psi_\delta = \Psi_\delta^* = \text{const}$, где Ψ_δ^*

– заданное значение модуля основного магнитного потока, например, номинальное.

Тогда при обеспечении ортогональности векторов $\dot{i}_s \perp \dot{\Psi}_\delta$ и составе вектора управлений $V = (\dot{\Psi}_\delta, \omega_2)$ задача примет вид

$$\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{V \in Q_V} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c, \quad (16)$$

$$\text{где } Q_V = \{V : V = (\dot{\Psi}_\delta, \omega_2), \Psi_{\delta x} = \Psi_{\delta x}^* = \text{const}\}.$$

В системе координат x, y , ориентированной по вектору основного магнитного потока, магнитный поток может быть задан проекцией тока намагничивания $\Psi_{\delta x}^* = L_m \cdot i_{rx}^*$. А при заданном электромагнитном моменте будут известны и моментобразующие токи статора и ротора $i_{sy} = -i_{ry}$, и соответственно, потери в меди обмоток. Тогда решение задачи сведется к одномерной задаче поиска оптимальной частоты возбуждения, обеспечивающей минимум потерь в стали.

Рассмотренные постановки задач безусловного или условного (с ограничениями) поиска экстремальных управлений АД по энергетическим критериям имеют одно общее сходство: необходимость изменения магнитного состояния двигателя, что, вследствие электромагнитной инерции цепей двигателя, неприемлемо для динамичных приводов. Поэтому в таких случаях целесообразно применение алгоритмов управления с постоянным магнитным потоком во избежание значительных форсировок выходного напряжения ПЧ. С другой стороны, для обеспечения минимума суммарных потерь при низких нагрузках необходимо значительно уменьшать магнитный поток. При этом возникает опасность полного размагничивания двигателя. Поэтому имеет смысл ограничивать нижнюю границу величины магнитного потока 10-20 % номинального. Таким образом, при минимизации потерь или токов необходимо вводить ограничения на магнитный поток двигателя.

При этом необходимо учитывать, что зависимость магнитного потока от тока намагничивания $\Psi_\delta = f(I_m)$ носит нелинейный характер и при решении экстремальных задач необходимо аппроксимировать кривую намагничивания некой функцией, позволяющей однозначно поставить в зависимость току намагничивания значение магнитного потока.

В. Заключение

Предложенная формулировка обобщенной задачи экстремального управления электроприводом при выполнении им технологической задачи позволяет учесть ограничение силового ПЧ по выходному напряжению.

Обоснован выбор практически значимых критериев экстремального управления электроприводом с АД.

Установлено, что реализация ортогонального управления векторами тока статора и основного потокосцепления уменьшает размерность вектора управлений. При этом функция качества будет хорошо организованной и решение задачи экстремального управления возможно классическим методом Эйлера.

Все рассмотренные постановки задач безусловного или условного (с ограничениями) поиска экстремальных управлений ЭП с АД по энергетическим критериям связаны с изменением магнитного состояния двигателя, что ведет к необходимости аппроксимации кривой намагничивания.

© Тутаев Г.М., 2018

© Бобров М.А., 2018

Библиографический список

- [1] Петухов Г.В., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. – 504 с.
- [2] Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: автореф. дис. д-р. техн. наук, УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2009. – 41 с.
- [3] Панкратов В.В., Зима Е.А. Математическое моделирование асинхронных электрических машин и машин двойного питания // *Электротехника*. 2003. №9. С. 19-25.
- [4] Панкратов В.В., Зима Е.А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 120 с.
- [5] Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими двигателями. Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2006. – 420 с.
- [6] Сонин Ю.П., Гуляев И.В. Асинхронизированный вентильный двигатель. Саранск: изд-во Морд. гос. ун-та, 1998. – 68 с.
- [7] Тутаев Г.М. Асинхронизированный вентильный двигатель как многоканальный объект управления // *Электричество*. 2003. № 10. С. 48-51.
- [8] Гуляев И.В., Тутаев Г.М., Волков А.В. Асинхронизированный вентильный двигатель и его модель // *Электротехника*. 2016. № 12. С. 64-68.
- [9] Тутаев Г.М. Варианты векторного управления электроприводом с асинхронизированным вентильным двигателем // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2009. № 3. С. 11-15.
- [10] Растринин Л.А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. – 630 с.

G.M. Tutaev, M.A. Bobrov

EXTREMAL CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION MOTOR DRIVE BY ENERGY CRITERIA

National Research Mordovia State University

Abstract. The issues of increasing efficiency of electrotechnical complexes with electric drives are extremely important. The article is devoted to the task of extremal control of AC electric drives, in particular, to the task of extremal control in terms of energy criteria of the electric drive on an doubly inverter-fed induction motor (DIFIM). Energy criteria are the minimum of currents consumed by windings or the minimum of total losses, which provides an increase of efficiency of the motor and limits its heating. At the specifying of the process conditions, the state vector components are represented by the required electromagnetic torque and the specified angular speed of the rotor. The variable quantities forming the control vector are the phase of the stator current vector, the air gap flux and the excitation frequency. It is shown that it is possible to use the classical Euler method to solve the task of extremal control the electric drives with the DIFIM. Considered in the article statements of the task of searching for extremal controls by a DIFIM according to energy criteria are associated with the need to change the magnetic state of the motor, which is unacceptable for dynamic drives. Therefore, in such cases, the use of control algorithms with a constant magnetic flux is advisable in order to avoid significant boosting of the output voltage of the frequency converter. On the other hand, to minimize the total losses at low loads, it is necessary to significantly reduce the magnetic flux. However, there is a danger of a complete demagnetization of the motor. In this connection, it makes sense to limit the lower limit of the magnetic flux up to 10-20% of the nominal value. In this case it is necessary to take into account that the dependence of the magnetic flux on the magnetization current is nonlinear, and when solving extremal task, it becomes necessary to approximate the magnetization curve by a function that makes it possible to uniquely determine the magnetic flux value.

Keywords: control vector, doubly inverter-fed induction motor, extremal control, mathematical model, optimality criterion, quality function, state vector.

References

- [1] G.V. Petukhov and V.I. Yakunin. Methodological basis of external design of purposeful processes and purposeful systems. Moscow: ACT, 2006.
- [2] V.N. Polyakov. Energy-efficient operation modes of AC drives. Doct. of Tech. S. thesis, Ural State Technical University, Ekaterinburg, 2009.
- [3] V.V. Pankratov and E.A. Zima. Asynchronous machines and machines with a double power supply. Russian Electrical Engineering, vol. 74, no. 9, pp. 22-29, Sept. 2003.
- [4] V.V. Pankratov and E.A. Zima. Energy-optimal flux vector control of induction electric drives. Novosibirsk: NSTU, 2005.
- [5] V.N. Polyakov and R.T. Shreiner. Extremal control of electric motors. Ekaterinburg: USTU, 2003.

- 2006.
- [6] Yu.P. Sonin and I.V. Gulyaev, Double inverter-fed induction motor. Saransk: OMSU, 1998.
 - [7] G.M. Tutaev. An Asynchronized converter-fed motor as a multichannel controlled plant // *Electricity*, no. 10, pp. 48-51, Oct. 2013.
 - [8] I.V. Gulyaev, G.M. Tutaev and A.V. Volkov. An asynchronized converter-fed motor and its model // *Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 12, pp. 693-697, Dec. 2016.
 - [9] G.M. Tutaev. Flux vector control options of asynchronized converter-fed motor // *Electrical engineering complexes and control systems*. no. 3, pp. 11-15, March 2009.
 - [10] L.A. Rastrigin. *Extremal control system*. Moscow: Science, 1974.

УДК 621.313.32

А.И. Федотов¹, Р.Ш. Басыров²,
Г.В. Вагапов¹, Л.И. Абдуллин³

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 кВ

¹ Казанский государственный энергетический университет² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева³ ОАО «Сетевая компания»

Одной из основных задач Стратегии развития Единой национальной электрической сети является повышение эффективности функционирования воздушных линий электропередачи. Решение данной задачи предполагает внедрение современных систем мониторинга технического состояния воздушных линий электропередачи. Требуются и более строгие методики расчета состояния оборудования, позволяющие учесть внешние климатические факторы и воздействие протекающего тока. В статье рассмотрены теоретический и практический подходы к проблеме мониторинга состояния проводов воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше. Приведен анализ существующих методов определения текущего состояния провода воздушной линии электропередачи. Установлено, что однозначное общепринятое решение рассматриваемой проблемы отсутствует. Проведено теоретическое исследование, показавшее необходимость объединения предлагаемых решений. С учетом полученных другими исследователями результатов разработана имитационная модель в *Matlab/Simulink*, позволяющая проводить оценку текущего состояния провода на основе данных с сенсоров. С помощью модели можно определить стрелу провеса, длину провода, действующее механическое напряжение, удельные нагрузки от бокового ветра и гололедно-изморозевых отложений. Одновременно модель позволяет определять критические значения для каждого пролета индивидуально в зависимости от воздействия внешних факторов. На основе имитационной модели показана возможность организации системы текущего мониторинга проводов в полете. Сравнительный анализ текущего состояния проводов и грозозащитных тросов и их предельных значений позволит провести оценку эффективности мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций и снизить недоотпуск электроэнергии конечному потребителю.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, грозозащитный трос, мониторинг, стрела провеса, уравнение состояния провода.

1. Введение

Проблемы, связанные с эффективностью функционирования воздушных линий (ВЛ) электропередачи напряжением 110 кВ и выше, отно-

сятся к числу важнейших как с теоретической стороны для технической науки, так и с практической точки зрения для электросетевого комплекса. Это объясняется тем, что высокий потенциал повышения эффективности функционирования отечественных ВЛ электропередачи обусловлен как несовершенством основных методик расчета, так и недостаточным развитием технического мониторинга текущих эксплуатационных процессов на ВЛ. Реализация потенциала повышения эффективности функционирования ВЛ, совершенствование эксплуатации электрических сетей являются одними из основных задач Стратегии развития Единой национальной электрической сети ОАО «ФСК ЕЭС» [1].

Внедрение современных систем мониторинга и диагностики состояния оборудования подстанций и линий электропередачи в целях повышения эффективности функционирования подразумевает необходимость использовать математически более строгие методики для расчета состояния оборудования по сравнению с методиками, обычно используемыми на этапе проектирования. Система мониторинга должна быть одновременно ориентирована на решение четырех наиболее важных функциональных задач: регистрация текущего состояния провода и грозозащитного троса на ВЛ 110 кВ; визуализация текущего состояния провода и грозозащитного троса на ВЛ 110 кВ; предупреждение о приближении критических значений стрелы провеса; хранение массива данных в архиве.

II. Постановка задачи и цели исследования

Одна из основных математических задач описания текущего функционирования ВЛ электропередачи состоит в определении таких параметров как стрела провеса, длина провода и т.д. при определении пропускной способности ВЛ в летний период или при наступлении гололедно-изморозевых отложений в зимний период. Классический подход при определении габаритов ВЛ отечественных авторов основан на использовании уравнений параболы [2-6]. Зарубежные исследователи, опираясь на свои стандарты, предлагают использование аналогичного подхода к определению габаритов [7-9]. Однако, как отмечают авторы, при использовании уравнений параболы ошибка составляет 1,0 % при длине между опорами 800 м, при возрастании расстояния между опорами ошибка становится существенно больше [7]. Таким образом, ясна необходимость использования альтернативных подходов.

III. Описание и обоснование предлагаемых методов решения поставленных задач

Одним из альтернативных подходов к определению габаритов ВЛ является использование математической модели гибкой нити на основе гиперболической функции. Однако использование данной модели гибкой нити сопряжено с необходимостью использования ряда допущений и

ограничений для уменьшения размерности задачи. При необходимости повышения точности расчетов можно отказаться от ряда допущений с одновременным увеличением количества вычислений. В качестве первого допущения принимается, что провод уже деформирован вследствие продолжительного воздействия на него внешних приложенных сил. В качестве второго допущения в расчетах не учитывается витая структура провода. Ниже приведено краткое математическое описание, полное математическое описание, опубликованное авторами в 2017 году [10].

Динамический анализ состояния провода ВЛ основывается на использовании канонического уравнение цепной линии для описания провеса провода ВЛ в полете:

$$y = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x}{a} - 1 \right), \quad (1)$$

где параметр a является физическим и однозначно задает форму провеса провода и определяется как:

$$a = \frac{T}{q}, \quad (2)$$

где T – действующее значение тяжения провода, Н; q – единица веса длины провода, кг/м.

Однако, параметры T и a в уравнении (2) неизвестны. Одновременно в уравнении (1) неизвестно значение x для общего случая подвеса провода в полете ВЛ. Определение состояния провода ВЛ по углу наклона касательной проиллюстрировано на рис. 1. Очевидно, что при $h \neq 0$, $x_B = -(l - x_A)$. Тогда, согласно стандарту IEEE 738-2006 [8]:

$$h = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_A}{a} - \operatorname{ch} \frac{l - x_A}{a} \right), \quad (3)$$

где a – параметр канонического уравнения цепной линии; h – превышение координат точек подвеса провода в полете A и B .

Превышение координат точек подвеса провода в полете A и B , определяется следующим выражением:

$$h = y_A - y_B. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае применительно к принятым условным обозначениям каноническое уравнение будет иметь вид:

$$y = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_A}{a} - 1 \right). \quad (5)$$

Тангенс угла α , определяемый по данным с сенсоров, раскрывает зависимость от параметра a следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{sh} \frac{x_A}{a}. \quad (6)$$

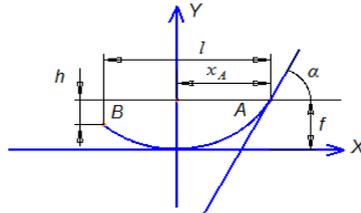


Рис. 1. Визуализация общего случая подвеса провода ВЛ:

A и B – разновысокие точки подвеса провода на опорах;

x_A – расстояние между точкой A и осью ординат;

f – стрела провеса провода, l – расстояние между опорами;

α – угол наклона касательной в точке подвеса провода

Объединение уравнений тангенса угла α и значения превышения координат h в систему уравнений позволяет определить значения a и x_A . Решение данной системы уравнений возможно различными способами. Одним из оптимальных способов определения требуемых значений является решение через команду *solve* пакета *Matlab*. Обозначив x_A через x , а параметр a через y , и одновременно подставив числовые значения h , l и $\operatorname{tg}(\alpha)$, находятся однозначные решения x и y , т.е. x_A и a :

$$\begin{aligned} [x, y] &= \operatorname{solve}('(\sinh(x / y)) = \tan(a)'); \\ 'y^* (\cosh(x / y) - \cosh((l - x) / y)) &= h'. \end{aligned} \quad (7)$$

К полученному значению x_A необходимо внести поправку при расположении сенсора не в точке подвеса провода, а на расстоянии λ (рис. 2).

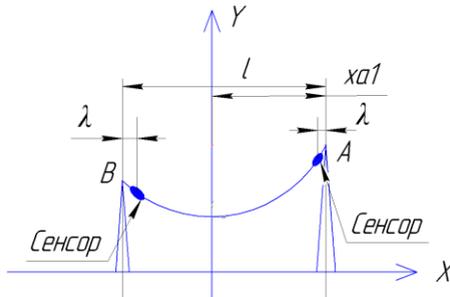


Рис. 2. Визуализация установки сенсоров на проводе ВЛ

В случае, если измерительные сенсоры располагаются на расстоянии λ от точек крепления провода, конечное значение x_1 будет определяться выражением:

$$x_1 = a - \lambda. \quad (8)$$

Таким образом, по значению действующего угла наклона касательной, получаемого с сенсора, значений высот подвеса провода ВЛ и длины пролета ВЛ, получаемых из проектного решения ВЛ или по результатам обследования ВЛ, возможно однозначное определение координаты x_A и параметра a .

Следующим этапом определения параметров провеса провода в пролете является определение точных значений стрелы провеса f , длины провода L и тяжения провода в точке подвеса провода T и в нижней точке H_0 по выше определенным параметрам x_A и a . Стрела провеса провода в пролете f определяется:

$$f = a \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_A}{a} - 1 \right). \quad (9)$$

Длина провода в пролете L определяется:

$$L = a \cdot \left(\operatorname{sh} \frac{x_A}{a} + \operatorname{sh} \frac{l - x_A}{a} \right). \quad (10)$$

Тяжение T провода в точке подвеса определяется:

$$T = a \cdot q \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_A}{a} \right). \quad (11)$$

Горизонтальная проекция натяжения нити H_0 в нижней точке y_0 описывается следующей зависимостью:

$$T_0 = H_0 = a \cdot q, \quad (12)$$

где q – единица длины веса провода, кг/м.

Следующим этапом определения параметров текущего провеса провода в пролете является определение точных значений стрелы провеса f , длины провода L и тяжения провода в точке подвеса провода T и в нижней точке H_0 по выше определенным параметрам x_A и a при одновременном изменении нагрузки и температуры.

Текущее приращение длины провода ΔL , м:

$$\Delta L = L_n - L_m, \quad (13)$$

где L_m – длина провода в начальном состоянии; L_n – длина провода в конечном состоянии.

Текущее приращение длины провода ΔL определяется выражением:

$$\Delta L = L_m \cdot \left[1 + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_n - \sigma_m)\right] \cdot [1 + \alpha \cdot (t_n - t_m)] - L_m, \quad (14)$$

где E – модуль упругости; σ_n – напряжение в проводе в точке подвеса провода в конечном состоянии; σ_m – напряжение в проводе в точке подвеса провода в начальном состоянии; α – коэффициент температурного линейного расширения; t_n – температура провода в конечном состоянии; t_m – температура провода в начальном состоянии.

Длина провода в конечном состоянии определяется как:

$$L_n = L_m \cdot \left[1 + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_n - \sigma_m)\right] \cdot [1 + \alpha \cdot (t_n - t_m)]. \quad (15)$$

Преобразование (20) относительно σ_n приводит к следующему виду:

$$\sigma_n = \left[\frac{L_n}{L_m \cdot (1 + \alpha \cdot (t_n - t_m))} - 1 \right] \cdot E + \sigma_m. \quad (16)$$

Согласно (17), возможно определить тяжение T_n в точке подвеса провода:

$$T_n = \sigma_n \cdot F. \quad (17)$$

Одновременно возможно воспользоваться (11) и определить тяжение T_n через параметры x_{an} и a_n , определяемые по представленной выше методике:

$$T_n = a_n \cdot q \cdot \left(\operatorname{ch} \frac{x_{an}}{a_n} \right). \quad (18)$$

Удельная суммарная нагрузка q_n будет складываться из: удельного веса провода q_1 , удельной нагрузки от гололеда q_2 и удельной нагрузки от ветра q_3 .

$$q_n = q_1 + q_2 + q_3. \quad (19)$$

Нагрузка от удельного веса провода известна и принимается по табличным данным. На рис.3 представлена удельная нагрузка от ветра q_3 , которая определяется исходя из угла отклонения провода в горизонтальной плоскости.

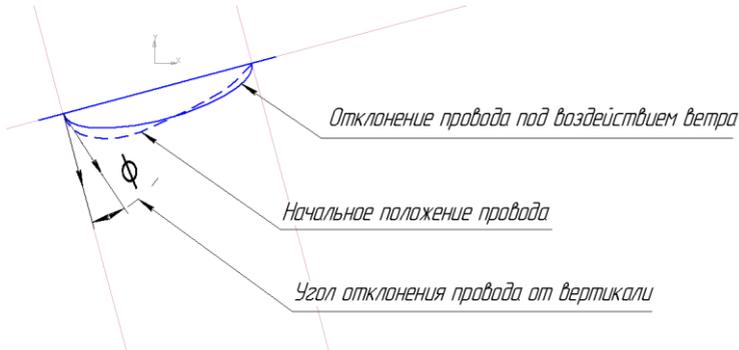


Рис. 3. Визуализация отклонения провода ВЛ от воздействия ветра на угол φ

Соответственно, возможно записать:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{q_3}{q_1 + q_2}. \quad (20)$$

Значение удельной нагрузки от гололеда q_2 одновременно может быть выражено:

$$q_2 = g_0 \cdot \pi \cdot c \cdot (d + c) \cdot 10^{-3}, \quad (21)$$

где g_0 – объемный вес гололеда, принимаемый $0,9 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·мм²); d – диаметр провода, мм; c – толщина стенки гололеда, мм.

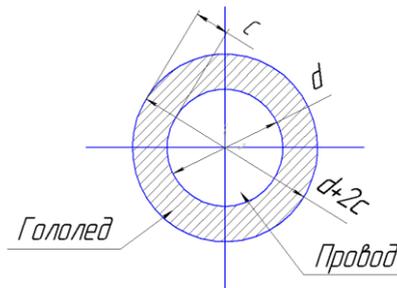


Рис. 4. Визуализация схемы гололедообразования на проводе ВЛ

Таким образом, значения углов продольного и поперечного отклонения провода предоставляют возможность определения как толщины стенки гололеда, так и ветровой нагрузки расчетным путем.

IV. Практическая реализация

Практическая реализация предложенной имитационной модели была осуществлена в виде алгоритма и программном обеспечении.

Общий вид алгоритма приведен на рис. 5. В виду большой размерности блок-схемы, ее общий вид уменьшен. В качестве примера на рис. 6 начало блок-схемы алгоритма представлено в укрупненном виде.

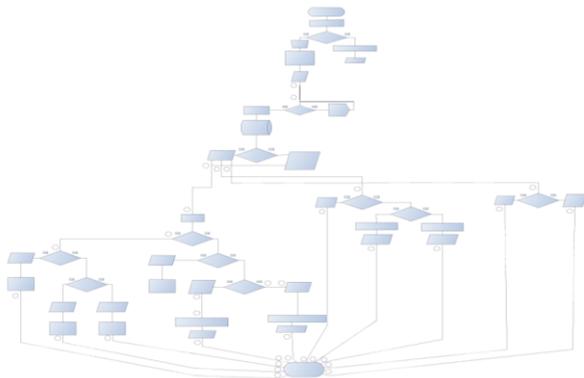


Рис. 5. Блок-схема (общий вид)

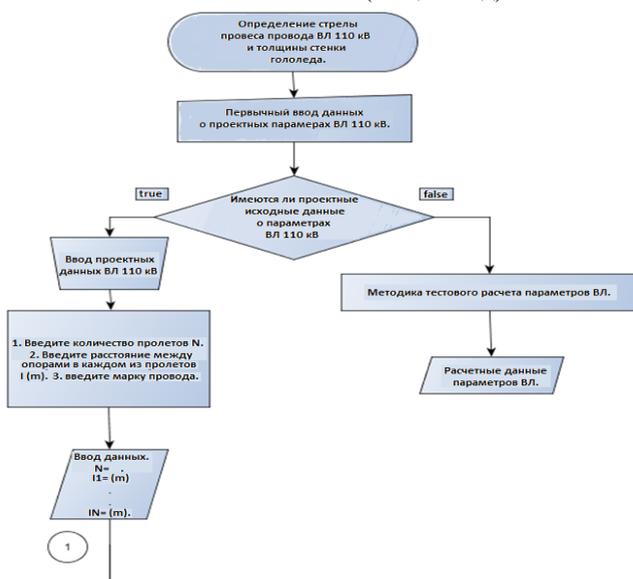


Рис. 6. Блок-схема (лист 1)

По приведенному алгоритму было реализовано программное обеспечение расчета текущих параметров провода в пролете на основе значений углов провеса провода. Пример диалогового окна представлен на рис. 7.

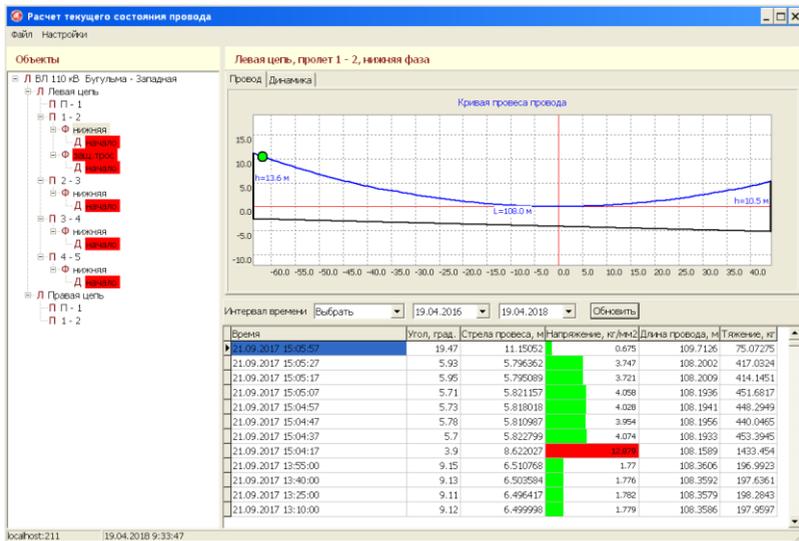


Рис. 7. Внешний вид окна программного обеспечения алгоритма.

В качестве примера на рис. 8 приведено сопоставление изменения угла провеса провода и температуры провода.

Результаты сопоставления значений угла провеса провода в пролете с фактической температурой провода демонстрируют ярко выраженную взаимосвязь.

V. Выводы

Алгоритм расчета воздушных линий электропередачи основан на значениях продольного угла провеса провода и грозозащитного троса ВЛ.

Одновременно имеется возможность технического контроля угла поперечного отклонения провода и грозозащитного троса.

По представленным физическим параметрам алгоритм определяет расчетные значения: напряжения, тяжения, стрелы провеса и длины провода и грозозащитного троса ВЛ.

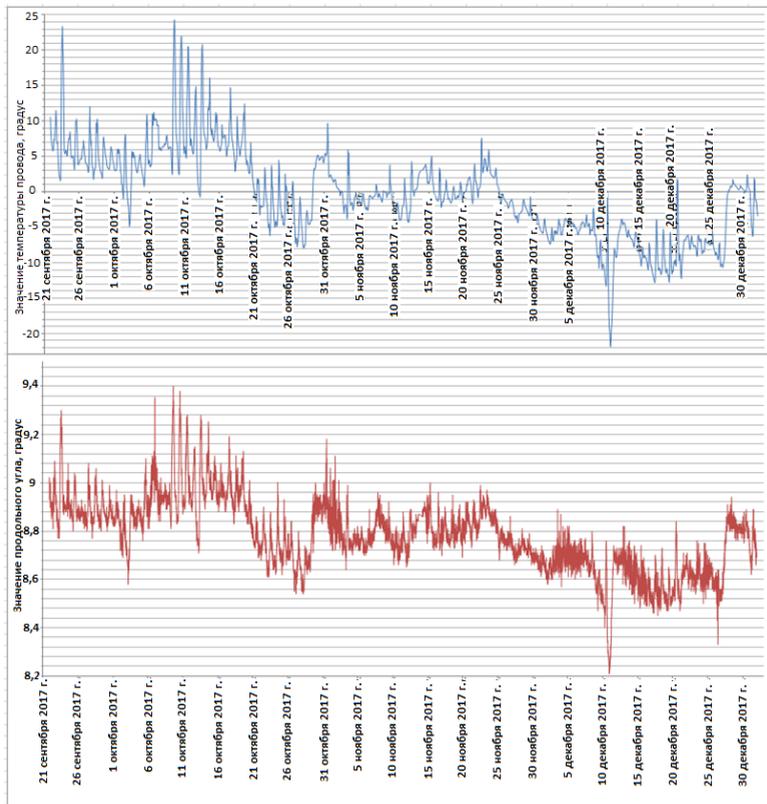


Рис. 8. Масштабированное сопоставление динамики изменения температуры и продольного угла провеса провода за период 21.09.2017 – 31.12.2017

© Федотов А.И., 2018
 © Басыров Р.Ш., 2018
 © Вагапов Г.В., 2018
 © Абдуллин Л.И., 2018

Библиографический список

- [1] Основные положения Стратегии развития Единой национальной электрической сети, ОАО «ФСК ЕЭС», 2003. – 62 с.
- [2] Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. Л.: Госстройиздат. Ленинградское отделение, 1962. – 224 с.

- [3] Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
- [4] Бошнякович А.Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 254 с.
- [5] Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1979. – 312 с.
- [6] Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
- [7] Fischer R, Kiessling F. Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausföhrung: 4 ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993. – 439 с.
- [8] IEEE 738-2006. IEEE Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors. Введ. 2006–11–16. – 69 с.
- [9] IEEE 738-2012/Cor 1-2013. IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors. Введ. 2012–10–19. – 72 с.
- [10] Макаров В.Г., Федотов А.И., Басыров Р.Ш., Вагапов Г.В. Моделирование воздушной линии электропередачи в пакете MATLAB/SIMULINK // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 13. С. 93-96.

**A.I. Fedotov¹, R.Sh. Basyrov²,
G.V. Vagapov¹, L.I. Abdullin³**

THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF MONITORING WIRE OF OVERHEAD POWER LINES 110 kV

¹ Kazan State Power Engineering University

² Kazan National Research Technical University n. a. A.N. Tupolev

³ «Grid company»

Abstract. One of the main tasks of the Strategy for the development of the Unified National Electric Grid is to increase the efficiency of the operation of overhead power lines. The solution of this task involves the introduction of modern monitoring systems for the technical condition of overhead transmission lines and more strict methods for calculating the state of equipment that allow take into account external climatic factors and the effect of a current flowing. The article considers theoretical and practical approaches to the problem of monitoring the condition of wires of overhead power lines with a voltage of 110 kV and above. An analysis of existing methods for determining the current state of the overhead power line wire is given. It is established that, despite the variety of existing approaches and proposed technical solutions, there is no generally accepted solution to the considered problem. A theoretical study has shown the need to combine the proposed solutions. Taking into account the results obtained by other researchers, a *Matlab / Simulink* model was developed, which makes it possible to assess the current state of the wire based on sensor data. The presented model allows one to determine sag, wire length, acting mechanical stress, specific loads from the side wind

and ice. At the same time, the model allows one to determine critical values for each span individually depending on the influence of external factors. The possibility of organizing a system of current monitoring of the wires in the span is shown on the basis of the model. A comparative analysis of the current condition of wires and strike protection wires and their limit values will allow an assessment of the effectiveness of measures to prevent emergencies and reduce the under-supply of electricity to the end user.

Keywords: ice load, main equation of wire, monitoring, overhead power line, sag, strike protection wire.

References

- [1] The main provisions of the Strategy for the development of the Unified National Electric Grid, Federal Grid Company, 2003. [Online]. Available at: http://www.fsk-ees.ru/about/development_strategy_enes/.
- [2] V.K. Kachurin. Theory of dangling systems. Static calculation. Leningrad: Gosstroizdat. Leningrad Department, 1962.
- [3] A.A. Glazunov. Basics of the mechanical part of overhead power lines. Leningrad: Gosenergoizdat, 1956.
- [4] A.D. Boshnyakovich. Mechanical calculation of wires and ropes of power lines. Leningrad: Gosenergoizdat, 1962.
- [5] K.P. Kryukov and B.P. Novgorodtsev. Constructions and mechanical calculation of power transmission lines. Leningrad: Energy, Leningrad Department, 1979.
- [6] V.I. Idelchik. Electrical systems and grids. Moscow: Energoatomisdat, 1989.
- [7] R. Fischer and F. Kiessling. Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausföhrung: 4 ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [8] IEEE Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors. IEEE 738–2006. Nov. 2006.
- [9] IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors. IEEE 738-2012/Cor 1-2013, Aug. 2013.
- [10] V.G. Makarov, A.I. Fedotov, R.Sh. Basyrov and G.V. Vagapov. Simulation of the overhead power line in the MATLAB / SIMULINK // Bulletin of the Technological University. vol. 20, no. 13, pp. 93-96, July 2017.

УДК 622.311.1:658.26

А.С. Карпов, В.В. Ярошевич

ВЕРИФИКАЦИЯ СЕРТИФИЦИРОВАННЫХ АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ НА ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ

Кольский научный центр РАН

Для большинства электротехнических комплексов вследствие присутствия несимметричных и нелинейных нагрузок актуальными являются вопросы обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии (ПКЭ). При этом оборудование, предназначенное для анализа качества электроэнергии (КЭ), присутствующее на электроэнергетическом рынке, отличается по характеристикам и критериям точности. Статья посвящена оценке расхождений двух анализаторов КЭ различных производителей по одинаковым ПКЭ. Оценка проведена с помощью синхронизированных измерений КЭ на действующей подстанции 10/0,4 кВ. Для проведения измерений выбрана четырехпроводная сеть с разнородной и несимметричной по фазам нагрузкой. Проведено сопоставление анализаторов КЭ по ключевым показателям – отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U , коэффициентом n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$), несимметрия напряжений (коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}), отклонение частоты Δf . Установлено, что при синхронной регистрации между сертифицированными приборами «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M» существует разница в измеряемых показателях, превышающая допустимый уровень погрешности.

Ключевые слова: анализатор качества электроэнергии, измерения в действующей высоковольтной сети, качество электроэнергии, локализация источников искажения, показатели качества электроэнергии, электрическая подстанция, электромагнитная совместимость.

1. Введение

Проблемы качества электроэнергии привлекли внимание многих исследователей, производителей и потребителей электроэнергии. Эти проблемы становятся всё более весомыми вследствие широкого использования несимметричных, нелинейных однофазных и трёхфазных нагрузок. В свою очередь, это всё более затрагивает сети электропередачи в частных, коммерческих и промышленных секторах. Ухудшение качества электроэнергии происходит как из-за возмущений, вызванных переходными процессами (броски и просадки напряжения, импульсные помехи) так и в установившихся режимах (гармонические помехи, несимметричность).

Все искажения должны иметь свои допустимые значения отклонений, установленные стандартами РФ [1-5]. Выход за них ведет к материальному ущербу для потребителей. Нормативной документацией установлена периодичность контроля качества электроэнергии: один раз в два года для всех показателей качества электроэнергии (ПКЭ), и два раза в год для отклонения напряжения [4, 6]. Помимо этого, анализ качества электрической энергии проводят при наличии претензий или замечаний от потребителей, а также в случае выявления существующих или потенциальных несоответствий по показателям качества электроэнергии [4, 7, 8].

II. Характеристика исследуемой сети

Сеть Кольского научного центра (КНЦ РАН) является хорошим показателем того, как на одной секции шин могут размещаться совершенно разные потребители. Например, мощная трехфазная нагрузка приборов, экспериментальных лабораторий и больницы КНЦ создают скачки тока до 500 А. Они подключены к той же системе шин, что и остальные потребители с однофазной нагрузкой. Такое соседство приводит к искажениям напряжения на всей системе шин. Выражается это несимметрией, несинусоидальностью, провалами напряжениями и перенапряжениями. Именно в сети КНЦ (рис. 1) на ТП-92 10/0,4 кВ и проводились эксперименты.

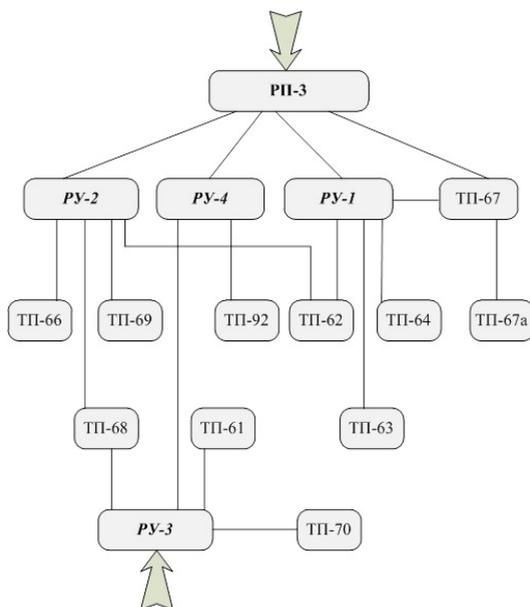


Рис. 1. Схема распределительной сети 10 кВ КНЦ РАН.

Анализируемая сеть (КНЦ РАН) расположена в городе Апатиты Мурманской области. Источником электроэнергии для потребителей КНЦ РАН являются подстанции ПС-24 и ПС-360 Централных электрических сетей филиала ОАО «МРСК Северо-Запада» «Колэнерго». С шин 10 кВ посредством двух кабельных фидеров (Ф-4 и Ф-20) запитаны распределительные подстанции РП-3 и РП-1, расположенные на значительном территориальном удалении друг от друга. Основным питающим узлом для объектов КНЦ РАН является подстанция РП-3. Питание от подстанции РП-1 рассматривается, как резервный источник электроэнергии. Ее особенности более подробно приведены в работе с участием авторов в 2015 году [9].

Проверка качества электроэнергии предполагает регистрацию напряжения и тока и сопоставлением полученных данных с существующими стандартами. Данная проверка проводилась на трансформаторной подстанции ТП-92 (Т-2).

Основными параметрами определения качества для сети 0,4 кВ являются: отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения (коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения K_U , коэффициентом n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$), несимметрия напряжений (коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}), отклонение частоты Δf .

III. Анализ сертифицированных анализаторов качества

Для измерения и дальнейшего анализа вышеперечисленных показателей применялось два регистратора: «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M», которые отличаются друг от друга (рис. 2). Сведем их основные параметры в табл. 1.



Рис. 2. Внешний вид регистраторов «Парма РК 3.01» (а); «Ресурс UF2M» (б)

Таблица 1
 Параметры приборов «Ресурс UF2M» и «Парма РК 3.01»

Измерение ПКЭ	«Ресурс UF2M»	«Парма РК 3.01»
1. Установившееся отклонение напряжения δU_y , %	+	+
2. Отклонение частоты Δf , Гц	+	+
3. Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %	+	+
4. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} , %	+	+
5. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения K_U , %	+	+
6. Кратковременная доза фликера P_{Si} , о.е.	+	-
7. Длительная доза фликера P_{Li} , о.е.	+	-
8. Коэффициент временного перенапряжения $K_{перU}$, о.е.	+	-
9. Размах изменения напряжения δU_1 , %	+	-
10. Измерение токов	+	-
11. Измерение угла между напряжением и током	+	-
12. Длительность провала напряжения $\Delta t_{п}$, с	+	+

По количеству измеряемых показателей качества электроэнергии «Ресурс UF2M» во многих аспектах превосходит «Парму РК 3.01». В отличие от РК 3.01, он способен измерять токи и угол между напряжением и током, а также кратковременную дозу фликера, длительность дозы фликера, коэффициент временного перенапряжения и размах напряжения. В то же время «РЕСУРС UF2M» представляет результаты в таком виде, что дальнейшая их обработка практически невозможна [10]. Оба измерительных прибора имеют одинаковый способ подключения – через токовые клещи – и не могут работать на постоянной основе. На рис. 3 показано подключение Ресурс UF2M к трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН). Присоединение Пармы РК 3.01 производится по аналогии с Ресурсом, но исключительно к выводам ТН.

IV. Анализ мониторинговых регистраций

Данные с двух регистраторов получены в форме протоколов, электронных массивов, которые могут быть представлены в виде таблиц и графиков. Полученные приборами «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M» первичные протоколы регистраций довольно громоздки, имеют большой объем. Протоколы имеют только количественную характеристику, а для оценки качества электроэнергии в сети необходим более детальный анализ.

Трансформаторная подстанция ТП-92 имеет две системы шин, на которой установлены 28 ячеек и два силовых трансформатора ТМ-630/10/0,4 (рис. 4). Регистрация ПКЭ проводилась при помощи «Парма

ПК 3.01» и «Ресурс UF2M», на второй системе шин, поскольку она является более нагруженной и имеет наибольший интерес.

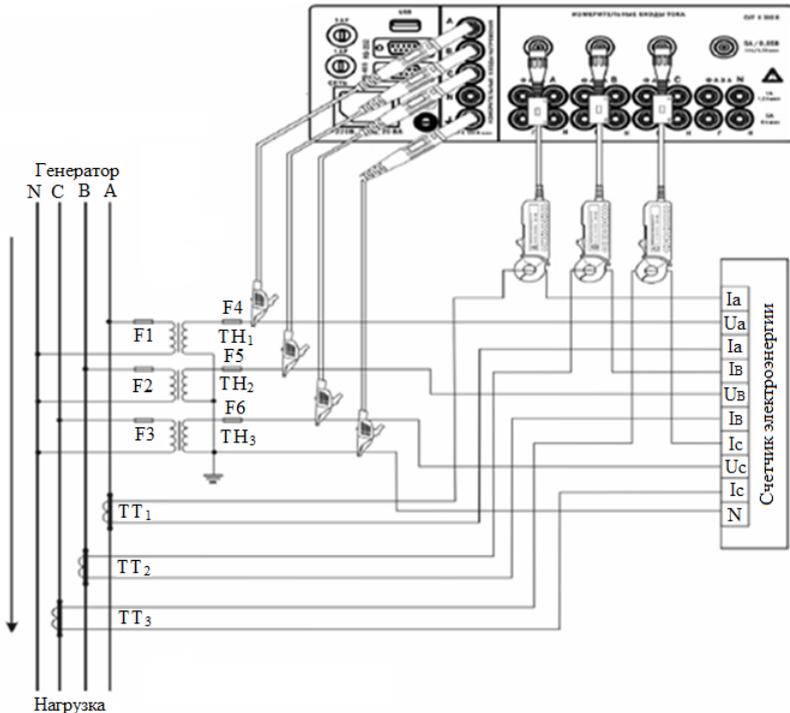


Рис. 3. Схема подключений к трехфазной трехпроводной сети с двумя ТН и двумя ТТ счетчика электрической энергии и измерителя «Ресурс UF2M»

Результаты регистрации отклонений уровня напряжения на ТП-92 (Т-2) сведены в табл. 2. Для наглядности приведем суточный график отклонения напряжения (рис. 5).

На шинах ТП-92 (Т-2) Пармой зарегистрированы отклонения уровня напряжения в среднем на 5,42 % (таблица 2), что выходит за НД значения. Длительность отклонений напряжений превышала нормально допустимые значения (более 5 % от установленного периода времени) и не превышала предельно допустимые нормативные требования стандарта. Среднее значение времени выхода составило 6,04 %, т.е. 1 ч. 27 мин. (табл. 2). Ресурс не зарегистрировал отклонений по данному значению.

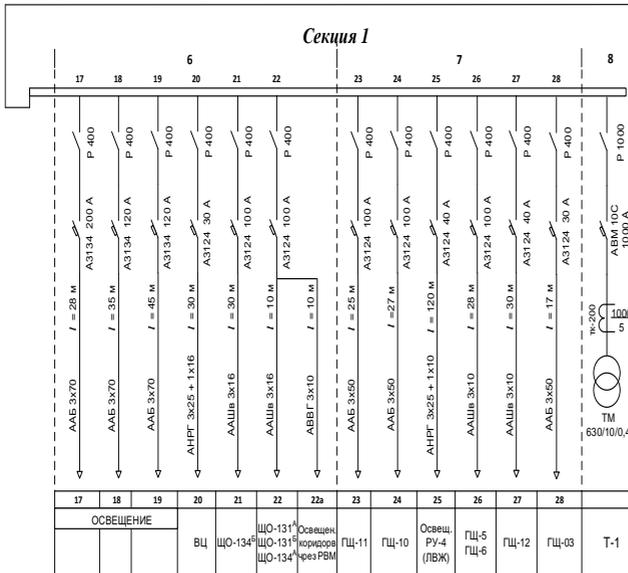
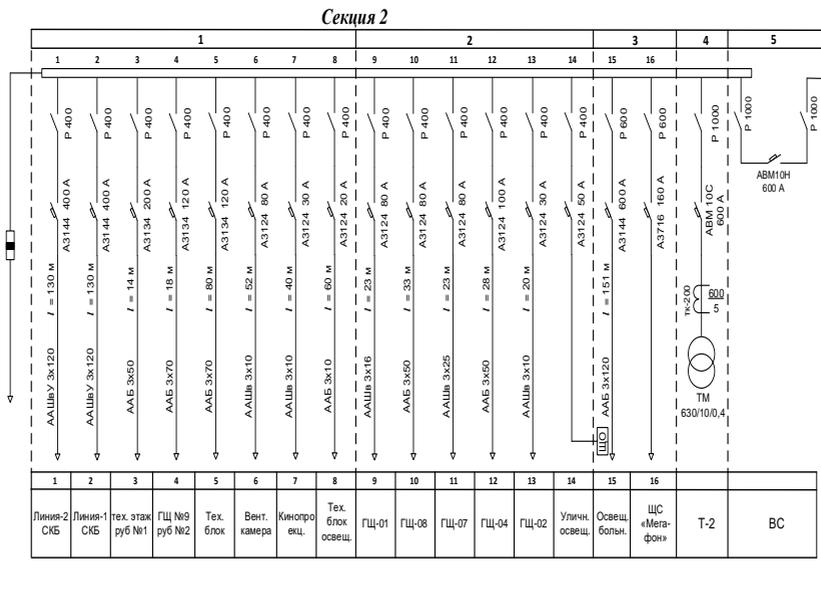


Рис. 4. Принципиальная схема ТП-92

Таблица 2
Установившееся напряжение

Показатель КЭ	Отклонение значения, %				Время выхода, %				Заключение			
	«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»	
	мин	макс	мин	макс	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД
δU	00,64	05,34	0,60	4,00	07,38	0	0	0	НС	С	С	С
U_{AB}	00,58	05,33	0,20	3,90	04,17	0	0	0	С	С	С	С
U_{BC}	00,33	05,15	0,20	3,80	03,45	0	0	0	С	С	С	С
U_{AC}	00,94	05,84	1,00	4,50	09,17	0	0	0	НС	С	С	С

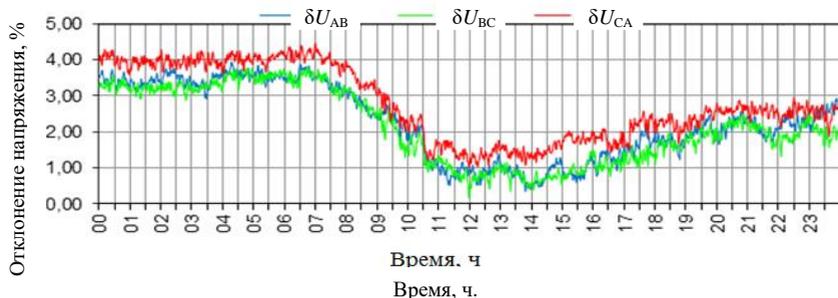


Рис. 5. Суточный график отклонений междуфазных напряжений (регистрация прибором «Ресурс UF2M»)

По гармоническому составу две гармоники (15 и 21) имели величину, превышающую нормативную. В табл. 3 фактические значения с регистраторов и сопоставлены с нормативными значениями для 15-й гармоники. На рис. 6 для наглядности показан суточный график отклонения 15-й гармонической составляющей.

Табл. 3
Отклонение 15-й гармонической составляющей

Параметры	Отклонения значений, %				Время выхода, %			
	«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»	
	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД	НД	ПД
Норматив	0,3	0,45	0,3	0,45	5	0	5	0
Максимальные величины	01,15		00,90		22,41	04,58	24,20	07,87

Время выхода у коэффициента 15-й гармонической составляющей за НД значения в среднем по двум приборам равнялось 23,3 %, а именно 5 ч. 36 минут, за ПД значения – 6,23 %, т.е. 1 ч. 30 мин.

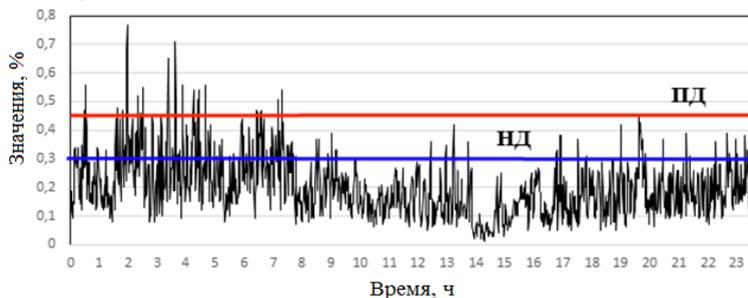


Рис. 6. Суточное отклонение 15-й гармонической составляющей.

В табл. 4 приведены фактические значения с регистраторов и сопоставлены с нормативными значениями для 21-й гармоники, а на рис. 7 для наглядности показан суточный график отклонения 21-й гармонической составляющей.

Таблица 4
Отклонение 21-ой гармонической составляющей

Параметры	Отклонения значений, %				Время выхода, %			
	«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»		«Парма РК 3.01»		«Ресурс UF2M»	
	НД	ПД	НД	ПД	норм	пред	норм	пред
Норматив	0,2	0,3	0,2	0,3	5	0	5	0
Максимальные величины	00,69		00,64		07,27	01,22	07,43	01,17

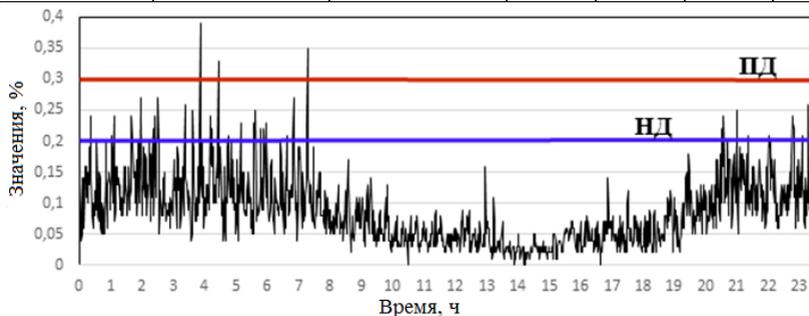


Рис. 7. Суточное отклонение 21-й гармонической составляющей

Время выхода у коэффициента 21-й гармонической составляющей в среднем по двум приборам за НД равнялось 7,35%, т.е. 1 час 46 мин, а за ПД значения составило 1,2%, т.е. 18 мин. Все остальные показатели оставались в пределах нормы. После сравнения ПКЭ зарегистрированных «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M» можно заметить, что показания данных приборов отличаются незначительно. Следует отметить, что превышения НД и ПД значения данных гармонических составляющих носит систематический характер (особенно для 21-й гармоники), со стабильным превышением с 21 часа до 8 часов утра. Это связано с тем, что во время рабочего дня в одной из лабораторий подключается установка, потребляющая данные гармонические искажения.

V. Заключение

По результатам синхронной регистрации одной системы шин подстанции ТП-92 была выявлена некоторая разница в измеряемых показателях между приборами «Парма РК 3.01» и «Ресурс UF2M». Так, «Парма РК 3.01» регистрировала время выхода напряжения за НД в 9,17%, а «Ресурс UF2M» не зафиксировал превышения напряжения за НД значения. При регистрации отклонения коэффициента 15-й и 21-й гармонической составляющей у приборов так же было замечено неравенство в показателях. Для 15-й гармонической составляющей «Парма РК 3.01» регистрировала отклонение равное 1,15%, а «Ресурс UF2M» – 0,9 %. В 21-й гармонической составляющей показатели приборов довольно близки: «Парма РК 3.01» «показала» отклонение равное 0,69 %, а «Ресурс UF2M» – 0,64 %. С одной стороны, расхождения не критичны, однако ставят под сомнение адекватность тех или иных приборов. Трансформаторная подстанция ТП-92 (Т-2), обследуемая двумя различными регистраторами, показала неудовлетворительные результаты по качеству электроэнергии. При этом была выполнена расшифровка, систематизация и анализ результатов мониторинговых регистраций [10]. Практика показывает, что проблема качества электроэнергии характерна как для промышленных, так и для городских сетей. В проведенном исследовании выполнены мероприятия по регистрации показателей КЭ, расшифровке данных регистраторов и дальнейшего их анализа. На примере действующей подстанции Кольской энергосистемы предложены возможные пути решения.

© Карпов А.С., 2018
© Ярошевич В.В., 2018

Библиографический список

- [1] ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 1999-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 35 с.

- [2] ГОСТ Р 51317.4.7-2008. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2010-01-01. М.: Стандартинформ, 2009. – 39 с.
- [3] ГОСТ Р 51317.4.30-2008. Методы измерения показателей качества электрической энергии. Введ. 2010-01-01. М.: Стандартинформ, 2009. – 60 с.
- [4] ГОСТ Р 53333-2008. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2009-07-01. М.: Стандартинформ, 2009. – 31 с.
- [5] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
- [6] РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. Введ. 2002-08-01. М.: Энергосервис, 2003. – 25 с.
- [7] Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Ярошевич В.В. Анализ регистрации показателей качества электроэнергии на шинах питающих подстанций // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. №1. С. 58-64.
- [8] Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Ярошевич В.В., Карпов А.С. Анализ результатов мониторинговой регистрации показателей качества электроэнергии // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. №1. С. 67-76.
- [9] Арефьева Ю.А., Веселов А.Е., Карпов А.С., Токарева Е.А., Фастий Г.П., Ярошевич В.В. Обзор электропотребления разветвленной электрической сети напряжением 10/0,4 кВ Кольского научного центра Российской академии наук // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2015. №2 (28). Вып. 10. С. 24-33.
- [10] Карпов А.С., Ярошевич В.В., М. Г. Юшков. Обоснование технического решения для разработки программно-аппаратного комплекса, способного локализовать источники искажения электроэнергии // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. №4 (19). С. 102-106.

A.S. Karpov, V.V. Yaroshevich

**VERIFICATION OF CERTIFIED POWER QUALITY
ANALYZERS AT REGISTRATION
ON OPERATING SUBSTATION**

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences

Abstract. For most electrical systems due to the presence of asymmetrical and non-linear loads, the issues of ensuring the required power quality parameters (PQP) are relevant. At the same time, the equipment, intended for the power quality (PQ) analysis, present in the electricity market differs in characteristics and accuracy criteria. The article is devoted to estimating the discrepancies between two PQ analyzers of different manufacturers for identical PQP. The estimation was carried out by means of synchronized PQ

measurements at the operating 10/0.4 kV substation. A four-wire network with a different type and asymmetrical phase load was chosen for the measurement. Comparison of PQ analyzers was carried out based on key indicators - voltage deviation, nonsinusoidal voltage (distortion factor of the sine wave of the voltage curve K_U , coefficient of the n -th harmonic component of the voltage $K_{U(n)}$), unbalance of voltages (unbalance factor of negative voltage sequence K_{2U} , unbalance factor of zero voltage sequence K_{0U}), frequency deviation Δf . It is established that there is a difference in the measured parameters of synchronous registration exceeding the permissible level of error between certified analyzers «Parma RC 3.01» and «Resource UF2M».

Keywords: electrical substation, electromagnetic compatibility, localization of distortion sources, measurement in operating high-voltage network, power quality, power quality analyzer, power quality meter, power quality parameters.

References

- [1] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems, GOST 13109-97, Jan. 1999.
- [2] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measuring instruments and measurement, for power supply systems and equipment connected thereto. IEC 61000-4-7: 2002 (MOD). GOST R 51347.4.7-2008, Jan. 2010.
- [3] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. IEC 61000-4-30: 2008 (MOD). GOST R 51317-4-30-2008, Jan. 2010.
- [4] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electric energy quality control in the public power supply systems. GOST R 53333-2008. July 2009.
- [5] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. GOST 32144-2013. July 2014.
- [6] Methodical instructions on control and analysis of electric power quality in power systems of general purpose. Analysis of quality of electrical energy. Part 2. RD 153-34.0-15.502-2002. Aug. 2002.
- [7] Yu.M. Nevretdinov, G.P. Fastiy and V.V. Yaroshevich. Analysis of electrical energy quality indexes registration on buses of supply substations // Vestnik of MSTU, vol 12, no. 1, pp. 58-64, 2009.
- [8] Yu.M. Nevretdinov, G.P. Fastiy, V.V. Yaroshevich and A.S. Karpov. Analysis of monitoring registration of electric power quality indices // Vestnik of MSTU, vol 17, no. 1, pp. 67-76, 2014.
- [9] U.A. Arefeva, A.E. Veselov, A.S. Karpov, E.A. Tokareva, G.P. Fastiy and V.V. Yaroshevich. Review on electricity consumption of 10/0.4 kV brached mains voltage of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences // Transactions Kola Science Centre. Energy technology, vol. 2, no. 29, series 10, pp. 24-33, 2015.
- [10] A. S. Karpov, V.V Yaroshevich and M.G. Yushkov. Substantiation of a technical solution for a firmware system capable to localize distortions sources for electric power // Herald of the Kola Science Centre of RAS, vol. 4, no. 19, pp. 102-106, 2014.

УДК 621.316.925

М.Д. Обалин¹, П.А. Колобанов²

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОДНОСТОРОННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

¹ Филиал АО «СО ЕЭС» – Нижегородское РДУ² ООО «ЭТС-Проект»

Причины нарушения нормальных режимов работы электротехнических систем, в большинстве случаев, связаны с повреждениями их составляющих, в частности, линий электропередачи. Для минимизации ущерба от нарушения электропитания необходимо быстро и точно определять места повреждения линий. В статье предложены принципы повышения точности одностороннего определения места повреждения (ОМП) в электрических сетях путем устранения методической погрешности расчета. Методическая погрешность ОМП характерна для сетевых районов со сложной конфигурацией и связана с трудностями получения точных аналитических формул. В работе приведена методика построения с помощью имитационной модели интеллектуального алгоритма ОМП для сети любой конфигурации. Основу формирования алгоритма составляет использование метода наложения и представления поврежденной линии как многополюсника в Y -параметрах. Особенностью алгоритма является возможность численного учета всех видов неоднородности электрической сети, что устраняет необходимость вывода отдельных аналитических выражений для каждого участка сети. При правильном вводе параметров сети ликвидируются методические погрешности, обусловленные вносимыми в расчет упрощениями. Таким образом, предложенный алгоритм ОМП способен адаптироваться к сети произвольной конфигурации.

Ключевые слова: интеллектуальная сеть, линии электропередачи, определение места повреждения.

1. Введение

Определение места повреждения (ОМП) на линиях электропередачи (ЛЭП) производится после отключения короткого замыкания (КЗ) для обеспечения ремонта поврежденного участка. Однако, любой алгоритм ОМП имеет погрешность, которая приводит к увеличению требуемой зоны обхода ЛЭП и увеличивает время, требуемое на ее ремонт. Широкое распространение получил дистанционный алгоритм с применением токов и напряжений промышленной частоты, представленный, например, в работах 2003 и 2010 гг. [1-5]. Классический дистанционный алгоритм ОМП ЛЭП [1, 2] с компенсацией влияния переходного сопротивления реализу-

ется по следующему выражению (на примере однофазного КЗ фазы A):

$$l = \frac{\operatorname{Im}(\underline{U}_a / \underline{I}_{\text{оп}})}{\operatorname{Im}((\underline{I}_a + K \cdot 3\underline{I}_0) \cdot \underline{Z}_{1\text{уд}} / \underline{I}_{\text{оп}})}, \quad (1)$$

$$K = \frac{\underline{Z}_{0\text{уд}} - \underline{Z}_{1\text{уд}}}{3 \cdot \underline{Z}_{1\text{уд}}}, \quad (2)$$

где \underline{U}_a , \underline{I}_a – фазное напряжение и ток в месте установки защиты, $\underline{I}_{\text{оп}}$ – опорный ток, используемый для определения фазы тока в месте повреждения, $\underline{Z}_{1\text{уд}}$, $\underline{Z}_{0\text{уд}}$ – удельное сопротивление линии прямой и нулевой последовательности соответственно.

Методическая погрешность ОМП обуславливается следующими причинами:

- непостоянство удельных сопротивлений линии $\underline{Z}_{1\text{уд}}$, $\underline{Z}_{0\text{уд}}$;
- отпайки на линии, к которым подключены отпаечные подстанции;
- взаимоиנדукции с другими линиями, в том числе не по всей длине;
- линии, которые взаимоиנדуктируют с рассматриваемой, но их токи и напряжения в момент аварии неизвестны;
- несимметрия сопротивлений ЛЭП.

Для учета вышеуказанных факторов используется итерационный алгоритм: линия разбивается на участки с одинаковыми удельными параметрами. Напряжения и токи при переходе с участка на участок пересчитываются по закону Ома.

Наибольшую техническую сложность представляет собой алгоритм пересчета токов и напряжений с участка на участок. Простым образом его можно реализовать только для одноцепной линии без взаимоиנדукций с другими. Для произвольной сети он может быть очень сложным, и на практике в него часто вводят технические упрощения, приводящие к методической погрешности ОМП.

В статье предлагается общий алгоритм, применимый к сети любой конфигурации.

II. Применение метода наложения

На примере однофазной сети, представленной на рис. 1, проиллюстрируем суть метода наложения [6].

Во-первых, рассчитывается доаварийный режим (рис. 1, а). Вместо предполагаемого КЗ включается фиктивная ветвь с ЭДС, равной доаварийному напряжению $U_{\text{доав}F}$. Если между точками сети, имеющими разность потенциалов $U_{\text{доав}F}$, включить источник ЭДС, равный $U_{\text{доав}F}$ по величине и направлению, то токораспределение в сети не изменится.

Во-вторых, рассчитывается послеаварийный режим (рис. 1, б). В

ней ветвь КЗ представляет собой закоротку.

В-третьих, из уравнений закона Кирхгофа для послеаварийной сети вычитаются почленно уравнения доаварийной сети. Это приводит к появлению так называемой «чисто аварийной схемы» (рис. 1, в).

Чисто аварийная схема содержит только одну ЭДС, в месте КЗ. Величина ее равна доаварийному напряжению в этой точке, взятому со знаком «минус». Такой подход справедлив, если принять, что ЭДС генераторов до и после КЗ в первый момент времени одинаковы.

Отношение токов в двух любых ветвях $\underline{KI}_{ij} = I_i / I_j$ называется коэффициентом токораспределения. В сети с одним источником ЭДС \underline{KI}_{ij} зависит только от сопротивлений сети и положения точки КЗ. Зависимость $\underline{KI}_{ij}(l)$ в общем случае – ломаная, без единого аналитического выражения. Целесообразно получение такой зависимости с использованием имитационной модели электрической сети. Для чисто аварийных напряжений можно ввести аналогичным образом коэффициент распределения напряжения \underline{KU}_{ij} . Также допустимо использовать коэффициент отношения чисто аварийного напряжения в произвольной точке сети к чисто аварийному току линии \underline{KZ}_{ij} .

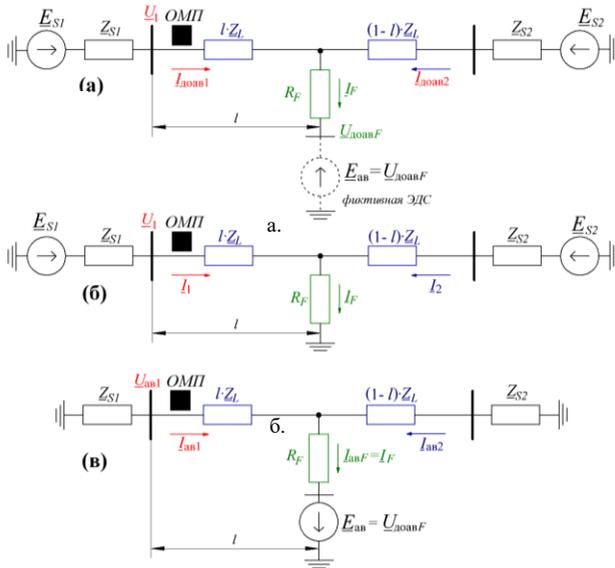


Рис. 1. Аварийная схема сети

С помощью данного подхода можно получить соотношение чисто аварийных токов и напряжений в любых двух ветвях схемы. Отметим, что чисто аварийные токи много больше доаварийных, поэтому данный подход позволяет оценить токи, в том числе, и в неконтролируемых контурах.

III. Обучение алгоритма ОМП на имитационных моделях сети

Для работы универсального алгоритма ОМП целесообразнее всего участок линии между точкой повреждения и местом установки защиты представить в виде многополюсника в Y -параметрах. Обучение алгоритма следует вести на имитационной модели сети. Целями экспериментов являются получение зависимостей от длины: Y -параметров сети; коэффициентов распределения чисто аварийных токов и напряжений.

На рис. 2 приведена схема замещения при одностороннем ОМП для n -проводной электрической сети. Отметим, что количество полюсов многополюсника четное.

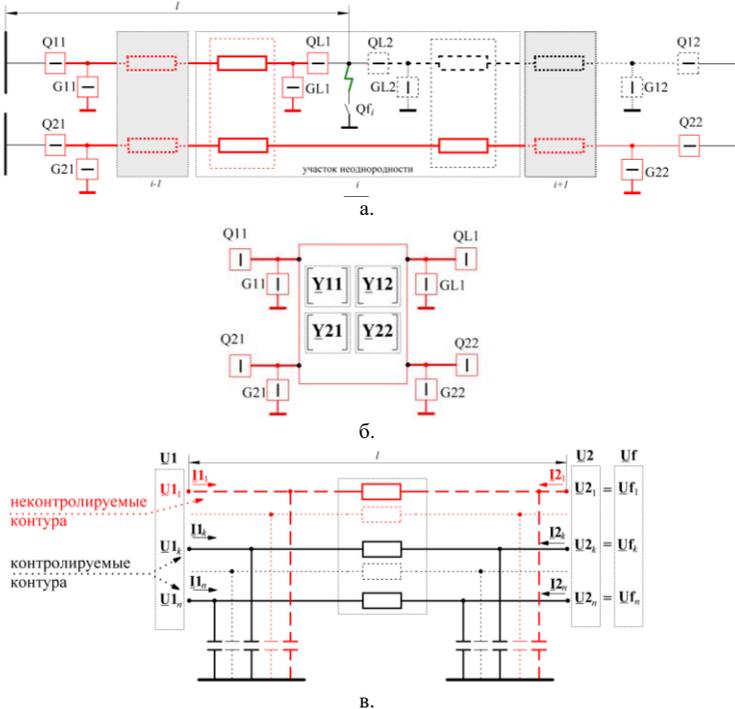


Рис. 2. Замер Y -параметров сети: линия, разбитая на участки (а); представление линии в виде многополюсника (б); модель участка сети в алгоритме ОМП (в)

Для определения \underline{Y} -параметров электрической сети наиболее простым образом, необходимо:

- заземлить все полюса, кроме одного (k -го). Тем самым все напряжения полюсов, кроме одного (\underline{U}_k), становятся равными нулю;
- через незаземленный полюс подать питание и измерить все выходные токи $I_1 \dots I_n$;
- определить коэффициенты k -го столбца по формуле

$$\underline{Y}_{ik} = \frac{I_i}{\underline{U}_k}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Полученные значения матрицы \underline{Y} для каждой точки защищаемой линии записываются в базу данных. При этом весь блок взаимноиндуцирующих параллельных линий делится на две половины. Каждая половина эквивалентуруется многополюсником в Y -параметрах. В ходе фиксации удельных параметров рассчитывается матрица $\underline{Y}(l)$ одной из половин блока для каждого значения расстояния до места повреждения l .

Коэффициенты токораспределения вычисляются для каждого вида КЗ и каждого сочетания поврежденных фаз отдельно. Результаты расчетов представляют собой зависимости $\underline{Y}(l)$, $\underline{Kf}(l)$, $\underline{KU}(l)$, $\underline{KI}(l)$ в виде массива точек. Для работы алгоритма по фиксации удельных параметров сети производится разметка имитационной модели. Каждая линия представляет собой массив участков неоднородности, выделенных с учетом непостоянства удельных сопротивлений, наличия отпаек, участков параллельности с другими линиями и т.п.

Каждый участок неоднородности внутри разделен на две половины, и имеет выключатель Qf , имитирующий короткое замыкание. В нормальном состоянии этот выключатель отключен, т.е. КЗ отсутствует. При задании места КЗ в имитационной модели происходит определение того, на каком участке (с порядковым номером i) находится место повреждения, и включение соответствующего Qf_i .

Перемещение точки КЗ вдоль участка производится пересчетом параметров левой и правой части участка неоднородности. При дальнейшем перемещении места замыкания отключается Qf_i и включается Qf_{i+1} . Преимущество указанного выше метода – возможность учета всех видов неоднородности сети численно, внутри имитационной модели. Это избавляет от необходимости выводить формулы пересчета аналитически для каждого участка неоднородности.

IV. Интеллектуальный алгоритм одностороннего ОМП

В соответствии с обозначениями на рис. 2, в, индекс 1 соответствует левой стороне многополюсника (где установлена защита), индекс 2 – точке КЗ. При коротком замыкании известными величинами являются массивы

напряжений $\underline{U1}$ и токов $\underline{I1}$ с одного конца многополюсника. Тогда появляется возможность вычислить параметр (обозначения в соответствии с рис. 2, в):

$$\underline{C}(l) = \underline{Y12}(l)^{-1} \cdot \underline{I1} - \underline{Y12}(l)^{-1} \cdot \underline{Y11}(l) \cdot \underline{U1} = \begin{bmatrix} \underline{C}(l)_1 \\ \dots \\ \underline{C}(l)_k \\ \dots \\ \underline{C}(l)_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Каждый элемент матрицы-столбца записывается как:

$$\underline{C}(l)_k \equiv \underbrace{\left\{ \underline{C}_k^{(1)} \quad \dots \quad \underline{C}_k^{(k)} \quad \dots \quad \underline{C}_k^{(m)} \right\}}_{m \text{ элементов}}, \quad (5)$$

соответствующей таблице длин:

$$l \equiv \underbrace{\left\{ l^{(1)} \quad \dots \quad l^{(k)} \quad \dots \quad l^{(m)} \right\}}_{m \text{ элементов}}. \quad (6)$$

Токи и напряжения в j -м неконтролируемом контуре пересчитываются через коэффициенты распределения $\underline{KU}(l)_j$, $\underline{KI}(l)_j$ с использованием токов и напряжений в k -м контролируемом контуре. Указанные коэффициенты также зависят от длины. Для контролируемых контуров все коэффициенты принимаются равными единице.

$$\underline{KU}(l)_j \equiv \left\{ \underline{KU}_j^{(1)} \quad \dots \quad \underline{KU}_j^{(k)} \quad \dots \quad \underline{KU}_j^{(m)} \right\}; \quad (7)$$

$$\underline{KI}(l)_j \equiv \left\{ \underline{KI}_j^{(1)} \quad \dots \quad \underline{KI}_j^{(k)} \quad \dots \quad \underline{KI}_j^{(m)} \right\}; \quad (8)$$

$$\underline{K}_T(l) \equiv \frac{\underline{I}f(l)}{\underline{I}_{\text{оп}}^{\text{аб}}(l)} \equiv \left\{ \underline{K}_T^{(1)} \quad \dots \quad \underline{K}_T^{(k)} \quad \dots \quad \underline{K}_T^{(m)} \right\}; \quad (9)$$

$$\underline{U}(l)_j \equiv \underline{U}_j^{\text{аб}} + \underline{U}_j^{\text{доав}} \equiv \underline{KU}(l)_j \cdot \underline{U}_k + \underline{U}_j^{\text{доав}}; \quad (10)$$

$$\underline{I}(l)_j \equiv \underline{I}_j^{\text{аб}} + \underline{I}_j^{\text{доав}} \equiv \underline{KI}(l)_j \cdot \underline{I}_k + \underline{I}_j^{\text{доав}}. \quad (11)$$

Доаварийный ток и напряжение $\underline{U}^{\text{доав}}$, $\underline{I}^{\text{доав}}$ приближенно задаются заблаговременно перед расчетом. Допустимо принять $\underline{I}^{\text{доав}} = 0$, $\underline{U}^{\text{доав}} = 0$ для заземленной по концам параллельной линии, $\underline{U}^{\text{доав}} = U_{\text{ном}}$ для прочих случаев.

Для определения места повреждения рассчитывается параметр (рис. 3, 4, табл. 1):

$$H(l) \equiv \left\{ \operatorname{Im} \left(\frac{C^{(1)}}{K_T^{(1)} \cdot I_{\text{оп}}^{\text{ав}}} \right) \dots \operatorname{Im} \left(\frac{C^{(k)}}{K_T^{(k)} \cdot I_{\text{оп}}^{\text{ав}}} \right) \dots \operatorname{Im} \left(\frac{C^{(m)}}{K_T^{(m)} \cdot I_{\text{оп}}^{\text{ав}}} \right) \right\}, \quad (12)$$

Определение места повреждения сводится к поиску такого расстояния l , для которого $H(l) = 0$ (рис. 3).

Данный поиск производится численно.

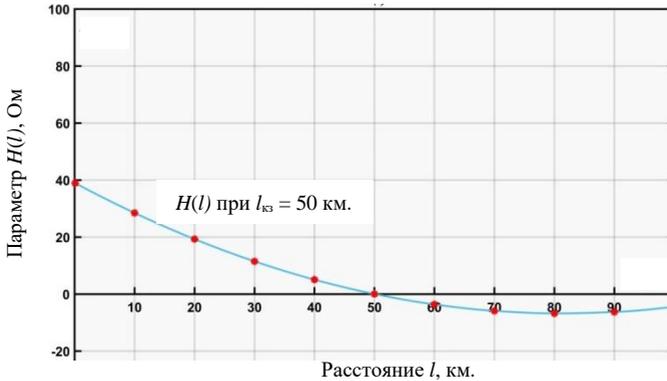


Рис. 3. Зависимость параметра $H(l)$ от расстояния до места повреждения

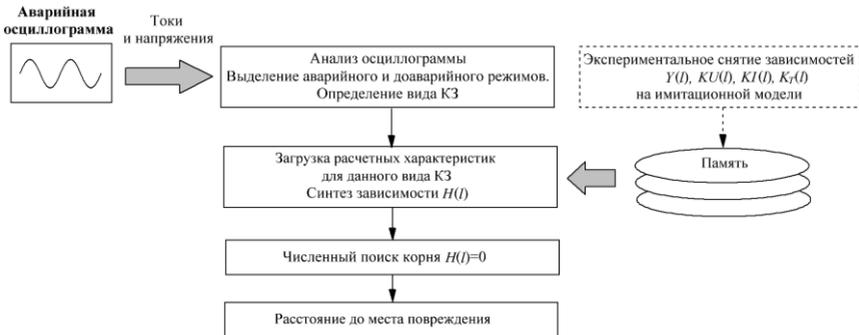


Рис. 4. Блок-схема интеллектуального алгоритма ОП

Указанный алгоритм при правильном вводе параметров сети ликвидирует все методические погрешности, обусловленные вносимыми в расчет упрощениями. Дальнейшее повышение точности ОП возможно путем более точного учета параметров участка сети, а также применением статистических алгоритмов [7, 8].

Таблица 1
Расчетные соотношения для однофазных и межфазных КЗ

Однофазное КЗ i -й фазы	КЗ между фазами i и j (двухфазное, трехфазное, двухфазное на землю)
$\underline{C} = \underline{C}_i; \quad \underline{I}_{\text{оп}} = I_i^{\text{аб}}; \quad \underline{K}_T = \frac{I_i^{\text{аб}}}{I_{f_i}}$	$\underline{C} = \underline{C}_i - \underline{C}_j; \quad \underline{I}_{\text{оп}} = I_i^{\text{аб}} - I_j^{\text{аб}}; \quad \underline{K}_T = \frac{I_i^{\text{аб}} - I_j^{\text{аб}}}{I_{f_i} - I_{f_j}}$

V. Выводы

1) Разработан интеллектуальный алгоритм одностороннего ОМП, способный адаптироваться к сети произвольной конфигурации. Основу формирования алгоритма составляет использование метода наложения и представления поврежденной линии как многополюсника в Y -параметрах.

2) Результаты имитационного моделирования показали, что методическая погрешность алгоритма ОМП составляет доли и единицы процентов от длины ЛЭП. При использовании алгоритма ОМП требуется внесение в память устройства параметров схемы замещения электрической сети.

© Обалин М.Д., 2018
© Колобанов П.А., 2018

Библиографический список

- [1] Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
- [2] Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: Учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001.
- [3] Лямец Ю.Я., Климатова И.С. Алгоритмическое моделирование в задаче определения места повреждения в линиях электропередачи // Вестник Чувашского университета. 2007. №2. С. 147-152.
- [4] Saha M.M., Izykowski J., Rosolowski E. Fault Location on Power Networks. Springer-Verlag London, 2010. – 425 с.
- [5] Устинов А.А., Висящев А.Н. Итерационные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима при односторонних измерениях на воздушных линиях электропередачи // Вестник ИрГТУ. 2010. №5(45). С.260-265.
- [6] Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
- [7] Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А. Комплексные алгоритмы ОМП ЛЭП на базе статистических методов // Энергетик. 2012. №1. С. 7-9.
- [8] Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов П.А. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. №5. С. 57-62.

P.A. Kolobanov ¹, M.D. Obalin ²

INTELLECTUAL SINGLE-ENDED ALGORITHM OF FAULT LOCATION ON POWER TRANSMISSION LINE

¹ ETS – Project Ltd

² The branch of JSC «System Operator of United Power System»
Nizhny Novgorod Regional Dispatching Office

Abstract. The reasons for the violation of electrical systems normal operation, in most cases, are related to damage to their components, in particular, power transmission lines. To minimize damage from power failure, it is necessary to quickly and accurately determine the fault location of the lines (FLL). In the article a problem of increasing accuracy level for single-ended fault location in electrical networks by elimination of methodological error was studied. The FLL methodological error is typical for regions with a complex configuration and is associated with difficulties in obtaining precise analytical formulas. In this paper described intelligent fault location algorithm with learning on imitation model that can be applied for any network topology. The basis of the algorithm is the use of the method of superposition and representation of a damaged line as a multiterminal network in the Y parameters. A feature of the algorithm is the ability to numerically take into account all types of heterogeneity of the electrical network, which eliminates the need for the conclusions of individual analytical expressions for each network segment. Methodical errors caused by the simplifications introduced into the calculation are eliminated if the network parameters are correctly entered. Thus, the proposed FLL algorithm is able to adapt to any network configuration.

Keywords: fault location, power transmission line, smart grid.

References

- [1] E.A. Arzhannikov, V.U. Lukoyanov and M. Sh. Misrihanov. Fault location on high-voltage power transmission line. Moscow: Energoatomizdat, 2003.
- [2] A.N. Visyashev. Devices and methods of fault location on power transmission lines: Tutorial. In 2 parts. P. 1. Irkutsk: ISTU, 2001.
- [3] Y.Ya. Liaymets and I.S. Klimatova. Algorhythmical modelling in task of fault location on power transmission line // Vestnik Chuvashskogo Universiteta, no. 2, pp. 147–152, 2007.
- [4] M.M. Saha, J. Izykowski and E. Rosolowski. Fault Location on Power Networks. Springer-Verlag London, 2010.
- [5] A.A. Ustinov and A.N. Visyashev. Iterative methods of fault location by one-sided parameters of fault state for overhead transmission lines // Proceedings of Irkutsk State Technical University, vol. 45, no. 5, pp. 260-265, 2010.
- [6] A.M. Fedoseev and M.A. Fedoseev, Relay protection of electrical power systems, 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1992.
- [7] A.L. Kulikov, M.D. Obalin and P.A. Kolobanov. Complex algorithms of fault location based on statistical methods // Energetik, no. 1, pp. 7-9, 2012.
- [8] A.L. Kulikov, M.D. Obalin and P.A. Kolobanov. Analysis and improving the accuracy of fault location on power transmission lines // Russian Electromechanics, no. 5, pp. 57-62, 2013.

УДК 621.3

А.А. Кралин¹, В.В. Гуляев², В.В. Еременко¹**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ Y/Y₀**¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²Волжский государственный университет водного транспорта

Современные электротехнические системы характеризуются несимметрией напряжения. Несимметрия отрицательно сказывается на работе электрооборудования и может, в том числе, привести к выходу из строя или сокращению срока службы трансформаторного оборудования. Актуальной задачей является исследование процессов, происходящих в трансформаторах при несимметричной нагрузке. В статье рассмотрены несимметричные режимы работы трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y₀. Представлены формулы, основанные на методе симметричных составляющих и позволяющие рассчитать несимметричные режимы работы трансформаторного оборудования при широком изменении параметров нагрузки. Проведенные расчеты показали, что при эксплуатации трансформаторов со схемой Y/Y₀ нарушение равенства фазных напряжений приводит к увеличению магнитного потока и перенасыщению одного из стержней. Из результатов расчета токов короткого замыкания установлено, что наибольшие значения имеют токи симметричного трехфазного короткого замыкания. Это необходимо учитывать при выборе устройств защиты трансформаторного оборудования.

Ключевые слова: метод симметричных составляющих, несимметричная нагрузка схемы замещения, несимметричный режим, трехфазный силовой трансформатор.

1. Введение

Совершенствование технологий регулирования параметров напряжения в трансформаторном оборудовании связано, в том числе, с использованием тиристорных переключающих устройств [1]. Переключение первичных обмоток с помощью полупроводниковых коммутаторов вызывает несимметрию напряжения, что может привести к выходу из строя или сокращению срока службы трансформаторного оборудования. Поэтому одной из актуальных задач является исследование несимметричных электромагнитных процессов со схемой соединения обмоток Y/Y₀ [2].

Трансформаторы желательно эксплуатировать при идеальной симметричной нагрузке [3, 4]. Однако, такая нагрузка в электрических системах практически не встречается, поскольку всегда имеются причины, вы-

зывающие несимметрию. Несимметрия возрастает с увеличением мощности однофазных потребителей, питающихся от трехфазных сетей, и получаются особенно большими в аварийных режимах [5]. Например, при двухфазных и однофазных коротких замыканиях, отключении одной из фаз линии передачи и т.п. Располагая математическим описанием процессов в трансформаторе при несимметричной нагрузке, можно дать оценку отклонений от симметрии, допустимым в эксплуатации [6]. Несимметричные явления в трансформаторах вызываются несимметрией нагрузки и несимметрией подведенных напряжений, что неблагоприятно сказывается на работе электропотребителей. Для самого трансформатора несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузки тиристорных ключей, отдельных обмоток, а также чрезмерных повышений фазных напряжений и насыщения магнитопровода трансформатора [7].

II. Материалы и методы

Трехфазные трансформаторы со схемами соединения обмоток Y/Y_0 обычно используются как трансформаторы понизительных подстанций небольшой мощности при питании трехфазных и однофазных потребителей и практически всегда работают с теми или иными режимами отклонениями от симметрии. Такая схема соединения обмоток применяется исключительно в трансформаторах с трехстержневым сердечником.

Метод симметричных составляющих является общим методом анализа несимметричных режимов. Согласно этому методу трехфазная несимметричная система напряжений разлагается на системы напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности [8-10]. Главным достоинством данного подхода является возможность использования схем замещения приведенного трансформатора для токов различных последовательностей и проведение расчетов с помощью аналитических формул.

Для токов прямой и обратной последовательностей применяется обычная T-образная схема замещения трансформатора. Для токов нулевой последовательности схема замещения представлена на рис. 1.

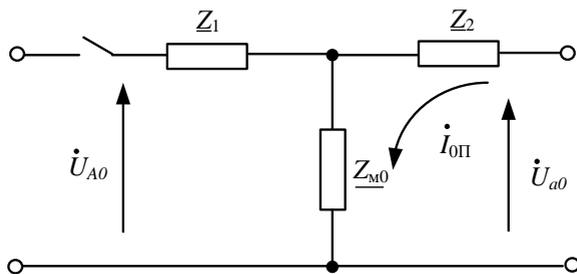


Рис. 1. Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности

Сопротивления \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 определяются полями рассеяния, сопротивление \underline{Z}_{m0} определяется основным магнитным потоком и для трехстержневого трансформатора составляет приблизительно $10 \cdot \underline{Z}_k$ [11], где \underline{Z}_k – сопротивление короткого замыкания. Ток нулевой последовательности может протекать только во вторичной обмотке и является чисто намагничивающим [10]. В схеме замещения это учитывается тем, что в первичном контуре есть разрыв.

В обмотке, соединенной в звезду, линейные и фазные напряжения связаны соотношениями:

$$\dot{U}'_A = \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{AB}}{3}; \quad (1)$$

$$\dot{U}'_B = \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}}{3}; \quad (2)$$

$$\dot{U}'_C = \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{CA}}{3}. \quad (3)$$

В этих выражениях $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ – фазные напряжения прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{U}'_A = \dot{i}_A \cdot (\underline{Z}_a + \underline{Z}_k) - \dot{i}_{0П} \cdot (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{0П}); \quad (4)$$

$$\dot{U}'_B = \dot{i}_B \cdot (\underline{Z}_b + \underline{Z}_k) - \dot{i}_{0П} \cdot (\underline{Z}_b + \underline{Z}_{0П}); \quad (5)$$

$$\dot{U}'_C = \dot{i}_C \cdot (\underline{Z}_c + \underline{Z}_k) - \dot{i}_{0П} \cdot (\underline{Z}_c + \underline{Z}_{0П}); \quad (6)$$

$$\dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C = 0, \quad (7)$$

где $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ – сопротивления фаз нагрузки, \underline{Z}_k – сопротивление короткого замыкания, $\dot{i}_{0П}$ – ток нулевой последовательности, $\underline{Z}_{0П} = \underline{Z}_{m0} + \underline{Z}_2$ – сопротивление нулевой последовательности.

Введем следующие обозначения $\underline{Z}_{AK} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_k$, $\underline{Z}_{BK} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_k$, $\underline{Z}_{CK} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_k$, $\underline{Z}_{a0} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_{0П}$, $\underline{Z}_{b0} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_{0П}$, $\underline{Z}_{c0} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_{0П}$. Тогда в матричной форме записи главный определитель системы:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{AK} & 0 & 0 & -\underline{Z}_{a0} \\ 0 & \underline{Z}_{BK} & 0 & -\underline{Z}_{b0} \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{CK} & -\underline{Z}_{c0} \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\Delta = \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{BK} \cdot \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{CK} \cdot \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_{BK} \cdot \underline{Z}_{CK} \cdot \underline{Z}_{a0}. \quad (9)$$

Решение системы (4-7) определит неизвестные токи. Определим ток нулевой последовательности:

$$\dot{i}_{0П} = \frac{\Delta_{0П}}{\Delta}, \quad (10)$$

где $\Delta_{0П}$ – дополнительный определитель:

$$\Delta_{0П} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{AK} & 0 & 0 & \dot{U}'_A \\ 0 & \underline{Z}_{BK} & 0 & \dot{U}'_B \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{CK} & \dot{U}'_C \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\Delta_{0П} = -\dot{U}'_A \cdot \underline{Z}_{BK} \cdot \underline{Z}_{CK} - \dot{U}'_B \cdot \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{CK} - \dot{U}'_C \cdot \underline{Z}_{AK} \cdot \underline{Z}_{BK}. \quad (12)$$

Соответствующие фазные токи:

$$\dot{i}_A = \frac{\dot{U}'_A - \dot{i}_{0П} \cdot \underline{Z}_{a0}}{\underline{Z}_{AK}}; \quad (13)$$

$$\dot{i}_B = \frac{\dot{U}'_B - \dot{i}_{0П} \cdot \underline{Z}_{b0}}{\underline{Z}_{BK}}; \quad (14)$$

$$\dot{i}_C = \frac{\dot{U}'_C - \dot{i}_{0П} \cdot \underline{Z}_{c0}}{\underline{Z}_{CK}}. \quad (15)$$

Ниже представленные выражения позволяют рассчитать несимметричные режимы работы трансформаторного оборудования при широком изменении параметров нагрузки при симметричном и несимметричном приложенном напряжении.

$$\dot{U}_a = \dot{U}'_A - \dot{i}_A \cdot \underline{Z}_k + \dot{i}_{0П} \cdot \underline{Z}_2; \quad (16)$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}'_B - \dot{i}_B \cdot \underline{Z}_k + \dot{i}_{0П} \cdot \underline{Z}_2; \quad (17)$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}'_C - \dot{i}_C \cdot \underline{Z}_k + \dot{i}_{0П} \cdot \underline{Z}_2. \quad (18)$$

III. Результаты исследования

Несимметрия напряжений в соответствии с ГОСТ на нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения характеризуется следующими показателями: коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности. Нормально

допустимые и предельно допустимые значения данных коэффициентов равны 2,0 и 4,0 % соответственно.

Трехмерный график зависимости коэффициента несимметрии по нулевой последовательности, представленный на рис. 2, иллюстрирует режимы несимметричной работы трансформатора ТМ 400/10 в широком диапазоне изменении нагрузок

Данный график построен при неизменном номинальном сопротивлении в фазе A $Z_a = Z_n$, диапазон изменения сопротивлений в фазах B и C от Z_n до $2 \cdot Z_n$, что соответствует 50 % нагрузке.

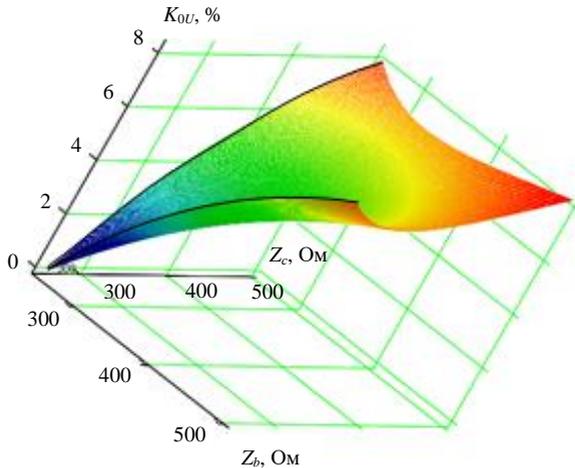


Рис. 2. Трехмерный график зависимость коэффициента несимметрии нулевой последовательности K_{0U} от сопротивлений фаз нагрузки

Из рис. 2 следует, что коэффициент несимметрии нулевой последовательности K_{0U} значительно возрастает при симметричном увеличении сопротивлений в фазах B и C .

В условиях эксплуатации трансформаторов со схемой Y/Y_0 при наличии токов нулевой последовательности нарушение равенства фазных напряжений вызывает увеличение магнитного потока и перенасыщение того стержня, в обмотках которого ЭДС основного поля и ЭДС нулевой последовательности наиболее близки друг к другу. Во избежание значительного неравенства фазных напряжений необходимо ограничивать нагрузку нулевого провода, не допуская значений выше 25 % номинального тока обмотки.

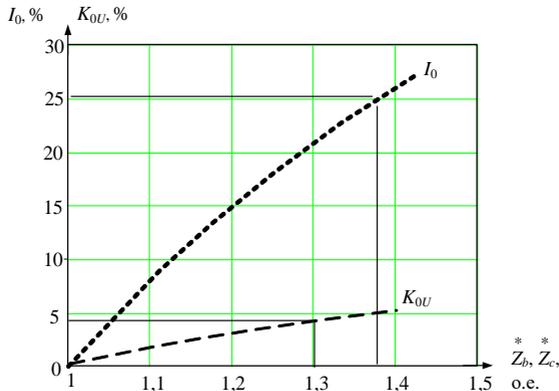


Рис.3. Кривые зависимости коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_{0U} и тока через нулевой провод I_0

IV. Заключение

В результате исследований установлено, что фазах B и C будет предельно допустимый коэффициент несимметрии нулевой последовательности $K_{0U} = 4\%$, при этом в фазе A нагрузка номинальная. Ток через нулевой провод достигает значения 25% от номинального фазного тока при нагрузках в фазах B и C составляющих 78% от номинальной, при этом в фазе A нагрузка номинальная.

В ходе расчетов определены токи короткого замыкания. Ток первичной обмотки поврежденной фазы A составляет $3,9 \cdot I_H$. Токи в фазах B и C равняются $1,36 \cdot I_H$ и $2,7 \cdot I_H$. При коротком замыкании в фазах A и B токи через тиристоры составят: в фазе A – $16,67 \cdot I_H$, в фазе B – $15,5 \cdot I_H$, в фазе C – $1,67 \cdot I_H$. При симметричном трехфазном коротком замыкании токи во всех фазах составляют $18,2 \cdot I_H$. Следовательно, при выборе устройств защиты трансформаторного оборудования необходимо отстраиваться от симметричного трехфазного короткого замыкания, при котором токи имеют наибольшие значения.

© Кралин А.А., 2018

© Гуляев В.В., 2018

© Еременко В.В., 2018

Библиографический список

- [1] Соснина Е.Н., Лоскутов А.Б., Дмитриев С.М., Чивенков А.И., Лоскутов А.А. Опытная цифровая трансформаторная подстанция с активно-адаптивной системой управления и автоматическим плавным регулированием напряжения и мощности // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 8-13.

- [2] Серебряков А.С., Осокин В.Л. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов при соединении обмоток по схеме $Y/Y - 0$ и $Y/Y_0 - 0$ // Вестник НГИЭИ. 2017. № 3 (70). С. 50-57.
- [3] Савельев А.А. Проблема несимметрии нагрузки в трехфазных распределительных электрических сетях 0,4 кВ и технические средства ее решения // Студенческая наука и XXI век. 2018. № 1 (16). С. 91-94.
- [4] Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
- [5] Шелехина Л.Ю., Ахтырская А.Ю. Влияние несимметрии токов и напряжений на работу электрооборудования // Россия в XXI веке: факторы и механизмы устойчивого развития: труды международной научно-практической конференции. 2016. С. 25-28.
- [6] Кралин А.А., Гуляев В.В., Лапаев Д.Н. Моделирование режимов параллельной работы трехфазных распределительных трансформаторов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник трудов научно-практической конференции. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. С. 201-206.
- [7] Кралин А.А. Алтунин Б.Ю., Гуляев В.В. Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2012. Вып. 32.
- [8] Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов // Электричество. 2003. № 9. С. 54-61.
- [9] Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов // Электричество. 2003. № 10. С.17-24.
- [10] Алтунин Б.Ю., Кралин А.А., Карнавский И.А. Исследование несимметричных режимов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 13-16.
- [11] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. 2-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 656 с.

A.A. Kralin¹, V.V. Gulyaev², V.V. Eremenko¹

INVESTIGATION OF ASYMMETRIC OPERATING MODES OF THREE-PHASE TRANSFORMERS WITH Y/Y₀ WINDING CONNECTION

¹ Nizhy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev,

² Volga State University of Water Transport

Abstract. Modern electrical systems are characterized by voltage asymmetry. Asymmetry adversely affects the operation of electrical equipment, including can lead to failure or shorten the life of transformer equipment. Investigation of the processes occurring in transformers with an asymmetric load is an urgent task. The paper considers asymmetric operating modes of a three-phase transformer with a Y/Y₀ winding connection scheme. The formulas based on the method of symmetric components are presented.

Formulas allow one to calculate the asymmetric operating modes of transformer equipment with a wide variation in the load parameters. The performed calculations showed that a violation of the equality of phase voltages leads to an increase in the magnetic flux and supersaturation of one of the limbs in transformers with a Y/Y_0 connection. From the results of short-circuit currents calculation, it is established that the currents of a symmetrical three-phase short circuit have the greatest values. This must be taken into account when choosing transformer protection equipment.

Keywords: asymmetric mode, asymmetric load of the equivalent circuit, method of symmetric components, three-phase power transformer.

References

- [1] E.N. Sosnina, A.B. Loskutov, S.M. Dmitriev, A.I. Chivenkov and A.A. Loskutov. Experimental digital transformer substation with an actively adaptive control system and automatic smooth regulation of voltage and power // *Industrial Power Engineering*, no. 12, pp. 8-13, Dec. 2013.
- [2] A.S. Serebryakov and V.L. Osokin. Unbalanced load of three-phase transformers at connection of windings according to the scheme Y/Y_0 and Y/Y_0-0 // *Herald NGIEI*, no. 3 (70), pp. 50-57, March 2017.
- [3] A.A. Saveliev. The problem of load asymmetry in three-phase distribution electrical networks of 0,4 kV and technical means of its solution // *Student science and the XXI century*, no. 1 (16), pp. 91-94, 2018.
- [4] S.D. Lizunov and A.K. Lohanin, *Power transformers. The reference book*. Moscow: Energoizdat, 2004.
- [5] L.Yu. Shelekhina and A.Yu. Akhtyrskaya. Influence of unbalance of currents and voltages on the operation of electrical equipment // In proc. Intern. scient.-pract. conf. Russia in the XXI century: factors and mechanisms of sustainable development, 2016, pp. 25-28.
- [6] A.A. Kralin, V.V. Gulyaev and D.N. Lapaev. Simulation of modes of parallel operation of three-phase distribution transformers // in proc. All-Russian Conf. Actual problems of power engineering, 2014, pp. 201-206.
- [7] A.A. Kralin, B.Yu. Altunin and V.V. Gulyaev. Investigation of operating modes of a nonlinear three-phase transformer in the Simulink package // *Vestnik of the Volga State Academy of Water Transport*, vol. 32, 2012.
- [8] V.A. Martynov. Calculation of incomplete-phase operating conditions of three-phase transformers. Part I // *Electricity*, no. 9, pp. 54-61, Oct. 2003.
- [9] V.A. Martynov. Calculation of incomplete-phase operating conditions of three-phase transformers. Part II // *Electricity*, no. 10, pp. 17-24, Nov. 2003.
- [10] B.Yu. Altunin, A.A. Kralin and I.A. Karnavsky. Study of asymmetric operation modes of a transformer-thyristor voltage and power regulator // *Industrial Power Engineering*, no. 12, pp. 13-16, Dec. 2013.
- [11] A.V. Ivanov-Smolensky. *Electric cars*. Volume 1: 2 ed. Moscow: MPEI, 2004.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 628.517.2

А.С. Плехов ¹, Д.Ю. Титов ¹,
Ю.В. Шевырев ², Н.Ю. Шевырева ³

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СЛАБЫХ СЕТЕЙ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

¹ Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

² Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

³ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина

На показатели качества электроэнергии в электротехнических системах существенное отрицательное влияние оказывает входящее в состав систем преобразовательное оборудование. Одним из наиболее распространенных типов преобразователей являются выпрямители. Статья посвящена вопросам влияния активных выпрямителей напряжения на показатели качества электроэнергии и величину реактивной мощности в «слабой» сети электроснабжения. Выполнены измерения и проведен анализ показателей качества электроэнергии в нефтепромысловых электрических сетях с долей частотно-регулируемых приводов около 80 % от мощности всех потребителей. Установлено превышение допустимого уровня нелинейных искажений формы напряжения, что делает обоснованным применение преобразователей частоты с активным выпрямителем для улучшения качества электроэнергии в таких сетях. Разработана математическая модель системы управления активного выпрямителя напряжения. Синтез регуляторов системы управления выполнен на основе принципов подчиненного регулирования с учетом компенсации влияния перекрестных связей и возмущающих воздействий. Показана эффективность применения отрицательной обратной связи по величине реактивной мощности и по напряжению в системе управления активного выпрямителя напряжения.

Ключевые слова: активные выпрямители напряжения, показатели качества электроэнергии, реактивная мощность, частотно-регулируемый привод.

1. Введение

Распространенным типом преобразователей, оказывающих существенное влияние на показатели качества электроэнергии систем электроснабжения, являются выпрямители.

Несомненные достоинства частотно-регулируемого асинхронного электропривода привели к массовому применению на горных и металлургических предприятиях полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока. Для добычи нефти широко применяются доказавшие свою высокую эффективность установки центробежных электронасосов (УЦЭН) с частотно-регулируемым приводом (ЧРП). В то же время преобразователь частоты, являясь нелинейной нагрузкой, ухудшает качество электроэнергии в нефтепромысловых электрических сетях и вызывает искажение синусоидальной формы напряжения питания УЦЭН.

II. Анализ качества электрической энергии в нефтепромысловой сети

В работе Б.И. Абрамова приведены результаты измерений и анализа показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на Приобском месторождении ООО «РН-Юганскнефтегаз», выполненные сотрудниками ООО «Электротехническая промышленная компания» (г. Москва) [1]. Объектом исследования был участок распределительной сети 35 кВ с центром питания – подстанция 110/35кВ «Озерная». Доля ЧРП на данном месторождении составляет примерно 80% от мощности всех потребителей.

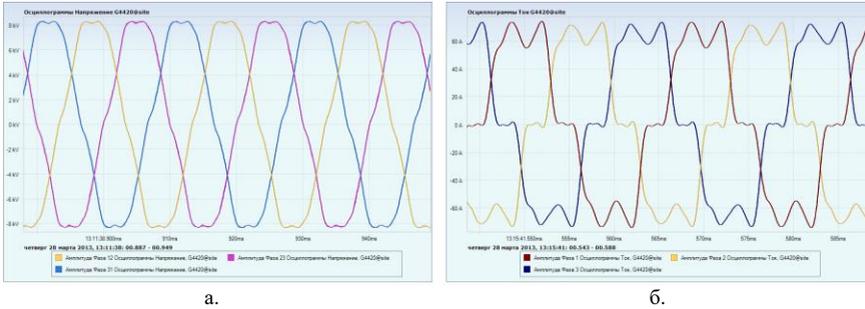
Питание кустов скважин осуществляется по трем двухцепным воздушным линиям 35 кВ: «Дружная», «Талая» и «Вербная». На кустовых площадках установлены понижающие подстанции (ПС) 35/6 кВ, от которых по линиям 6 кВ получают питание комплектные трансформаторные подстанции (КТП) – 6/0,4 кВ. От распределительных устройств низкого напряжения (РУНН) 0,4 кВ этих КТП осуществляется распределение электрической энергии непосредственно к насосным установкам УЦЭН.

В качестве примера на рис. 1 показаны формы напряжения на сборных шинах 6 кВ и тока на вводе РУ-6 кВ. Из графиков видно, что формы напряжений и токов на вводах РУ-6 кВ существенно искажены.

Исследования показали, что в спектре напряжения и тока в сетях 6 кВ ярко выражены 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники, а также нечетные гармоники более высокого порядка, что характерно для нелинейной нагрузки в виде станций управления с частотным преобразователем.

Проведенный анализ показателей качества электрической энергии в нефтепромысловой сети позволяют сделать следующие выводы.

1. Частотные приводы УЦЭН являются причиной возникновения искажений синусоидальности кривых тока и напряжения в сети.



а.

б.

Рис. 1. Формы напряжения и тока:

напряжения на сборных шинах 6 кВ (а); тока на вводе РУ – 6 кВ (б)

2. В спектре кривых напряжения и тока наиболее ярко выражены 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники, что характерно для преобразователей частоты с неуправляемым шести-пульсным выпрямителем во входной цепи.

3. Уровень нелинейных искажений формы напряжения на сборных шинах 6 кВ подстанций 35/6 кВ превышал нормально допустимый по ГОСТ 32144-2013.

Допустимый уровень высших гармоник в напряжении сети может быть обеспечен без дополнительных средств повышения качества электроэнергии, если отношение мощности короткого замыкания сети $S_{кз}$ в узле подключения преобразователя к его полной мощности $S_{ТП}$, в зависимости от пульсности преобразователя, равно или больше значений, указанных в табл. 1. Если отношение $S_{кз}/S_{ТП}$ меньше указанных в табл. 1, то необходимо применение дополнительных средств повышения качества электроэнергии [2].

Таблица 1

Предельные значения отношения $S_{кз}/S_{ТП}$

Пульсность схемы	$S_{кз}/S_{ТП}$
6	90
12	65
24	38
32	15

III. Преобразователи частоты с активным выпрямителем

Современным способом улучшения качества электроэнергии при работе частотно-регулируемого электропривода переменного тока является применение преобразователей частоты с активным выпрямителем [3, 4]. Под активным выпрямителем напряжения (АВН) понимается выпрямитель на полностью управляемых полупроводниковых приборах (например, си-

ловые транзисторы), работающих в релейном режиме или в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это даёт возможность обеспечить требуемые значения таких ПКЭ, как отклонение напряжения на вводе электротехнического комплекса и коэффициент искажения синусоидальной формы напряжения сети, получить коэффициент мощности, равный единице. Требуемые ПКЭ обеспечиваются за счёт алгоритмов управления полупроводниковыми приборами в релейном режиме или режиме ШИМ.

АВН позволяют реализовать двухсторонний обмен энергией с питающей сетью и тем самым улучшить энергетические показатели электропривода, обеспечить практически синусоидальный сетевой ток, плавно регулировать коэффициент мощности. При управлении преобразователем частоты используется прямое микропроцессорное управление. Поэтому усложнение системы управления преобразователем частоты с АВН будет касаться только программного обеспечения.

В основу математической модели системы автоматического регулирования (САР) АВН положена векторная САР, предложенная в работах А.Б. Виноградова, Р.Т. Шрейнера, А.А. Ефимова [5, 6]. Система управления реализована в синхронной ортогональной системе координат (x, y) , ориентированной по вектору напряжения сети \vec{U} , что позволяет раздельно управлять активной i_x и реактивной i_y составляющими вектора входного тока выпрямителя \vec{I} [5].

На рис. 2 показано разложение вектора входного тока выпрямителя \vec{I} на составляющие в системе координат (x, y) , ориентированной по вектору напряжения сети \vec{U} , где ω_u – угловая частота напряжения сети; φ_u – угол поворота вектора напряжения питающей сети в неподвижной системе координат А, В, С [5].

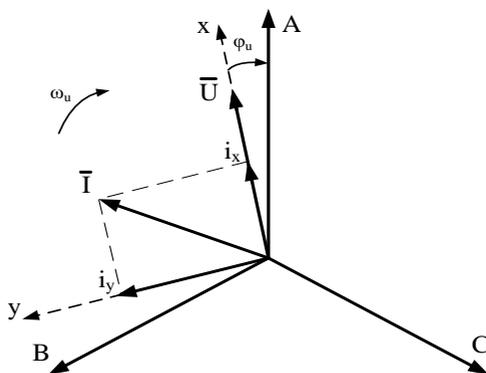


Рис. 2. Разложение вектора тока \vec{I} на составляющие в осях x, y

При ориентации вращающейся системы координат по вектору напряжения питающей сети \vec{U} :

$$u_x = U; \quad u_y = 0, \quad (1)$$

где U – модуль вектора напряжения питающей сети.

Функциональная схема векторной САП АВН представлена на рис. 3 [5, 6].

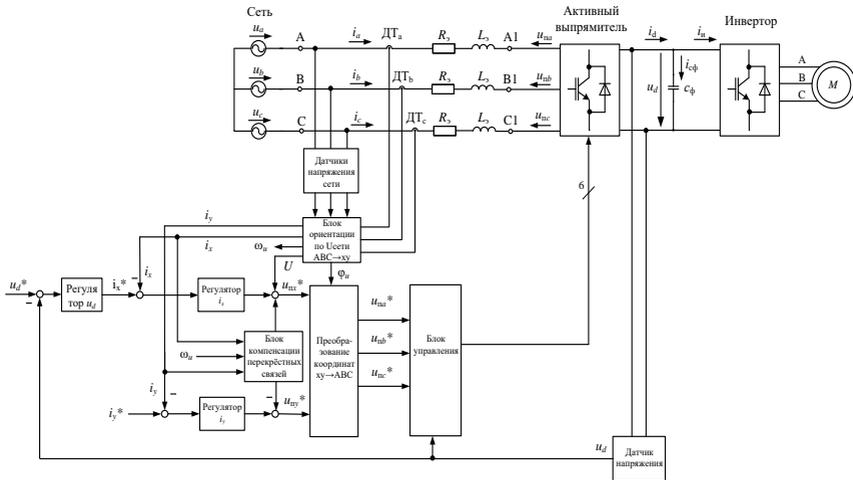


Рис. 3. Функциональная схема векторной САП АВН

Блок «Блок ориентации по $U_{\text{сети}} ABC \rightarrow xy$ » выполняет вычисление параметров сетевого напряжения U , ω_u по результатам измерения мгновенных значений напряжений в фазах сети, а также осуществляет преобразование входных токов в координатную систему (x, y) , ориентированную по вектору сетевого напряжения \vec{U} .

Блок компенсации перекрестных связей компенсирует взаимное влияние активной i_x и реактивной i_y , составляющих вектора входного тока выпрямителя \vec{I} . Блок «Преобразование координат $xy \rightarrow ABC$ » выполняет преобразование заданных напряжений выпрямителя из синхронной системы координат (x, y) в трехфазную систему координат (A, B, C) .

Векторная САП содержит одноконтурную САП реактивного тока i_y и двухконтурную САП выпрямленного напряжения АВН U_d , внутренним контуром которой является контур регулирования активного тока i_x . Для уменьшения ошибки регулирования, вызванной изменением напряжения сети U , по нему как по возмущающему воздействию вводится коррекция.

Сигналы рассогласований между заданными (i_x^* , i_y^*) и фактически (i_x , i_y) значениями преобразованных токов поступают на вход пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов токов. Выходные сигналы регуляторов тока после дополнения сигналами компенсирующих связей поступают на входы преобразователя координат вектора управляющих напряжений $xу \rightarrow ABC$. После преобразования координат формируются управляющие воздействия una^* , unb^* и unc^* , поступающие на блок управления АВН. Регулирование коэффициента мощности преобразователя осуществляется путём задания реактивной составляющей входного тока i_y^* . При $i_y^* = 0$ реактивная мощность выпрямителя равна нулю.

IV. Эквивалентная модель АВН

Синтез регуляторов системы векторного управления АВН выполняется на основе принципов подчиненного регулирования с учетом компенсации влияния перекрестных связей и возмущающих воздействий [5, 6].

Учитывая высокую частоту коммутации ключей в режиме ШИМ, при синтезе системы автоматического управления АВН используется его более простая эквивалентная непрерывная модель [5].

Эквивалентную непрерывную модель АВН удобно представить в системе координат (x, y) , ориентированной по вектору напряжения сети \vec{U} . В этом случае уравнения непрерывной модели АВН имеют следующий вид:

$$u_x = U = u_{nx} + R_s \cdot i_x + L_s \cdot \frac{di_x}{dt} - \omega_u \cdot L_s \cdot i_y \quad (2)$$

$$u_y = 0 = u_{ny} + R_s \cdot i_y + L_s \cdot \frac{di_y}{dt} + \omega_u \cdot L_s \cdot i_x \quad (3)$$

$$f_{nx} = \frac{u_{nx}^*}{2 \cdot U_0}; \quad (4)$$

$$f_{ny} = \frac{u_{ny}^*}{2 \cdot U_0}; \quad (5)$$

$$u_{nx} = f_{nx} \cdot u_d; \quad (6)$$

$$u_{ny} = f_{ny} \cdot u_d; \quad (7)$$

$$i_d = \frac{3}{2} (f_{nx} \cdot i_x + f_{ny} \cdot i_y); \quad (8)$$

$$i_d - i_n = C \frac{du_d}{dt}; \quad (9)$$

$$\omega_u = \frac{d\Theta_u}{dt}, \quad (10)$$

где L_3 – эквивалентная индуктивность, равная сумме индуктивностей на стороне переменного тока между АВН и напряжением сети, по вектору которого ориентируется вектор входного тока АВН \vec{I} ;

R_3 – эквивалентное активное сопротивление, равное сумме активных сопротивлений на стороне переменного тока между АВН и напряжением сети, по вектору которого ориентируется вектор входного тока АВН \vec{I} ;

U_0 – амплитуда несущего сигнала ШИМ в схеме управления;

$f_{пх}, f_{пу}$ – представление в эквивалентной непрерывной модели АВН по осям x, y дискретной вектор – функции, описывающей управляющие сигналы и состояния полупроводниковых ключей АВН.

Эквивалентная индуктивность L_3 равна:

$$L_3 = L_{23} + L_{л} + L_{р}, \quad (11)$$

где L_{23} – эквивалентная индуктивность трансформатора, приведённая к вентильной обмотке трансформатора;

$L_{л} = L_{л6} + L_{с3}$ – индуктивность системы электроснабжения при питании от линии 6 кВ (при питании от синхронного генератора (СГ) – индуктивность СГ), приведённая к вентильной обмотке трансформатора;

$L_{л6}$ – индуктивность линии 6 кВ;

$L_{с3}$ – индуктивность элементов системы электроснабжения от центральной понизительной подстанции (ЦПП) 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6кВ;

$L_{р}$ – индуктивность сетевого (буферного) реактора.

Эквивалентное активное сопротивление R_3 , равно:

$$R_3 = R_{23} + R_{л} + R_{р}, \quad (12)$$

R_{23} – эквивалентное активное сопротивление трансформатора, приведённое к вентильной обмотке трансформатора;

$R_{л} = R_{л6} + R_{с3}$ – активное сопротивление системы электроснабжения при питании от линии 6 кВ (при питании от СГ – активное сопротивление СГ), приведённое к вентильной обмотке трансформатора;

$R_{л6}$ – активное сопротивление линии 6 кВ;

$R_{с3}$ – активное сопротивление элементов системы электроснабжения от ЦПП 110/35/6 кВ до линии электропередачи 6 кВ;

$R_{р}$ – активное сопротивление сетевого (буферного) реактора.

Уравнения непрерывной аппроксимации справедливы при условии, отмеченном А.Б. Виноградовым [5]:

$$|u_{nj}^*| \leq U_0; \quad j = a, b, c. \quad (13)$$

В этом случае насыщение узла ШИМ отсутствует. Поэтому ни один из фазных широтно-импульсных модуляторов не потеряет управляемости.

Коэффициент мощности АВН определяется формулой:

$$\cos \varphi = \frac{i_x}{\sqrt{i_x^2 + i_y^2}}. \quad (14)$$

Для получения $\cos \varphi = 1$ необходимо получить с помощью системы регулирования величину $i_y = 0$.

При постоянном значении реактивного тока АВН напряжение и реактивная мощность на вводе 6 кВ БУ зависят от длины питающей линии и нагрузки электроприводов. Для поддержания заданного значения напряжения независимо от длины питающей линии 6 кВ и нагрузки электроприводов необходимо его автоматическое регулирование. Оно возможно при помощи отрицательной обратной связи (о.о.с.) по напряжению на вводе 6 кВ БУ и на стороне высокого напряжения преобразовательного трансформатора T . Аналогично, для обеспечения постоянства Q независимо от длины питающей линии 6 кВ и нагрузки электроприводов необходимо её автоматическое регулирование при помощи о.о.с. по реактивной мощности на вводе 6 кВ БУ.

В. Результаты исследований

Ниже приведены результаты исследований АВН с о.о.с. по напряжению и о.о.с. по реактивной мощности [7]. Сигнал задания по напряжению равен 6000 В, по реактивной мощности – 0 квар. Длина линии увеличивается от 1 до 9 км включительно. Несущая частота ШИМ $f_{\text{нес ШИМ}} = 2400$ Гц. На стороне переменного напряжения АВН включён фильтр.

На рис. 4, а приведена зависимость Q от длины линии. Из графиков следует, что кривая Q при регулировании по напряжению плавно снижается от плюс 875 до минус 1160 квар. При длине линии примерно 3 км происходит перекомпенсация Q . При регулировании по реактивной мощности её значение неизменно при увеличении длины линии и равно заданному значению 0 квар. На рис. 4, б приведена зависимость $\cos \varphi$ от длины линии. Из графиков следует, что кривая $\cos \varphi$ при регулировании. По напряжению сначала возрастает от 0,93 до 1 при изменении длины линии от 1 до 3 км, затем при изменении длины линии от 3 до 9 км снижается от 1 до 0,885. Это связано с тем, что при длине линии примерно 3 км происходит перекомпенсация Q и изменение её знака. При регулировании по реактивной мощности $\cos \varphi$ не изменяется и равен 1 при изменении длины линии.

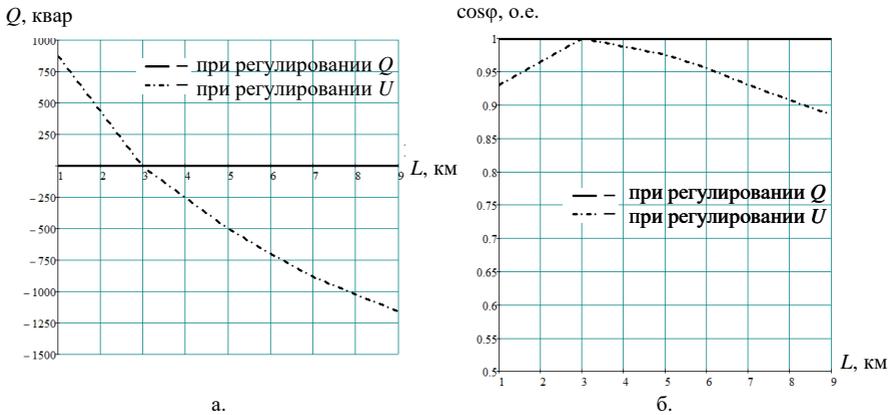


Рис. 4. Графики реактивной мощности (а) и коэффициента мощности (б) в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

На рис. 5, а приведена зависимость δU от длины линии. Из графиков следует, что кривая при регулировании по напряжению изменяется в пределах от минус 0,7 до 0,5 %, т.е. практически постоянна. При регулировании по Q график меняется в пределах от 2,3 до минус 12,5 % при увеличении длины линии от 1 до 9 км включительно. При длине линии равной 3 км δU становится отрицательным. На рис. 5, б приведена зависимость коэффициента K_U от длины линии. Из графиков следует, что кривая при регулировании по напряжению изменяется в пределах от 1,5 до 2,5 %. При регулировании по реактивной мощности кривая изменяется в пределах от 2 до 3 % при увеличении длины линии от 1 до 9 км включительно.

VI. Заключение

Анализ полученных результатов исследования влияния АВН на величину реактивной мощности и ПКЭ позволяет сделать следующие выводы. Применение АВН позволяет получить коэффициент K_U меньше 5 % при изменении длины линии от одного до девяти километров независимо от вида обратной связи.

Применение о.о.с. по Q в системе управления АВН позволяет получить коэффициент мощности равным 1, а реактивную мощность равную нулю при изменении длины линии от 1 до 9 км.

Применение о.о.с. по U в системе управления АВН позволяет получить отклонение напряжения при изменении длины линии от 1 до 9 км в пределах от 1,5 до 2,5 %, что меньше нормативного значения 10 %.

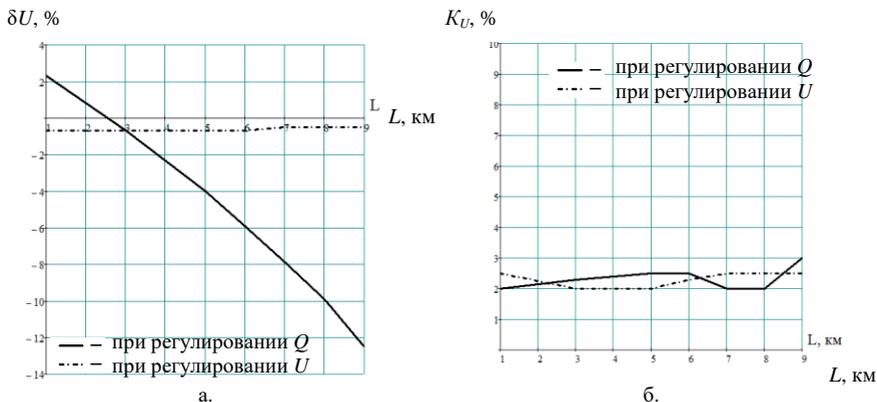


Рис. 5. Графики отклонения напряжения электропитания (а) и коэффициента K_U (б) в зависимости от длины линии при регулировании по Q и U

© Плехов А.С., 2018
 © Титов Д.Ю., 2018
 © Шевырев Ю.В., 2018
 © Шевырева Н.Ю., 2018

Библиографический список

- [1] Абрамов Б.И. Инструментальные исследования качества электроэнергии на нефтепромыслах в условиях широкого применения частотно-регулируемых приводов // Нефтяное хозяйство. 2016. №1. С. 90-92.
- [2] Добрусин Л.А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 84 с.
- [3] Козярук А.Е. Технично-экономические показатели ЭЭС горных машин при использовании преобразователей частоты с активным выпрямителем // Электросила, Приложение к сборнику № 42, 2003. С. 57-64.
- [4] Шевырёва Н.Ю. Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем // Главный энергетик. 2015. № 8. С.69-74.
- [5] Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
- [6] Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты // Электричество. 2000. № 3. С. 46-54.
- [7] Шевырева, Н.Ю. Закономерности влияния частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем на качество электроэнергии // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2015. № 4. С. 26-35.

A.S. Plekhov ¹, D.Yu. Titov ¹,
Yu.V. Shevyrev ², N.Yu. Shevyreva ³

POWER QUALITY MANAGEMENT OF WEAKNESS NETWORKS BY ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER

¹ Nizhy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

² National University of Science and Technology «MISiS»

³ National University of Oil and Gas «Gubkin University»

Abstract. The conversion equipment of electrical systems has a significant negative impact on power quality parameters. One of the most common types of converters is rectifiers. The article is devoted to the impact of an active voltage rectifiers on the power quality parameters and the reactive power value in a «weak» power supply network. Measurements and the analysis of power quality parameters have been conducted in oil-field electrical networks with a share of variable-frequency drives of about 80% of the power of all consumers. An excess of the permissible level of nonlinear distortion of the voltage waveform has been established, which makes it reasonable to use frequency converters with an active rectifier to improve the quality of electricity in such networks. A mathematical model of a control system for the active voltage rectifier has been developed. Synthesis of the control system regulators is based on the principles of subordinate regulation, taking into account compensation for the effects of cross-links and disturbing effects. The effectiveness of applying negative feedback on the magnitude of reactive power and on the voltage in the control system of the active voltage rectifier is shown.

Keywords: active voltage rectifiers, power quality parameters, reactive power, variable-frequency drive.

References

- [1] B.I. Abramov. Instrumental research of electric power quality in oil fields in conditions of wide application of frequency – controlled drives // Oil industry, vol.1, pp. 90-92, 2016.
- [2] L.A. Dobrusin, Filter-compensating devices for converter technology. M.: Energoprogress, 2003.
- [3] A.E. Kozyaruk and A.V. Kulygin. Technical and economic indicators of EPS of mining machines using frequency converters with an active rectifier // Electrosila, vol. 42, pp. 57-64, 2003.
- [4] N. Shevyrev. Justification of the application of a frequency-controlled electric drive with an active rectifier // Chief Power Engineer, vol. 8, pp. 69-74, 2015.
- [5] A.B. Vinogradov. Vector control of AC electric drives. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University n.a. V.I. Lenin, 2008.
- [6] R.T. Shreiner and A.A. Efimov. Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters // Electricity, vol. 3, pp. 46-54, 2000.
- [7] N. Yu. Shevyryova. Laws of the influence of a frequency – regulated electric drive with an active rectifier on the quality of electricity // News of higher educational institutions of the Chernozen region, vol. 4, pp. 26-35, 2015.

УДК 621.314

А.И. Чивенков, И.Г. Крахмалин

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КАК ОСНОВА ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ С ВИЭ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

В соответствии с Концепцией развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью одной из важнейших задач современной электроэнергетики является исследование и разработка технологий автоматического управления и регулирования электрических параметров режима взаимодействующих объектов. В статье рассмотрены актуальные вопросы применения нового поколения активного силового оборудования – унифицированных систем управления энергопотоками (объединенный регулятор потоков мощности – ОРПМ). Показано, что параметры выходного напряжения возобновляемых источников энергии могут быть нестабильны. Однако применение современных систем управления адаптивными устройствами силовой электроники (активно-адаптивного универсального преобразователя напряжений на базе ОРПМ) позволяет решить эту проблему. С целью расширения функциональных возможностей и сопряжения параметров разнохарактерных источников питания выполнена модификация типовой схемы трёхфазного инвертора напряжений с нулевым проводом, определены схема силовой части универсального преобразователя и алгоритм его работы. Представлены основы формирования математических и имитационных моделей универсального преобразователя.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, инвертор напряжения, интеллектуальная электрическая сеть, математические модели, объединенный регулятор потоков мощности, универсальный преобразователь, управление потоками энергии.

1. Введение

Одной из важнейших задач является исследование и разработка комплекса оборудования для построения интеллектуальной активно-адаптивной сети [1]. Особую актуальность имеет разработка устройств, обеспечивающих согласование разнохарактерных источников питания и их объединение в сети. В первую очередь это касается возобновляемых источников малой энергетики [2-6].

Термин «электропотребление» является весьма упрощенным и не отражает физики электромагнитного взаимодействия объектов генерирования и потребления электроэнергии. С другой стороны, разные аспекты

процесса обмена потоками энергии между источниками и приемниками, как с точки зрения расчетов, так и управления/регулирования, связаны с такими общепринятыми понятиями как активная и реактивная мощность, искажение форм кривых токов и напряжений, несимметрия и др. Соответственно и средства воздействия на один, реже на комплекс параметров, разрабатывались индивидуально – различные устройства компенсации реактивной мощности, силовые фильтры, симметрирующие устройства или, например, фильто-компенсирующие устройства и прочие. Но несомненно и то, что воздействие, казалось бы, только на один параметр, вызывает изменение, в той или иной степени, всей электромагнитной обстановки по цепи «источник – сеть – приемник» даже в простейшей ее реализации.

Иными словами, желание изменять только один параметр электромагнитного взаимодействия – это очень сильное упрощение. Логично предположить, что более корректно контроль и управление взаимодействием объектов (в простейшем случае «источник – потребитель») следует осуществлять по комплексу параметров, некоторые из которых не являются традиционно принятыми в электроснабжении и управлении сетевым оборудованием. Например, «мощность искажений» или, как иногда упоминают, «электромагнитный мусор», что получается после выделения первой гармоники основной частоты. Наибольшее внимание, судя по опубликованным источникам и данным ОАО «НТЦ электроэнергетики» (ВНИИЭ, г. Москва), уделяется компенсации реактивной мощности и для этого есть веские причины – это эффективный и относительно простой способ решения вопросов регулирования напряжения, снижения потерь мощности и энергии, увеличения пропускной способности линий и силового оборудования. Подтверждением тому служат множество реализованных проектов в этом направлении [7-10]. Каждое решение имеет свои достоинства и недостатки.

Компенсация реактивной мощности весьма распространена и имеет четко обозначенную область применения, однако не может рассматриваться как основной инструмент для решения. До настоящего времени единого универсального решения для массового применения, удовлетворяющего подчас даже противоречивым требованиям, не существовало. Однако на базе обобщения опыта уже имеющихся решений и, в частности, в области компенсации реактивной мощности, статических источников, источников питания различных исполнений с учетом особенностей взаимодействия объектов в сети представляется возможным предложить одно из средств для решения общей задачи.

II. Материалы и методы

Установившаяся классификация по типу построения преобразователей может быть достаточно просто описана: однофазные/многофазные, одно- и двухтактные, полумостовые/мостовые. Между группами есть перекрестные связи, что позволяет, например, определить преобразователь как многофазный двухтактный мостовой или однофазный однотактный. Их схемы, практическая реализация, достоинства, недостатки и области применения известны. Без потери последовательности изложения авторы опускают описание простейших преобразователей и акцентируют внимание на тех решениях, которые можно рассматривать как конкурирующие.

На сегодняшний момент наиболее удачным, по мнению авторов, следует считать статические компенсаторы на базе тиристорных преобразователей параметров электрической энергии, которые позволяют одновременно решать несколько задач (регулирование и симметрирование напряжений, компенсация реактивной мощности, мощности искажений). Помимо затрат, главным их недостатком считается то, что они являются источниками высших гармонических при реализации плавных способов регулирования напряжения и токов.

Лучшими показателями в этом отношении обладают компенсирующие устройства (КУ) на базе силовых IGBT транзисторов. Силовая часть КУ может быть представлена как преобразователь AC/DC/AC (рис. 1), т.е. как устройство двойного преобразования с промежуточным звеном постоянного тока [11, 12]. В приведённой схеме, инвертор, подключенный посредством трансформатора параллельно питающей сети, выполняет функцию активного выпрямителя, а инвертор, подключенный посредством сериесных трансформаторов в рассечку линии электропитания – функцию генерации реактивной и мощности высших гармонических составляющих тока. Дополнительно данное схемотехническое решение может выполнять функцию фазоповоротного устройства.

Принцип компенсации реактивной мощности основан на генерации реактивной составляющей тока I_r с противоположным знаком. Аналогичным способом производится компенсация высших составляющих токов, сгенерированных преобразовательными установками потребителей. На рис. 2 приведены временные диаграммы токов четырёх проводной сети с выпрямительной нагрузкой и подключенном компенсаторе искажений.

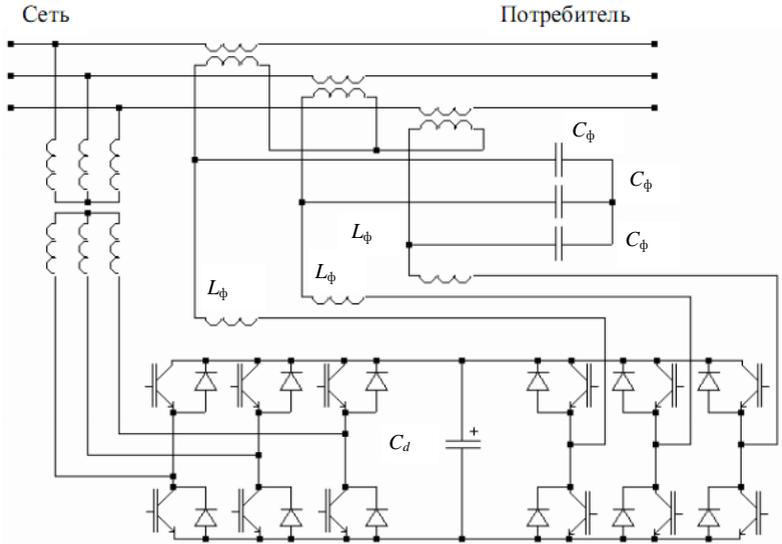


Рис. 1. Компенсирующее устройство параллельно-последовательного типа

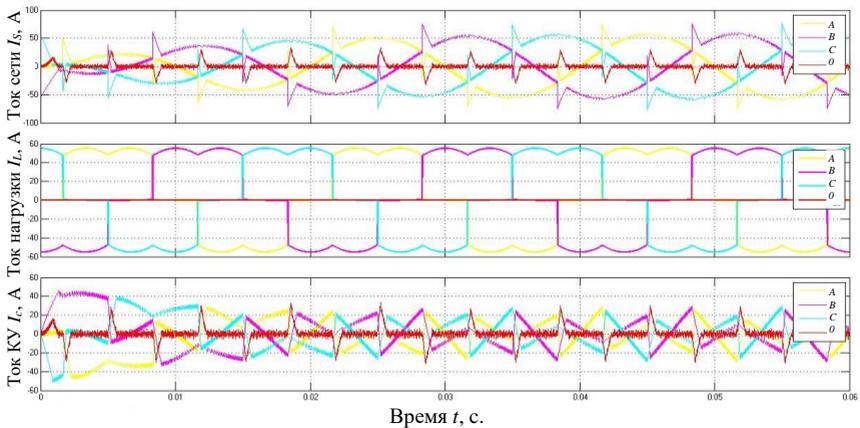


Рис. 2. Временные диаграммы для нелинейного режима нагрузки: сети, нагрузки и КУ

В обоих случаях КУ работает как источник тока с заданными выходными параметрами по отношению к питающей сети.

КУ с использованием IGBT транзисторов это пример нового поколения устройств по сути являющихся комплексными компенсаторами и

более того, что важно, преобразователь AC/DC/AC уже имеет в своей структуре цепи непосредственного преобразования (конвертора) и регулирования параметров напряжения различного характера, что позволяет решать и другие задачи. Например, согласовывать параметры различных источников.

Для приведения постоянных напряжений низковольтных источников средней и большой мощности к требуемому уровню, его стабилизации и/или регулирования целесообразно использование устройств, осуществляющих прямое однокаскадное преобразование постоянного напряжения в постоянное без использования промежуточного инвертирования исходного постоянного напряжения с последующим его выпрямлением. Традиционно область их применения ограничивалась устройствами малой мощности. Однако появление современных мощных IGBT транзисторов и модулей на их основе, позволяют создавать мощные однокаскадные DC/DC-конвертеры.

Таким образом, на базе аналогичных КУ и преобразователей можно разработать универсальное устройство для решения задач интеграции возобновляемых источников энергии в общепромышленную сеть электропитания. Это полностью вписывается в Концепцию интеллектуальной энергосистемы [1]. Для поставленной задачи требуется многофазный преобразователь. В качестве примера рассмотрим более подробно классический повышающий шестиканальный преобразователь параллельного типа [13]. Он представляет собой трехфазный мостовой инвертор напряжения, работающий в режиме активного выпрямителя, с дозирующими катушками индуктивности в цепи питания переменного тока (рис. 3) и обеспечивающий заряд емкостного накопителя до напряжения, превышающего амплитуду линейного напряжения сети. Причем, заряд осуществляется за два такта работы. Первый такт осуществляется при условии предварительного заряда конденсатора через обратные диоды ключей. Процесс накопления энергии индукторами можно описать уравнениями:

$$u_{ij}(t) = i_i(t) \cdot R_i + L_i \frac{di_i(t)}{dt} - \frac{1}{C} \int i_j(t) dt + L_j \frac{di_j(t)}{dt} + i_j(t) \cdot R_j; \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int i_j(t) dt = i_i(t) \cdot R_i + L_i \frac{di_i(t)}{dt} + L_j \frac{di_j(t)}{dt} + i_j(t) \cdot R_j - u_{ij}(t), \quad (2)$$

где i, j – фазы сети ($i - A, B, C; j - B, C, A$); C – емкость накопительного конденсатора; $i_j(t)$ – мгновенное фазного тока; R_i, R_j – активное сопротивление индуктора соответствующей фазы; L_i, L_j – индуктивность индуктора соответствующей фазы; $u_{ij}(t)$ – соответствующее линейное сетевое напряжение.

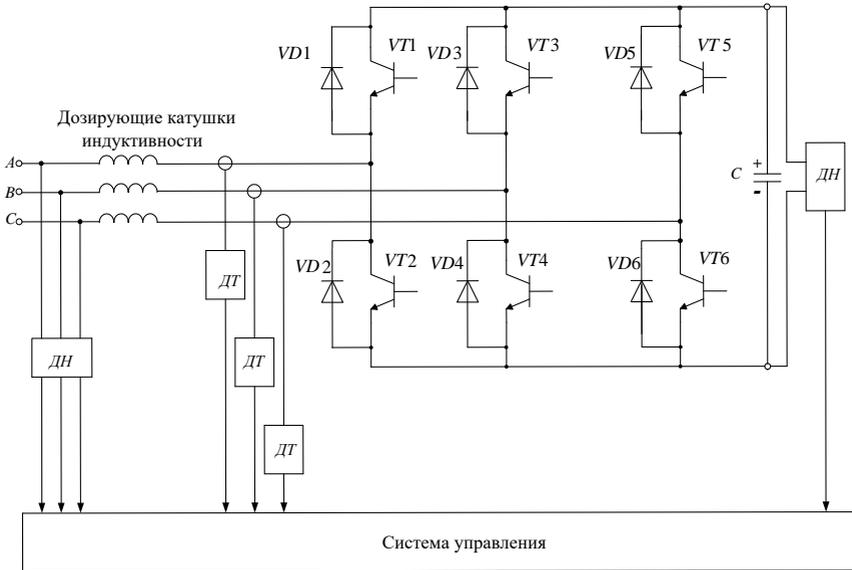


Рис. 3. Трехфазный мостовой инвертор напряжения

Процесс отдачи энергии индукторами описывается как:

$$u_{ij}(t) = i_i(t) \cdot R_i - L_i \frac{di_i(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_j(t) dt - L_j \frac{di_j(t)}{dt} + i_j(t) \cdot R_j; \quad (3)$$

$$\frac{1}{C} \int i_j(t) dt = u_{ij}(t) + L_i \frac{di_i(t)}{dt} + L_j \frac{di_j(t)}{dt} - i_j(t) \cdot R_j - i_i(t) \cdot R_i. \quad (4)$$

За эти два такта в конденсаторе увеличивается запасенная энергия на величину:

$$\Delta W_c = C \cdot \left(U_c \cdot \Delta U_c + \frac{1}{2} \cdot \Delta U_c^2 \right), \quad (5)$$

где ΔU_c – приращение напряжения на обкладках конденсатора.

В данном устройстве применен принцип накопления энергии фазных токов, при этом функциональная зависимость напряжения емкости от времени $u_c(t)$ близка к гиперболе. Заданная амплитуда токов фаз определяет темп роста $u_c(t)$. В этом случае максимально возможное напряжение накопительного конденсатора, а также максимальная скорость накопления

энергии, определяются допустимыми параметрами использованных элементов схемы.

Анализ существующих схем преобразователей однозначно подтверждает, что в основу для реализации поставленной задачи может быть положено решение, представленное на рис 3.

III. Расширение функциональности типového трёхфазного инвертора напряжения

На базе трёхфазного мостового инвертора напряжения авторами предложено построение шестиканального преобразователя постоянного тока, модифицированного путем введения токовой развязки катодных и анодных цепей обратных диодов и общих узлов соединения коллекторов и эмиттеров *IGBT* [14]. Схема преобразователя представлена на рис. 4.

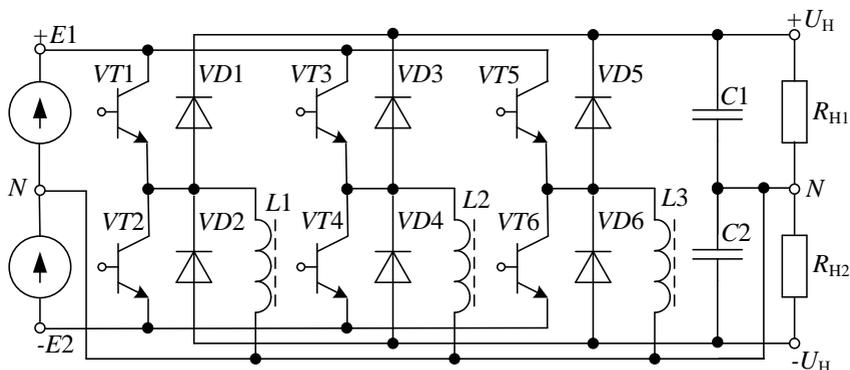


Рис. 4. Структурная схема шестизвенного DC/DC преобразователя

Отличительными особенностями предложенного преобразователя являются: обеспечение постоянства потребления электроэнергии от источника питания; лучшее использование сглаживающих фильтров; равномерное распределение мощности между модулями; высокий КПД преобразования и надежность функционирования устройства в системе электропитания [15].

Последовательность трансформации схемы преобразователя при изменении проводящего состояния полупроводниковых элементов структуры показана на рис. 5.

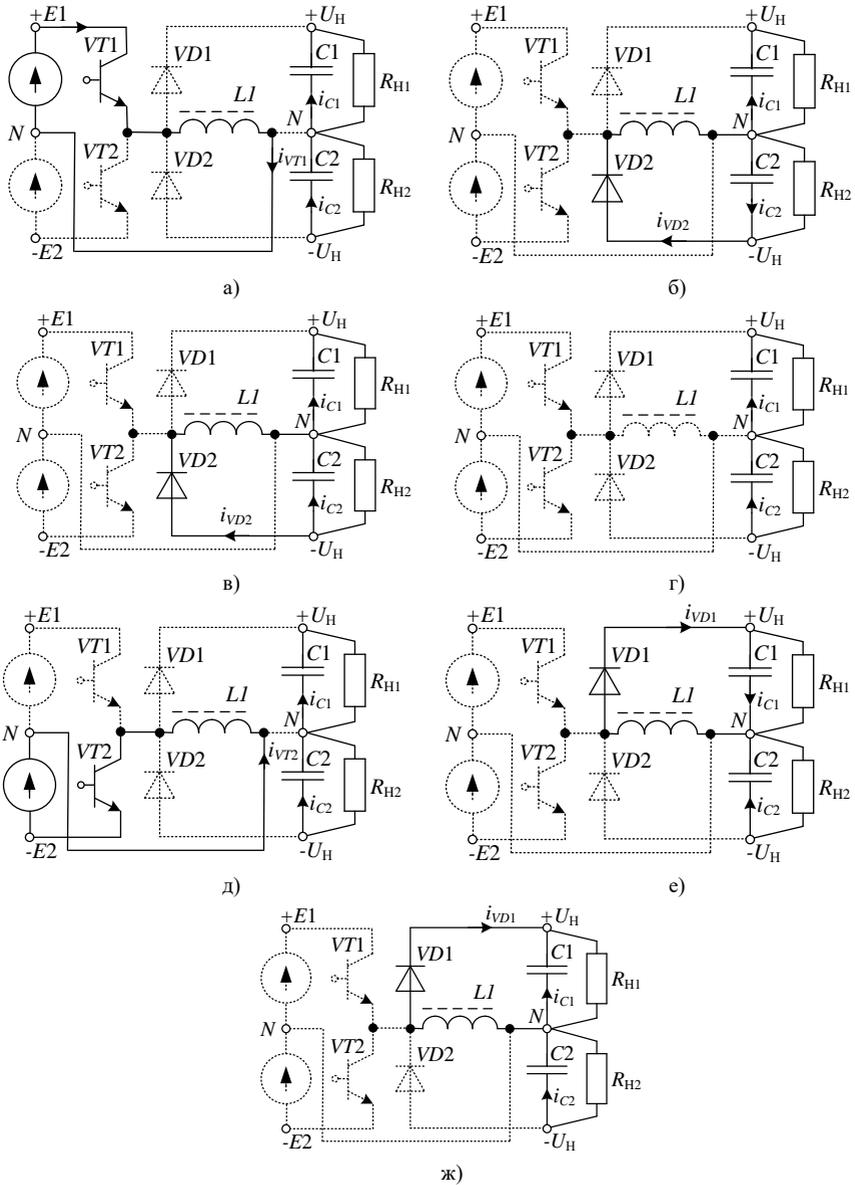


Рис. 5. Последовательность формирования цепей преобразователя напряжения

Цепь заряда дозирующей катушки индуктивности $L1$ формируется за счет отпирания транзистора $VT1$, период работы которого составляет величину, обратную частоте его переключения (рис. 6). За время его открытого состояния t_1 в дозирующей катушке накопится энергия W_3 , которая при условии линейного изменения тока заряда может быть описана выражениями:

$$W_3 = U_n \cdot I_{cp} \cdot t_3; \quad (6)$$

$$U_n = L \frac{di_3}{dt}; \quad (7)$$

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{U_n}{L}; \quad (8)$$

$$W_3 = \frac{2 \cdot U_n^2 \cdot \gamma^2}{L \cdot f^2}, \quad (9)$$

где U_n – напряжение источника питания, I_{cp} – среднее значения тока заряда дозирующей индуктивности, t_3 – время заряда, L – индуктивность дозирующей катушки, f – частота переключения транзистора, $\gamma = 2t_1/T$ – коэффициент заполнения импульсов.

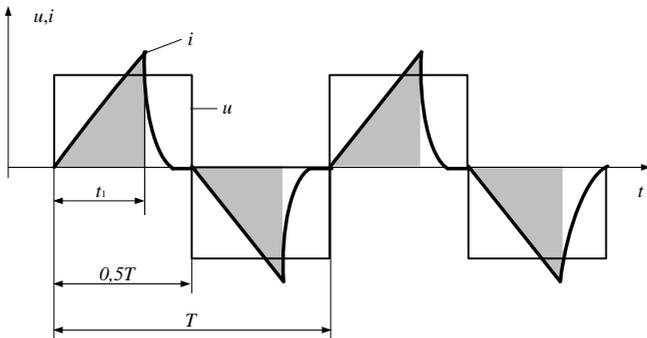


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений дозирующего дросселя

При запираии транзистора $VT1$ энергия, накопленная дозирующей катушкой, передается в конденсатор емкостного накопителя по цепи $L1$, $VD2$, $C2$. Учитывая, что $W_3 = W_p = \Delta W_c$, величина изменения напряжения конденсатора может быть определена из выражения:

$$\Delta W_c = \frac{\Delta U_c^2 \cdot C}{2}, \quad (10)$$

где ΔW_c – изменение энергии конденсатора; W_3 – энергия, накопленная дозирующей катушкой за время заряда; W_p – энергия, отданная дозирующей катушкой за время разряда.

Изменение напряжения на конденсаторе:

$$\Delta U_c = \frac{2 \cdot U_n \cdot \gamma}{f} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_3}{C}}, \quad (11)$$

где ΔU_c – величина дозированного изменения напряжения конденсатора.

При работе транзистора $VT2$ в другом полупериоде $L1$ перемагничивается в обратном направлении, что позволяет более эффективно использовать катушки индуктивности, так как исключается постоянная составляющая тока подмагничивания. Аналогичные процессы происходят при работе остальных пяти каналов.

Единая частота преобразования и порядок переключения транзисторных ключей определяются общим для всех модулей задающим генератором. Схема управления обеспечивает синхронную работу модулей с фазовым сдвигом $1/6$ рабочего периода. Обязательным условием является то, что время открытого состояния транзисторов не может превышать значения $0,5 \cdot T$, так как в противном случае будет протекать ток сквозного короткого замыкания двух модулей, работающих в противофазе.

При увеличении периода работы ключа (уменьшении частоты) время его открытого состояния увеличивается ($\gamma = \text{const}$), что приводит к пропорциональному увеличению тока транзистора в момент его записания. В реальной физической установке время открытого состояния транзистора будет ограничено его максимально допустимым током $I_{\text{max доп}}$. Это означает, что при дальнейшем снижении частоты γ будет пропорционально уменьшаться, а, следовательно, и коэффициент преобразования тоже. Зависимость f_{min} от максимально допустимого тока транзистора может быть определена из:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_n}{L}; \quad (12)$$

$$I_{\text{max доп}} = \frac{U_n}{L} \cdot t_1; \quad (13)$$

$$f_{\text{min}} = \frac{U_n \cdot \gamma}{L \cdot I_{\text{max доп}}}. \quad (14)$$

Исследование работы модели шестиканального ИП на активностную нагрузку в среде *MATLAB/Simulink* позволило получить зави-

симось коэффициента преобразования $k = U_{н}/U_{п}$ от частоты при установленных значениях $\gamma=0,7$ ($f > f_{min}$), $U_{п} = 220\text{В}$, $L = 300 \text{ мкГн}$, $C = 100 \text{ мкФ}$, $I_{max \text{ доп}} = 200\text{А}$, представленную на рис. 7.

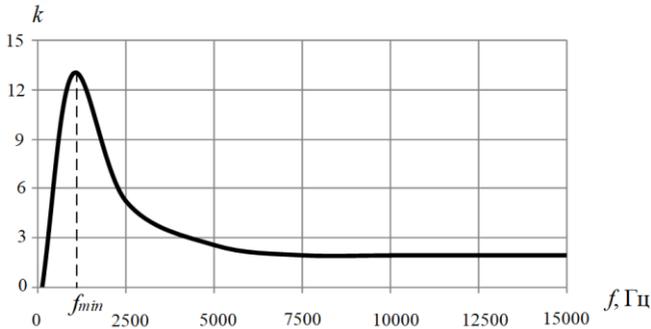


Рис. 7. Зависимость коэффициента преобразования от частоты

Проведенные исследования показали реальную возможность получения на основе однокаскадного преобразователя постоянного напряжения коэффициента преобразования больше 10, что позволило сформировать входной блок универсального преобразователя, обеспечивающий работу в режиме шестиканального конвертора постоянного напряжения (рис. 8).

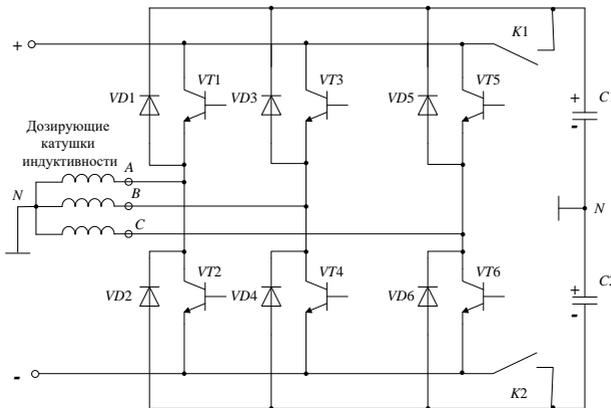


Рис. 8. Структурная схема базового блока универсального преобразователя

IV. Заключение

Введение в схему трёхфазного инвертора напряжения дополнительных ключей $K1$, $K2$ и объединение дозирующих катушек индуктивности без изменения их параметров позволяют сформировать структурную схему универсального повышающего преобразователя напряжений (рис. 8). Ис-

пользование в качестве базового модуля однокаскадного инвертирующего преобразователя позволило модифицировать схему трехфазного инвертора напряжения, обеспечить подключение его входных цепей к источникам постоянного тока и расширить функциональные возможности. В данном устройстве реализуется одно из достоинств, а именно – независимость параметров токов дозирующих и регулирующих элементов от величины сопротивления и токов нагрузки.

Заменив неуправляемые вентили в схеме, приведенной на рис. 8, на управляемые – тиристоры, можно получить преобразователь, не только повышающий, но и понижающий напряжение относительно напряжения источника питания.

© Чивенков А.И., 2018

© Крахмалин И.Г., 2018

Библиографический список

- [1] Основные положения Концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, 2012. – 51 с. [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (Дата обращения 01.03.2018).
- [2] Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. М.: Колос-Пресс, 2003. – 532 с.
- [3] Виллемс П. Современное состояние и перспективы развития возобновляемых источников энергии в России // Энергетический вестник. 2008. №2. С. 30-39.
- [4] Иванова И.Ю., Попов С.П., Тугузова Т.Ф. Развитие малой энергетики с вовлечением возобновляемых источников энергии // ЭнергоРынок. 2005. № 5. С. 922-928.
- [5] Шейндлин А.Е. О целевом видении стратегии развития электроэнергетики России на период до 2030 г. М.: ОИВТ РАН, 2007.
- [6] Пейсахович В.Я. Роль малой энергетики в решении проблем энергетического обеспечения потребителей // ЭнергоРынок. 2005. № 5. С. 24-29.
- [7] Змиева К.А. Применение автоматических компенсаторов реактивной мощности для повышения энергоэффективности управления электроприводом металлообрабатывающих станков // Электротехника. 2009. №11. С. 26-32.
- [8] Компенсация реактивной мощности и гармонических искажений в электрических сетях промышленных предприятий, Компания Эн Эйч Инжиниринг [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.nh-engineering.ru/industry_detail.aspx?id=66 (Дата обращения 01.03.2018).
- [9] Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.
- [10] Параллельный статический компенсатор [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://leg.co.ua/info/podstancii/parallelnyy-staticheskiy-kompensator.html> (Дата обращения 01.03.2018).

- [11] Соснина Е.Н., Чивенков А.И. Вопросы сопряжения параметров источников малой распределенной энергетики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №2. С.158-163.
- [12] Чивенков А.И. Структурный анализ схем устройств сопряжения параметров электрической энергии // В трудах VIII Всерос. науч.-техн. конф. ДНДС-2009, 2009, Чебоксары, Россия. С. 319-328.
- [13] Мещеряков В.Н., Коваль А.А. Устройство для заряда накопительного конденсатора, Пат. 2279748 РФ, заявл. 09.03.05; опубл. 10.07.06. – Бюл. №19.
- [14] Чивенков А.И., Гребенщиков В.И., Михайличенко Е.А., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Устройство заряда накопительного конденсатора, Пат. 2503113 РФ, заявл. 18.06.12; опубл. 27.12.13. – Бюл. №36.
- [15] Чивенков А.И., Гребенщиков В.И., Антропов А.П., Михайличенко Е.А. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети // Инженерный вестник Дона. 2013. №1(24). С. 93.

A.I. Chivenkov¹, I.G. Krakhmalin²

**UNIVERSAL CONVERTER AS BASIS
FOR PARAMETERS HARMONIZATION
OF DISTRIBUTED NETWORKS WITH RENEWABLE
ENERGY SOURCES**

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. In accordance with the Concept for the development of the intelligent electric power system of Russia with an active-adaptive network, one of the most important tasks of modern electric power industry is the research and development of technologies for automatic control and electrical parameters regulation of the mode of interacting objects. The issues of application of the new generation of active power equipment - unified power flow controller (UPFC) are considered. It is shown that output voltage parameters of renewable energy sources can be unstable. However, the use of modern control systems for power electronics adaptive devices (active-adaptive universal voltage converter based on UPFC structure) makes it possible to solve this problem. In order to expand the functionality and to couple parameters of different types of power sources, a modification of the typical three-phase voltage inverter with zero conductor has been performed. The scheme of power unit of the universal converter and a algorithm of its operation are determined. The foundations of mathematical and simulation models formation of the universal converter are presented.

Keywords: intelligent electrical network, inverter, mathematical models, power flow control, renewable energy sources, unified power flow controller, universal converter.

References

- [1] The main provisions of the concept of an intelligent power system with an actively-adaptive network, 2012. [Online]. Available at: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf.
- [2] R.A. Amerkhanov, Optimization of agricultural power plants using renewable energy types. Moscow: Kolos-Press, 2003.
- [3] P. Willems, "Renewable energy sources: current situation and development prospects", Energy Bulletin, no. 2, pp. 26-34, Oct.-Nov. 2008.
- [4] I.Y. Ivanova, S. P. Popov and T. F. Tuguzova. Development of small-scale energy with the involvement of renewable energy sources // EnergoRynok, no. 5, pp. 922-928, 2005.
- [5] A.E. Sheindlin. On the target vision of the strategy for the development of the Russian electric power industry for the period up to 2030. Moscow: JIHT RAS, 2007.
- [6] V.Y. Peisakhovich. The role of small-scale power engineering in solving problems of power supply for consumers // EnergoRynok, no. 5, pp. 24-29, 2005.
- [7] K.A. Zmieva. Application of automatic reactive power compensators to improve the energy efficiency of electric drive control of metal working machines // Electrical Engineering, no. 11, pp. 26-32, Nov. 2009.
- [8] Compensation of reactive power and harmonic distortion in electrical networks of industrial enterprises, NH Engineering Company [Online]. Available at: http://www.nh-engineering.ru/industry_detail.aspx?id=66.
- [9] V.I. Kochkin and O.P. Nechaev. Application of static compensators of reactive power in electrical networks of power systems and enterprises. Moscow: NC ENAS, 2002.
- [10] Parallel static compensator. [Online]. Available at: <http://leg.co.ua/info/podstancii/parallelnyy-staticheskiy-kompensator.html>. [Accessed: Sep. 12, 2018].
- [11] E.N. Sosnina and A.I. Chivenkov. The questions of interface of parameters of sources the small distributed power // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, no. 2, pp. 158-163, 2012.
- [12] A.I. Chivenkov. Structural analysis of circuits of devices for conjugation of electric energy parameters // in proc. VIII All-Russian scienc. and tech. conf. DDDS-2009, 2009, Cheboksary, Russia, pp. 319-328.
- [13] V.N. Meshcheryakov and A. A. Koval. Device for charging the storage capacitor // R. F. Patent 2279748, July 10, 2006.
- [14] A.I. Chivenkov, V.I. Grebenshchikov, E. A. Mikhaylichenko, E. N. Sosnina and A. V. Shalukho. Charging device for capacitor storage. R. F. Patent 2503113, Dec. 27, 2013.
- [15] A.Y. Chivenkov, V.Y. Grebenshchikov, A.P. Antropov and E.A. Mihaylichenko, "Enhancing the functionality of the inverter voltage systems interfacing renewable energy and industrial network". [Online], Engineering journal of Don, no. 1(24), p. 93, 2013. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564>.

НАШИ АВТОРЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Абдуллин Линар Ильфатович – инженер по технологическому присоединению филиала ОАО «Сетевая Компания» Приволжские Электрические Сети; канд. тех. наук; **abdullin.linar@mail.ru**

Басыров Рафик Шайхалович – доцент Казанского Национального технического университета им. А.Н. Туполева, канд. физ.-мат. наук; **rafikbasyrov@mail.ru**

Бобров Максим Андреевич – старший преподаватель Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева; **bobrovma92@mail.ru**

Борисова Юлия Александровна – магистрант Самарского государственного технического университета; **vgg41@yandex.ru**

Вагапов Георгий Валериянович – старший научный сотрудник отдела НИОКР Казанского государственного энергетического университета, канд. тех. наук, доцент; **fed.ai@mail.ru**

Ведерников Александр Сергеевич – декан электротехнического факультета Самарского государственного технического университета, канд. тех. наук, доцент; **es@samgtu.ru**

Гольдштейн Валерий Геннадьевич – профессор Самарского государственного технического университета, д. тех. наук; **vgg41@yandex.ru**

Гуляев Владимир Викторович – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, канд. тех. наук; **eovt@mail.ru**

Еременко Владимир Викторович – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; **eryomenko.vladimir96@mail.ru**

Карпов Алексей Сергеевич – старший научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики севера Кольского научного центра РАН, канд. тех. наук; **karpov@admksk.apatity.ru**

Колобанов Петр Алексеевич – ведущий инженер ООО «ЭТС-Проект»; **agemont@mail.ru**

Кралин Алексей Александрович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук, доцент; **akralin@yandex.ru**

Кудряшов Дмитрий Андреевич – инженер-конструктор Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова; **kud1904@rambler.ru**

Лоскутов Алексей Борисович – профессор Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева, д. тех. наук; **loskutov@nntu.ru**

Обалин Михаил Дмитриевич – главный специалист филиала АО «СО ЕЭС» Регионального диспетчерского управления энергосистем Нижегородской области, канд. тех. наук; obalin_misha@mail.ru

Смирнов Александр Юрьевич – ведущий инженер-конструктор Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, доцент, д. тех. наук; a_yu_smirnov@mail.ru

Тутаев Геннадий Михайлович – профессор Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, д. тех. наук, доцент; tutaevgm@mail.ru

Федотов Александр Иванович – ведущий научный сотрудник отдела Казанского государственного энергетического университета, д. тех. наук, профессор; fed.ai@mail.ru

Ярошевич Вера Васильевна – научный сотрудник Центра физико-технических проблем энергетики севера Кольского научного центра РАН, Yaroshevich_vera@mail.ru

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Крахмалин Игорь Григорьевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук; fedor@mts-nn.ru

Плехов Александр Сергеевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук; aplehov@mail.ru

Титов Дмитрий Юрьевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук, dm_titov@list.ru

Шевырëв Юрий Вадимович – профессор Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», д. тех. наук, доцент; uvshev@yandex.ru

Шевырëва Наталья Юрьевна – доцент Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, канд. тех. наук; uvshev@yandex.ru

Чивенков Александр Иванович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д. тех. наук; chyvenkov@mail.ru

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE
RUSSIAN FEDERATION**

**NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 1

Nizhny Novgorod 2018

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor Nizhny Novgorod branch of RUT
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIHE SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor. H-BRS (Germany)

Electronic version of the journal:
<https://ie.mntu.ru>

CONTENT

FROM EDITOR	4
CHRONICLES	5
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	9
Loskutov A.B. Solving problems in the transition of electrical industry to digital technologies	9
Smirnov A.Yu., Kudryashov D.A. Expansion of application field of electric drive of nuclear reactors regulatory bodies	28
Goldstein V.G., Vedernikov A.S., Borisova J.A. Construction and mathematical models of multi-chain overhead power transmission lines	36
Tutaev G.M., Bobrov M.A. Extremal control of doubly-fed induction motor drive by energy criteria	49
Fedotov A.I., Basyrov R.Sh., Vagapov G.V., Abdullin L.I. Theoretical and practical aspects of monitoring wire of overhead power lines 110 kV	62
Karpov A. S., Yaroshevich V. V. Verification of certified power quality analyzers at registration on operating substation	73
Obalin M.D., Kolobanov P.A. Intellectual single-ended algorithm of fault location on power transmission line	84
Kralin A.A., Gulyaev V.V., Eremenko V.V. Investigation of asymmetric operating modes of three-phase transformers with Y/Y0 winding connection	93
POWER ENGINEERING	101
Plekhov A.S., Titov D.Yu., Shevyrev Yu.V., Shevyrev N.Yu. Power quality management of weakness networks by active voltage rectifier ...	101
Chivenkov A.I., Krakhmalin I.G. Universal converter as basis for parameters harmonization of distributed networks with renewable energy sources	112
Authors	126

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 1

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор **И.Н. Терентьева**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@mtu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 31.03.2018. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 6,0. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.

Адрес издателя и типографии:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24