X МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

X Международная научно-практическая конференция

Инновационные перспективы Донбасса

X Международная научно-практическая конференция

Научно-технические аспекты инновационного развития транспортного комплекса

XV Международная научно-техническая конференция

Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование

XXIV Всероссийская научно-техническая конференция

Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых

X Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и студентов

Металлургия XXI столетия глазами молодых

Том 2. Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДОННТУ)**

СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ДОННТУ

**ФГБОУ ВО «ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

НИЦ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПАРТНЕРСТВА ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА

ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА

**Материалы 10-й Международной научно-
практической конференции
Том 2. Перспективы развития электротехнических,
электромеханических и энергосберегающих систем.**

**г. Донецк
28-30 мая 2024 года**

Донецк – 2024

ББК 65.30
УДК 330.341 (477.61/62)

И 66

Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 28-30 мая 2024 г. – Донецк: ДонНТУ, 2024.
Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2024. – 229с.

Представлены материалы 10-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», состоявшейся 28-30 мая 2024 г. в Донецке на базе ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», включающие доклады ученых и специалистов по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения инновационного развития Донбасса и формирования механизмов повышения социально-экономической эффективности развития региона.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

Ректор ДонНТУ А.Я. Аноприенко, ректор ДонГТУ Д.А. Вишневский, директор АНО «НИЦ стратегического партнерства государства и бизнеса» О.Ф. Шахов, проректор ДонНТУ С.В. Борщевский, канд. техн. наук А.Н. Корчевский, канд. техн. наук О.Л. Кизияров, канд. техн. наук А.А. Булгаков, канд.техн.наук Д.И. Морозов, д-р техн. наук С. П. Еронько, канд.техн.наук А.М. Зинченко, канд. хим. наук Ю.Н. Ганнова, канд.фарм.наук В.С. Федорова, канд. техн. наук А.А. Кравченко, д-р экон. наук Я.В. Хоменко, канд. техн. наук И.В. Филатова, канд.техн.наук Д.В. Пронский, председатель Совета молодых ученых ДонНТУ М.П. Руденко.

Под общей редакцией Бажутина Дениса Владимировича

Контактный адрес редакции
НИЧ ДонНТУ, ул. Артема, 58, Донецк, 283001
Тел.: +7 (856) 305-35-67. Эл. почта: ipd.donntu.org@gmail.com Интернет: http://ipd.donntu.ru

© ФГБОУ ВО ―Донецкий национальный технический университет‖
Министерство образования и науки ДНР, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

С.В. Шлепнёв, И.А. Бершадский
О развитии электроэнергетики и подготовке инженерных кадров 7

М.Ю. Румянцев, А.В. Берилов, А.В. Быков
Высокоскоростные синхронные турбогенераторы для автономных мини ТЭЦ, работающих на местном топливе 21

А.М. Фиронов
Инновационные технологии в развитии транспортной инфраструктуры Донбасса 26

Е.С. Мотовилов, К.А. Варнавский
Применение источников бесперебойного питания в угольной отрасли в рамках концепции индустрия 4.0. Использование газопоршневых установок..... 32

Д.К. Цаголов, С.Ю. Балахонов, Е.М. Лисин
Анализ особенностей реализации энергосберегающих проектов в городских системах теплоснабжения..... 37

М.А Федин, Е.В. Качалина, А.В. Молостова., С.А. Федина, М.Л. Зотов, Д.А. Жгутов, А.И. Василенко
Использование электромагнитного преобразователя числа фаз для питания индукционно-резистивной системы нагрева..... 42

М.А. Островский, Р.Е. Зуйкин, И.А. Максимов
Численное исследование применения сплиттеров с целью повышения газодинамической эффективности радиальной турбины 46

Н.А. Петерс, Л.В. Цыхлер, А.А. Лапкис, М.К. Сорокин
Раскрытие неопределённости, возникающей в процессе процедуры регистрации рабочих значений токов, электроприводной арматуры 52

М.Г. Асташев, И.И. Журавлев, Е.А. Рябова, А.В. Часов
Отечественные технологии устройств силовой электроники для снижения потерь и улучшения показателей качества электрической энергии 56

И.П. Шорсткин, М.Г. Киселев
Регулятор частоты и напряжения асинхронного генератора на основе СТАТКОМ 61

Н.В. Кобзева, А.Д. Негодяев
Энергоэффективность на АЭС..... 66

Д.С. Сычев
Влияние наличия фактических гидрометеорологических, гидрологических, водохозяйственных данных на энергетические показатели ГЭС 69

Н.В. Алиходжина
Прогнозирование скорости ветра на сутки вперед по методу суперпозиции 73

А.Д. Шилина, Ю.Г. Коломиец
Показатель энергоемкости для электросетевых компаний 78

Г.С. Мыцык, Мье Мин Тант, М.Ю. Румянцев, А.В. Берилов
Трёхфазные инверторы повышенной мощности для солнечных фотоэлектрических станций..... 82

А.А .Дюдяков, С.А. Янченко
Алгоритм управления гибридным фильтром на основе фильтра Калмана 88

Р.Н. Саратовский
Транзисторный источник питания для индукционного нагрева 93

М.В. Канчукова
Перспективные направления развития энергосберегающих Технологий..... 98

Ф.А. Тришкин
Анализ перспективы применения СТАТКОМ в распределительных сетях промышленного предприятия..... 103

А.М. Ларин, А.А. Булгаков
Аналитическое описание характеристик паровых турбин при моделировании переходных процессов с учетом импульсной разгрузки 108

А.М. Ларин, И.И. Ларина
Определение индуктивностей схемы замещения синхронных машин с учетом различной взаимоиндукции между всеми контурами 115

К.Б. Петренко, Д.Н. Мирошник, А.В. Захаров
Решение обратной задачи кинематики для робота манипулятора Katana и симуляция управления с помощью программных средств CoppeliaSim 123

С.А. Гришанов, В.Ю. Лисовский
Анализ применяемых подходов расчета нагрузочных потерь электроэнергии в электрических сетях 137

А.М. Ларин, С.В. Ковальская
Методика экспериментального определения частотных характеристик синхронных машин с учетом насыщения цепи основного магнитного потока 146

И.А. Бершадский, А.Д. Мых, А.Ю. Гладков, Н.М. Халявинская
Метод идентификации последовательных дуговых замыканий, основанный на диагностической модели, полученной в результате вейвлет-преобразования 153

М.В. Сечина, И.А Бершадский
Исходные положения для разработки метода расчетной оценки искробезопасности при проектировании рудничных переносных приборов..... 159

И.О. Журов, П.И. Розкаряка
Оптимизация работы асинхронной машины в составе тягового электропривода с векторным управлением..... 167

Я.С. Ходаковский, Д.В. Бажутин
Разработка виртуальной модели мобильного робота с датчиком LiDAR в среде ROS..... 172

А.А. Булгаков, А.С. Трегубенко, К.В. Молчанов
Исследование воздействия несинусоидальности напряжения в электрических сетях с вентильными преобразователями..... 177

Д.В. Полковниченко, Д.В. Яковенко
Анализ построения цифровых подстанций 183

Д.В. Полковниченко, В.И. Дробот
Анализ современных решений в областях генерации, передачи, распределения и накопления электроэнергии 191

В.А. Павлюков, С.Н. Ткаченко, А.С. Хапченков
Анализ состояния и перспектив совершенствования релейной защиты систем собственных нужд энергоблоков ТЭС Донбасса 204

Д.В. Бажутин, В.Ю Мариничев, О.В. Вапирова
Анализ возможностей отечественных инженерных программных пакетов с точки зрения подготовки специалистов в области автоматизированного электропривода, мехатроники и робототехники 213

С.Н. Ткаченко, Д.А. Тонкошкур
Совершенствование цифровой релейной защиты асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций 219

УДК 622.621.311

О РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

С.В. Шлепнёв, И.А. Бершадский
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Содержится материал, раскрывающий историю развития мировой и российской электротехники и энергетики, описано понятие умных электрических сетей Концепции «Smart Grid», приведены проблемы современной электроэнергетики и информация о Национальном проекте «Интеллектуальная энергетическая система России». Выполнен анализ подготовки инженерных кадров на факультете интеллектуальной электроэнергетики и робототехники Донецкого национального технического университета с учетом современных тенденций развития энергетики, робототехники и электромобилестроения.

It contains material revealing the history of the development of world and Russian electrical engineering and energy, describes the concept of smart electric networks of the "Smart Grid" Concept, presents the problems of modern electric power industry and information about the National project "Intelligent Energy System of Russia". The analysis of the training of engineering personnel at the Faculty of Intelligent Electric Power Engineering and Robotics of Donetsk National Technical University is carried out taking into account current trends in the development of energy, robotics and electric vehicles.

Ключевые слова: *история развития электротехники и энергетики, умные электрические сети, проблемы современной электроэнергетики, интеллектуальная энергетическая система России, подготовка инженерных кадров.*

Keywords: *the history of the development of electrical engineering and energy, smart electric networks, problems of modern electric power industry, intelligent energy system of Russia, training of engineering personnel.*

В процессе подготовки инженерных кадров для электроэнергетики в ДонНТУ уделяется значительное внимание формированию у студентов понимания того, что все новые знания, технические достижения базируются на результатах труда

предшествующих поколений. Изучение истории, тенденций развития отрасли способствует формированию профессиональных компетенций.

Развитие электротехники можно условно разделить на четыре этапа [1, 2].

Первый начальный этап – условно с 1800 по 1831 гг. Характеризуется рядом открытий, которые послужили базой для дальнейших исследований. В их числе изобретение химического источника тока итальянским физиком А. Вольта в 1800 г., открытие электрической дуги в 1802 г. русским академиком В.В. Петровым. Также необходимо отметить работы французских ученых. Началом электродинамики можно считать открытие А.М. Ампером явления взаимодействия между токами, а также между током и магнитным полем. Вращение магнита вблизи вращающейся медной пластинки, которое обнаружил Д.Ф. Араго впоследствии послужило идеей создания электродвигателей переменного тока с вращающимся магнитным полем. Количественную связь между магнитным полем и электрическим током установили Ж. Био и Ф. Савар, а математически оформил это открытие П. Лаплас.

На втором этап развития электротехники (1831–1870 гг.) были сформулированы основные законы электротехники; намечены пути практического использования электроэнергии для освещения (дуговые лампы), электропривода, электролиза, электросвязи, гальванопластики и других отраслей хозяйства, разработаны конструкции электродвигателей и генераторов электромеханического типа. Среди наиболее яркие открытий тех лет: закон электромагнитной индукции, который стал фундаментом современной электротехники (1831 г. М. Фарадей и Д. Генри независимо друг от друга); «правило Ленца» и принцип обратимости электрических машин (Э.Х. Ленц в 1833 г.); установление количественных характеристик тепловой работы электрического тока («закон Джоуля-Ленца», 1841–1842 гг.), законы электрических цепей («закон Ома» (1826 г.); первый и второй законы Кирхгофа (1847 г.) и др.

Крупнейшим обобщением второго этапа развития электротехники явилась электромагнитная теория, разработанная английским ученым Д.К. Максвеллом (1873 г.), который математически сформулировал законы электромагнитного поля в виде известных уравнений, носящих его имя.

Третий этап развитая электротехники (1870–1891 гг.) характеризуется началом практического использования электроэнергии. Были созданы и внедрены в промышленность

генераторы постоянного тока, а также получили развитие линии электропередачи постоянного тока.

Большой вклад в развитие электроосвещения внесли отечественные инженеры. В 1872 г. А.Н. Лодыгин изобрел лампу накаливания (в последствии её усовершенствовал знаменный американский изобретатель Т.А. Эдисон), а в 1876 г. П.Н. Яблочков создал совершенную дуговую лампу с параллельно расположенными электродами (без регулятора). Электросварка также является изобретением российских инженеров, которую реализовали: в 1882 г.– Н.Н. Бенардос угольным электродом, а Н.Г. Славянов в 1886 г. – металлическим. Были успехи и в развитии средств связи: в 1876 г. немецкий инженер А. Белл создал телефон, а в 1895 г. А.С. Попов изобрёл радио. Предпосылкой к этим открытиям послужили работы немецкого физика Г. Герца, экспериментально доказавшего в 1888 г. существование электромагнитных волн.

Электричество пришло на транспорт. В 1879 г. В. Сименс, немецкий инженер, на Берлинской промышленной выставке демонстрировал первую электрическую железную дорогу, а в 1882 г. в Германии был пущен первый троллейбус. В России (второе место в Европе после Германии) первый трамвай был пущен в 1892 г. в Киеве.

В 1880 г. русский ученый Д.А. Лачинов теоретически обосновал возможность рациональной передачи электроэнергии на повышенном напряжении на дальние расстояния.

Следует отметить, что первые электроэнергетические объекты тех лет имели относительно низкие технические параметры. Так, например, линия электропередачи постоянного тока (2000 В, 57 км), которую построил в 1882 г. французский инженер М. Депре, с использованием обычных телеграфных проводов имела КПД передачи порядка 22 %. Тем не менее это было достижением исторической важности.

Началом четвертого этапа развития электротехники можно считать 1891 г., когда были созданы промышленные образцы трехфазных электрических машин переменного тока: синхронный генератор, трансформатор и асинхронный двигатель. Это открыло путь к передаче электроэнергии на значительные расстояния. Теоретическими предпосылками перехода на переменный ток послужили работы итальянского физика Г. Феррариуса, открывшего в 1868 г. явление вращающегося магнитного поля, и изобретения сербского электротехника Н. Тесла. Тесла работал в компании Т. Эдисона (США) и создал двухфазную систему токов при сдвиге фаз на 90 электрических градусов. Двухфазная система длительное время

конкурировала в США с трехфазной системой токов.

Однако действительным отцом-основателем современной промышленной системы трехфазного переменного тока во всем мире принято считать М.О. Доливо-Добровольского. Русский по происхождению, он был вынужден скрываться от преследования властей, и поэтому работал в Германии. В 1891 г. Доливо–Добровольскиий совместно с немецким инженером Брауном построили трехфазную ЛЭП от ГЭС в г. Лауфен до месторасположения международной электротехнической выставки во Франкфурт-на-Майне протяженностью 170 км. Опытная электропередача с линейным напряжением 16 кВ от трёхфазного синхронного генератора мощностью 300 л.с. доказала преимущества трёхфазной системы: её КПД достиг 77,4 %. На выставке впервые зажглись 1000 ламп накаливания, а асинхронный двигатель мощностью 100 л.с. привёл в действие декоративный водопад.

Это событие можно считать началом зарождения использования трёхфазного тока, вызвавшего переворот в промышленности, транспорте и быту, а эти работы дали толчок к строительству мощных электростанций районного типа, способных питать несколько потребителей (промышленный район). За два-три года были разработаны и созданы все основные элементы трёхфазной системы электроснабжения: синхронный генератор, повышающий и понижающий трансформаторы, трех- и четырехпроводная линии электропередачи, асинхронный двигатель с короткозамкнутым и фазным ротором. Трехфазная система электроснабжения переменного тока получила всеобщее признание и началось внедрение электрификации во все сферы деятельности человека.

Первая трехфазная установка в Америке (Калифорнии) была пущена в 1893 г. В 1896 г. вступила в строй первая гидроэлектростанция практически современного типа на Ниагарском водопаде (рис. 1). На станции были установлены три турбины переменного тока по 5 тыс. л.с. каждая. Динамо-машины вырабатывали ток на напряжении 2000 В. Для передачи электроэнергии потребителю напряжение поднималось трансформаторами до 50 кВ. Электропередача осуществлялась на расстоянии до 55 км.

Семидесятые годы XIX столетия ознаменовались бурным развитием электротехники в России. В Петербурге и Москве работали выдающиеся пионеры мировой электротехники. Довольно значительная группа членов Русского технического общества (Ф.К. Величко, П.К. Яблочков, В.Н. Чиколев, Д.А. Лачинов,

А.Н. Лодыгин и др.) в конце 1897 г. добилась учреждения в составе Общества специального Электротехнического отдела для объединения научной, изобретательской и пропагандистской деятельности русских электротехников.

Рисунок 1 – Машинный зал первой в мире ГЭС переменного тока на реке Ниагара, «ГЭС Адамса», 1896 год

Учредительное собрание Электротехнического отдела состоялось 11 января 1880 г., а с июня 1880 г. стал издаваться журнал «Электричество». В том же году в Петербурге открылась первая в мире специализированная электротехническая выставка. Журнал «Электричество», начиная с первого номера, широко знакомил инженерную общественность России с развитием отечественной и зарубежной электротехники.

В 1886 г. в Петербурге было учреждено промышленно-коммерческое «Общество электрического освещения» – первое предприятие в России для производства электроэнергии, имевшее главной целью электрическое освещение улиц и частных помещений в Петербурге и Москве. Через 10 лет в связи с бурным развитием электротехники электроэнергию стали использовать и для других технических целей.

Первым электрифицированным предприятием в России был Новороссийский зерновой элеватор, на котором в 1893 г. была применена трехфазная система электроснабжения. Общая мощность генераторов составила 1200 кВА, а трехфазные асинхронные двигатели имели мощность 3,5–15 кВт.

Электрификация Петербурга, Москвы, Киева, Риги и других крупных городов началась в 1897 г. Первая промышленная гидроэлектростанция в России мощностью 300 кВт была построена в 1895–1896 гг. под руководством инженеров В.Н. Чиколева и Р.Э. Классона для электроснабжения Охтинского порохового завода в

Петербурге. В 1899 г. были введены в эксплуатацию ГЭС на Бакинских нефтяных камнях и кавказском курорте Боржоми. В 1909 г. закончилось строительство крупнейшей в дореволюционной России Гиндукушской ГЭС мощностью 1350 кВт не реке Мургаб.

Особое место не только в отечественной, но мировой истории электроэнергетики занимает Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО), который был принят 22 декабря 1920 г. на VIII Всероссийском съезде советов. Многочисленные публикации на эту тему основное внимание уделяют количественным показателям: сколько электростанций, ЛЭП и т.п. было построено в рекордные сроки. В рамках настоящей работы хочется поделиться информацией о том, что же именно представлял этот план. В 1955 г. к 35-летию принятия плана было выпущено репринтное (идентичное оригиналу) издание. Этот действительно фундаментальный труд на 600 стр. формата А4, в котором представлен детальный анализ энергетических, людских, природных и т.п. ресурсов всей бывшей Российской империи [3]. Следует отметить, что по информации участников тех событий, работы над планом электрификации страны начались еще в 1905 г. [4].

Основным, революционным моментом этого плана было решение о переходе от автономных, маломощных электростанций, к строительству крупных электростанций, которые совместно с электрическими сетями были предназначены для электроснабжения целых промышленных районов. Так появился тип электростанций с аббревиатурой ГРЭС.

Реализация плана ГОЭЛРО стала основой для индустриализации страны.

К концу XX века в нашей стране была создана мощная электроэнергетическая отрасль, отличительными чертами которой является наличие гомогенных (однородных) энергосистем и их объединений на основе концентрации производства электроэнергии в местах расположения энергоресурсов и концентрации потребителей. Структурно генерация представлена электростанциями (ТЭС, ГЭС, АЭС) большой мощности (от 1000 до 6000 МВт). Развиты транзитные и распределительные сети высокого напряжения (от 6 кВ до 1150 кВ). Управление полностью централизовано. Действуют строгие технические правила присоединения и участия в регулировании режима. Создана отечественная электротехническая промышленность.

Энергетика – монопольная сфера бизнеса крупных энергокомпаний.

Характерными признаками современного этапа развития мировой

энергетики является переход к интеллектуальной электроэнергетике, созданию «умных электрических сетей», получивший название Концепции «Smart Grid». В отечественной технической литературе необходимость и пути трансформации энергетики на современном этапе подробно освещены в монографии [5].

Термин «Smart Grid» (SG) не имеет общепринятой интерпретации. В переводе с английского Smart Grid - умные сети электроснабжения. Известно несколько вариантов, поясняющих этот термин. Рассмотрим некоторые из них.

Министерство энергетики США позиционирует SG как «полностью автоматизированную энергетическую систему, обеспечивающую двусторонний поток электрической энергии и информации между электрическими станциями и устройствами повсеместно. Smart Grid за счет применения новейших технологий, инструментов и методов наполняет электроэнергетику «знаниями», позволяющими резко повысить эффективность функционирования энергетической системы...» [5].

Трактовка Европейской технологической платформы SG – это: «электрические сети, удовлетворяющие будущим требованиям по энергоэффективному и экономичному функционированию энергосистемы за счет скоординированного управления и при помощи современных двусторонних коммуникаций между элементами электрических сетей, электрическими станциями, аккумулирующими устройствами и потребителями» [1].

Согласно [6]: «Умные сети электроснабжения (англ. Smart Grid)— это модернизированные сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющие автоматически повышать эффективность, надёжность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии».

Наиболее полно общую идеологию этой концепции, по-видимому, отражает формулировка IEEE (международная некоммерческая, очень авторитетная организация «Институт инженеров электротехники и электроники»): «Smart Grid – это концепция полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системы, имеющей сетевую топологию и включающей в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью информационно-управляющих устройств и систем в режиме

реального времени» [5].

По мнению многих авторов SG по праву может рассматриваться как инновационное направление, способное в перспективе обеспечить коренную модернизацию и развитие электроэнергетического комплекса не только энергетики, но и всех компонентов жизни человека, связанных с потреблением энергии.

Правомерность такого заключения подтверждают масштаб и интенсивность международного сотрудничества в данном направлении, усилия, прилагаемые отдельными странами, достигнутые научные и практические результаты реализации SG.

Все это делает актуальной задачу изучения опыта зарубежных стран и компаний и использования его результатов для организации соответствующей работы в нашей стране.

Последние десятилетия характеризуются бурным развитием техники, экономики и общества, в которых происходят кардинальные изменения (рост численности населения планеты, высокие технологии, глобальное изменение климата и т.п.), влияющие, в том числе, и на энергетический бизнес, предъявляя к нему все новые и новые требования.

Для энергетических компаний одним из наиболее актуальных на сегодняшний день является вопрос определения того, как активно влиять и/или реагировать на изменения: организовать управление изменениями и активно участвовать в формировании собственного будущего или занять пассивную позицию?

К числу наиболее существенных изменений в развитии общества и экономики, влияющих, в том числе на энергетическую отрасль, многие специалисты относят следующие:

1. Дефицит источников электрической энергии.

В прошлом веке рост электропотребления был обусловлен интенсивным ростом промышленности и экономики. Спрос на электроэнергию было легко спрогнозировать, а, следовательно, обеспечить оптимальное планирование развития энергетических объектов.

За последние 10-20 лет ситуация изменилась: появилось множество новых и улучшенных технологий, приспособлений, приборов и инструментов, которые питаются исключительно за счет электрической энергии.

Объемы потребляемой электрической энергии (ЭЭ) стремительно увеличиваются, в том числе и за счет населения. По сравнению с 1970 г. как в России, так и за рубежом, средний размер потребления ЭЭ в быту увеличился примерно вдвое. Сегодня более 15 %

потребления происходит за счет использования новых электробытовых приборов, которые не применялись до 1990 года. Это создает перегрузки на тех участках сети, на которых еще 15 лет назад это было невозможно.

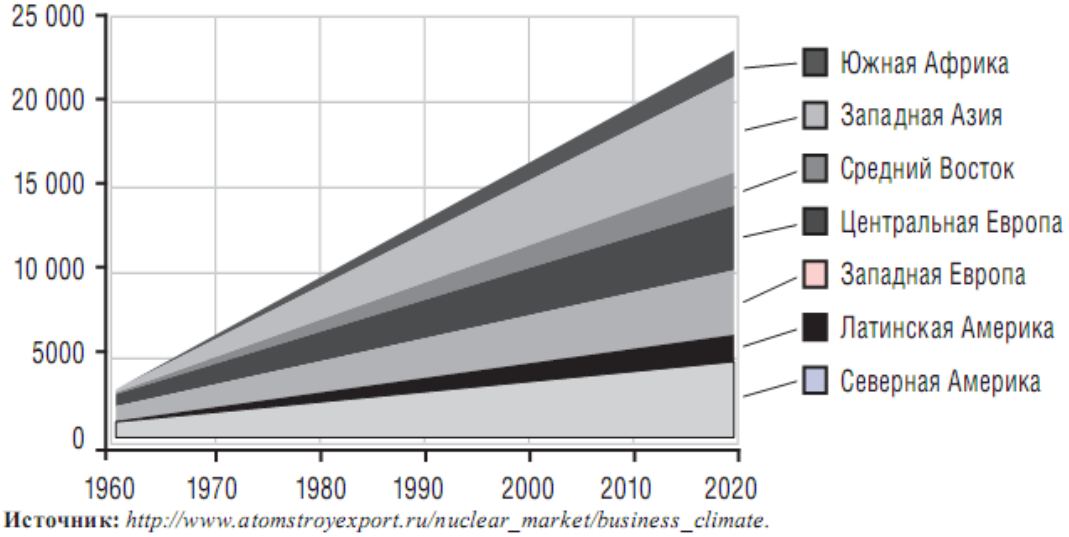


Рисунок 2 - Потребление электроэнергии в различных регионах мира, трлн. кВт*ч

В ближайшие годы одним из существенных источников роста потребления электрической энергии будет наметившийся переход на электромобили. По озвученным в интернете прогнозам в ближайшие 40 лет потребление энергии в Мире может увеличиться в 3 раза.

2. Рост требований по надежности электроснабжения.

Потребители предъявляют все более высокие требования к надежности и качеству электроснабжения. Не так давно вопрос качества электроснабжения был проблемой только для отдельных категорий крупных промышленных потребителей. Сегодня проблему качественного электроснабжения поднимают уже все потребители. Население и коммунальные потребители выражают беспокойство, обусловленное аварийными отключениями, что наглядно демонстрирует действительно недостаточно высокое качество электроснабжения.

По мнению ряда зарубежных экспертов, в ближайшие 20 лет качество электроснабжения станет самой большой проблемой в отрасли [5].

К другим причинам необходимости модернизации энергетики можно отнести: необходимость снижения потерь; старение инфраструктуры (оборудования, сооружений и т.п).

3. Постоянное повышение стоимости электрической энергии во всем мире.

Несмотря на обещания политиков по сдерживанию тарифов на электрическую энергию, они продолжают расти и в России, и за рубежом (рис. 3).

Рисунок 3 – Прогноз роста среднемировых тарифов на электроэнергию

4. Старение и нарастающий дефицит квалифицированных кадров в энергетической отрасли.

В большинстве развитых стран наблюдается резкий отток квалифицированных кадров, вызванный тем, что работники отрасли, которые участвовали в создании существующих энергетических систем, массово выходят на пенсию, а система высшего образования и переподготовки кадров в настоящее время во многом не отвечает требованиям развития отрасли и не позволяет обеспечить в должной мере энергетические компании высококвалифицированными кадрами.

5. Рост требований заинтересованных сторон — стейкхолдеров, к результатам деятельности энергетических компаний.

Борьба с естественными монополиями, требования рынка привели к появлению рядом с энергетическими компаниями многих заинтересованных сторон и структур - стейкхолдеров: акционеров, законодателей, регулирующих органов, потребителей, общественных и экологических организаций.

Суть их требований: повышение надежности электроснабжения, в том числе диверсификация энергоснабжения, снижение операционных издержек, повышение доходов инвесторов, снижении

численности персонала и др.

6. Требования экологической и промышленной безопасности функционирования энергетических объектов.

Перечисленные выше катализаторы (1-5) изменений оказывают влияние, как на сферу генерации электрической энергии, так и на деятельность электросетевых и сбытовых компаний, выступающих главными игроками, которые балансируют спрос и предложение.

Результаты такого влияния проявляются в изменении климата и глобальном потеплении, росте ущерба третьим лицам и окружающей среде, загрязнении и истощении природных ресурсов, повышении инвестиционных рисков и т.д.

Традиционная энергетика зачастую использует технологии, связанные с большим негативным влиянием на экологию.

7. Снижение общесистемных затрат.

Внедрение электростанций на базе возобновляемых источников энергии все более расширяется. Согласно закону о зеленом тарифе (принят во многих странах для стимулирования «зеленой энергетики») вырабатываемая ими электроэнергия должна вливаться в общую сеть. В своем нынешнем состоянии большинство магистральных и распределительных сетей не в состоянии обеспечить эффективное подключение большого количества малых электростанций (распределенная генерация), работающих на возобновляемых источниках энергии. Вырабатываемая этими электростанциями энергия на сегодня, как правило, не обеспечена должным образом диспетчерским управлением, а мощность отдаваемой в сеть электроэнергии зависит от природных условий либо от желания владельца электростанции.

Несмотря на то, что распределенные источники могут произвести существенную долю электроэнергии в энергосистеме, при отсутствии эффективного управления электрическими сетями они не смогут заменить существующие классические электростанции. Последние должны будут продолжать в полном объеме оказывать системные услуги (регулирование частоты и напряжения, обеспечение резервов мощности и пр.), требуемые для поддержания надежности электроснабжения.

По ряду причин ожидается значительный рост мощностей за счет распределенной генерации. При сохранении существующего порядка в системе управления сетями ввод новых мощностей за счет распределенной генерации потребует роста мощности как магистральных, так и распределительных сетей.

Снижение общесистемных затрат возможно только при

интегрировании традиционной и возобновляемой энергетики в единую «умную сеть».

В настоящее время Министерством Энергетики России совместно с Институтом энергетических исследований РАН, Объединенным институтом высоких температур РАН, НИУ «Высшая школа экономики» и заинтересованными компаниями ТЭК разработана концепция проекта «Интеллектуальная энергетическая система России» (ИЭСР) и проект «дорожный карты». Это документы, которые определяют шаги по преобразованию существующей энергосистемы в соответствии с идеологией энергетики будущего [6].

С помощью ИЭСР планируется развивать микросети, системы измерения, учета и управления нагрузкой, а также распределенную генерацию энергии. Так, адаптация системы и механизмов регулирования рынков электроэнергии позволит отдавать потребителям излишки выработанного электричества, а внедрение «умных» сетей и цифровых подстанций уменьшит количество аварий.

Более 60 лет факультет интеллектуальной электроэнергетики и робототехники (ФИЭР) Донецкого национального технического университета ведет подготовку инженерных кадров для энергетических предприятий Донбасса. На основе современных тенденций развития энергетики на кафедрах факультета модернизирован учебный процесс, ориентированный на цифровые системы управления и регулирования. Разработаны новые теоретические и специальные курсы, созданы новые лаборатории, оснащенные оборудованием ведущих зарубежных фирм. Это позволило организовать теоретическую и практическую подготовку будущих энергетиков в сфере проектирования, программирования, информационно-измерительной техники и визуализации цифровых систем автоматизации производства и робототехники. Получение классического электротехнического образования обучающимися сочетается с изучением новейших технологий – Smart Grid, возобновляемая энергетика, 3D-печать и других.

В 2023 г. на базе кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» (ЭПГ) открыта секция инжинирингового центра «Политехник» для выполнения научно-исследовательских работ и проведения экспертиз состояния электрооборудования, энергосбережения и качества электроэнергии. Инжиниринговый центр располагает таким оборудованием: портативный анализатор электрической энергии MI2892; комплекс программно-технический

измерительный РЕТОМ-71, преобразователь частоты векторный А650 15 кВт и др. (до 8 единиц).

Кафедра ЭПГ имеет персональную лицензию на использование новейших программных продуктов компаний CSoft и Nanosoft (г. Москва) в области расчета и проектирования систем электроснабжения с выдачей сертификата пользователя.

Интенсивное развитие робототехники и электромобилестроения привело к появлению на ФИЭР новых направлений подготовки, таких как «Мехатроника а робототехника» и «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов». На базе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» были созданы новые учебные лаборатории, подверглись глубокой модернизации «классические» лабораторные стенды. Проведена работа по разработке нового методического обеспечения общетехнических и специальных дисциплин.

Используя теоретические знания по технологиям сетевого и беспроводного доступа, студенты получают практические навыки управления разнообразными по функциональным возможностям реальными роботизированными комплексами. На базе платформ STM, Arduino они изучают системы перемещения робота по различным траекториям, цифровые системы технического зрения, алгоритмы работы микроконтроллеров, особенности регулирования скорости и положения различных типов манипуляторов.

Подготовка инженерных кадров в области проектирования и эксплуатации электротранспортных средств направлена на углубленное изучение интеллектуальных систем управления транспортных машин, современных промышленных сетей сбора данных и обмена информацией, разработки, функционирования и обслуживания узлов и агрегатов электротранспортных средств, зарядных станций, беспилотного транспорта.

Все вышеизложенное позволит кафедрам факультета интеллектуальной электроэнергетики и робототехники обеспечить качественную, опережающую теоретическую и практическую подготовку инженерных кадров для энергетической отрасли Донбасса по цепочке «наука –образование – экономика».

Выводы

Для кардинальных преобразований в электроэнергетике под влиянием складывающихся условий необходимо иметь в виду следующее:

1. Факторы технологического прогресса: появление и развитие новых технологий, устройств и материалов (в том числе в других отраслях), потенциально применимых в сфере электроэнергетического производства, и в

первую очередь нарастающие темпы и масштабы развития компьютерных и информационных технологий; интенсивный рост количества малых генерирующих источников (в первую очередь возобновляемых); общая тенденция к повышению уровня автоматизации процессов.

2. Факторы повышения требований потребителей: повышение требований к набору и качеству услуг; ожидание снижения цен на услуги отрасли; требования к информационной прозрачности взаимоотношений субъектов электроэнергетических рынков с потребителями.

3. Факторы снижения надежности: нарастающий уровень износа оборудования; необходимость массовых инвестиций в реновацию основных фондов; снижение общего уровня надежности электроснабжения; высокий уровень потерь при преобразовании, передаче и распределении электроэнергии.

4. Факторы изменения рынка: изменение внутренних условий функционирования электроэнергетических рынков; экономическая нестабильность; реформирование организации функционирования электроэнергетики в большинстве стран; развитие рынка квот на экологически опасные выбросы; продолжительный инвестиционный и жизненный цикл активов и отрасли в целом, составляющие от 15 до 40 лет.

5. Факторы повышения требований в сфере энергоэффективности и экологической безопасности: необходимость снижения воздействия на окружающую среду; необходимость повышения энергоэффективности и энергосбережения.

С точки зрения перспектив подготовки инженерных кадров:

6. Факультет интеллектуальной электроэнергетики и робототехники Донецкого национального технического университета идет в ногу со временем, обучая студентов с учетом современных тенденций развития электроэнергетики, робототехники и электромобилестроения.

Перечень ссылок

1. Системы электроснабжения. Часть 1: Основы электроснабжения: курс лекций / А. М. Ершов. – Челябинск: Издательский центр. ЮУрГУ, 2017. – 245 с.

2.. Дьяков, Б.А. Свет жизни / Б. А. Дьяков, К. Д. Лаврененко. – Москва, 2020. – 573 с.

3. План электрификации РСФСР (план ГОЭЛРО). 2-е издание. — М.: Государственное издательство политической литературы, 1955. – 667 с.

4. Кобец, Б.Б., Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. .- М.: ИАЦ Энергия,2010.- 208 с.

5. Умные сети электроснабжения. – Режим доступа https://ru.wikipedia.org/wiki/Умные_сети_электроснабжения. – Загл. с экрана.

6. Приоритетное направление российской энергетики — ее интеллектуализация. – Режим доступа https://integration-ru.com/sobyitiya-v-mire/sobyitiya/naczionalnyij-proekt-%C2%ABintellektualnaya-energeticheskaya-sistema-rossii%C2%BB. – Загл. с экрана.

УДК: 621.311.25

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ СИНХРОННЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ МИНИ ТЭЦ, РАБОТАЮЩИХ НА МЕСТНОМ ТОПЛИВЕ

М.Ю. Р умянцев[1], **А.В. Берилов**[1], **А.В. Быков**[2]
[1] ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация
[2] ФГБОУ «Федеральный институт промышленной собственности», г. Москва, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы построения мини ТЭЦ на основе микротурбин для систем малой распределённой энергетики, использующих местные или возобновляемые виды топлива. Для таких систем в НИУ «МЭИ» разработаны магнитоэлектрические генераторы со сверхвысокой частотой вращения (десятки-сотни тысяч об/мин.) на бесконтактных лепестковых газодинамических подшипниках.

The article discusses the issues of constructing mini CHPs based on microturbines for small-scale distributed energy systems using local or renewable fuels. For such systems, the National Research University "MPEI" has developed ultra-high speed (tens to hundreds of thousands rpm) permanent magnet generators on non-contact foil gas-dynamic bearings.

Ключевые слова: *малая распределённая энергетика, мини ТЭЦ, микротурбина, высокоскоростной турбогенератор, постоянные магниты, лепестковые газодинамические подшипники, местное возобновляемое топливо.*

Keywords: *small distributed energy systems, mini CHPs, microturbine, high speed generator, permanent magnets, foil gas-dynamic bearings, local renewable fuel.*

Развитие промышленности и транспорта, урбанизация территорий, повышение «комфортности» жизни населения предполагают неуклонный рост производства и потребления энергии [1]. Более того, энергетическая безопасность страны предполагает внедрение новых эффективных систем энергоснабжения (СЭС), в том числе, малой мощности для обеспечения жизнедеятельности любых автономных, а также удалённых от централизованных энергосистем объектов.

Решение указанной задачи возможно, в частности, путём реализации концепции децентрализованного энергоснабжения в системах

малой распределённой энергетики, согласно которой агрегаты выработки тепловой и электрической энергии должны быть максимально приближены к потребителям. Современный этап развития энергетики характеризуется всё более широким использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые часто называют альтернативными или «зелёными». Чаще всего ВИЭ связывают с созданием электростанций, использующих энергию солнца и ветра, во многих странах мира «зелёная» энергетика на основе ветрогенераторов и фотоэлектрических преобразователей получает приоритетную поддержку и финансирование со стороны государства [2].

Вместе с тем, простое копирование иностранного опыта не может быть признано единственно правильным путём развития энергетики России, любое решение должно сопровождаться скрупулёзным анализом экономических, технических, социальных и экологических и других последствий внедрения «зелёной» энергетики.

С другой стороны, в области малой, автономной генерации в индустриально-развитых странах мира активно наращивается использование так называемых микротурбинных энергоустановок или просто микротурбин. Эти установки, появившись в конце 60-х годах прошлого столетия в США и СССР в качестве элемента СЭС космических аппаратов, к концу XX века начали широко применяться в наземной энергетике [3]. Мощность современных микротурбин составляет от долей до сотен кВт, они используются в быту, в коммунальном хозяйстве, в промышленности и на транспорте. При столь малой мощности, обеспечить приемлемую эффективность установок удаётся лишь при высоких и сверхвысоких частотах вращения турбин (от 50 до 200 тысяч об/мин), что, в конечном счёте, определяет все тактико-технические характеристики микротурбин. При этом диаметр рабочего колеса турбины, вследствие малой мощности и высоких частот вращения получается небольшим, от 25 мм при электрической мощности 1…1,5 кВт до 200 мм при 200 кВт. Несмотря на то, что используемые в микротурбинах рабочие циклы отличаются большим разнообразием, практически во всех этих установках реализован агрегатный принцип построения, при котором электромеханический и тепловой преобразователи энергии, а часто и теплообменный аппарат с камерой сгорания (для газовых турбин), объединены в одно компактное устройство. При этом рабочее колесо турбины расположено на общем валу с индуктором электрического генератора, поэтому в агрегатах отсутствуют какие либо механические передачи и имеется только одна движущаяся деталь - быстровращающийся ротор. При таком приводе генератора его главные размеры также оказываются чрезвычайно

небольшими. Для обеспечения надёжной и эффективной работы высокоскоростных агрегатов необходим тщательный выбор подшипников и типа генератора. Мировой опыт [3, 4] показывает, что наилучшими характеристиками для этих целей обладают бесконтактные лепестковые газодинамические подшипники (ЛГП) и синхронные магнитоэлектрические генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). В качестве примера на рисунке 1 показана конструкция газового микротурбины С30, мощностью 30 кВт и частой вращения 96000 об/мин, производства фирмы Capstone (США) [4].

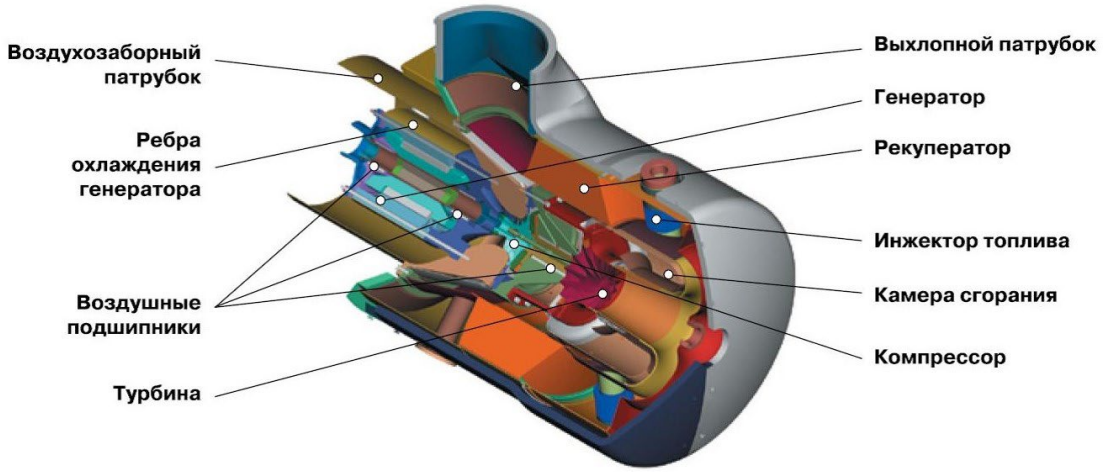


Рисунок 1. Конструкция микротурбинного агрегата С30 [4]

Отсутствие редуктора, наличие всего лишь одной вращающейся детали, сверхвысокие частоты вращения определяет надёжность микротурбин, их малую массу и габарит. Использование ЛГП позволяет исключить из состава агрегата систему масляной смазки, существенно повысить ресурс энергоустановок, упростить и удешевить их эксплуатацию. Формирование выходного напряжения заданного качества обеспечивается эффективными электронными преобразователями, обладающими при современном уровне развитии полупроводниковой элементной базы КПД до 97…98%. Микротурбины имеют единичную мощность до 250 кВт и блочное исполнение, установки сверхмалой (0,5-10 кВт) мощности легко транспортируются вручную. Кроме того, микротурбины с лёгкостью допускают объединение в кластеры, что позволяет создавать СЭС мощностью до нескольких МВт.

При проектировании микротурбин разработчикам приходится решать ряд сложных, комплексных задач, таких как: выбор схемы установки и параметров рабочего цикла; выбор рабочего тела; расчёт и обеспечение теплового режима работы агрегата и ЭЛП; обеспечение механической прочности ротора в целом и ПМ, в частности; разработка конструкции и компоновка агрегата и т.д.

В России микротурбины не производятся, все установки подобного класса являются импортными [3-5]. В современных условиях применение импортного оборудования нежелательно не только ввиду санкций, но и из-за высоких затрат на его эксплуатацию и ремонт. Кроме того, все импортные микротурбины рассчитаны на использование в качестве топлива природного газа, а этим топливом обеспечены далеко не все регионы РФ. Выполняются импортные установки по технологии газотурбинных двигателей с интегрированными в агрегат камерой сгорания и рекуперативным теплообменником (рис. 1). Температура газа на входе в турбину превышает 800 ^{o}C, поэтому приходится применять жаропрочные сплавы и высокотемпературную керамику, что определяет высокую стоимость изготовления и ремонта проточной части агрегатов. Также опыт эксплуатации микротурбин в нашей стране показал их высокую чувствительность к чистоте и качеству очистки топлива.

Проектные и конструкторские расчёты, выполненные в НИУ «МЭИ» показали, что для создания надёжных, удобных в эксплуатации, обслуживании и ремонте и доступных по стоимости отечественных микротурбинных энергоустановок, целесообразно их приводную часть выполнять на основе паровых турбин [5]. В отличие от газовых, движущиеся части паровых турбин, работают в менее агрессивной среде и при существенно меньших рабочих температурах. Паровой котел, снабжающий турбину паром, может работать на газе, мазуте, угле, древесине, торфе, т.е. практически на любом местном, доступном топливе. Важно отметить, что наша страна располагает огромными запасами древесины (более 20% мировых запасов) и торфа (до 60% мировых запасов), эти виды топлива являются возобновляемыми (т.е. могут быть отнесены к ВИЭ) и при этом абсолютно доступными и дешёвыми. Кроме того, наша страна занимает второе место в мире по подтверждённым разведанным запасам угля и по заверениям специалистов угольной отрасли, при нынешних темпах добычи, эти запасы являются неисчерпаемыми. На рисунке 2 приведена функциональная схема, разработанной в МЭИ мини ТЭЦ, работающей по водяному или органическому циклу Ренкина с использованием местных, низкореактивных видов топлива.

Паротурбинные энергоустановки можно использовать в уже существующих котельных, для их производства не требуется применение дорогостоящих и труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные никельсодержащие сплавы, керамика и т.д. При этом органический цикл Ренкина является чрезвычайно перспективным для

использования в мини ТЭЦ и предполагает использование в качестве рабочего тела низкокипящих и незамерзающих веществ типа фреонов.

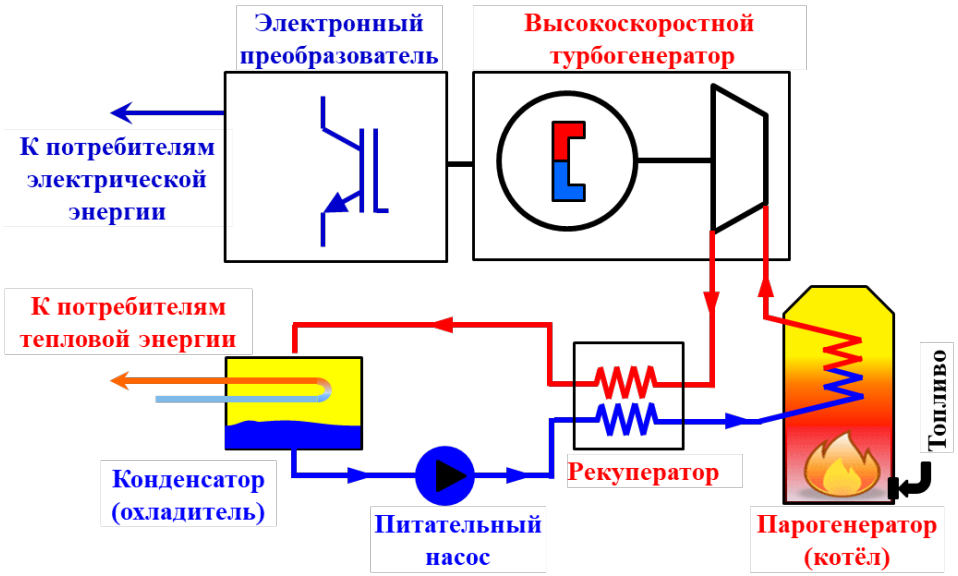


Рисунок 2 Схема паровой мини ТЭЦ на основе цикла Ренкина

Применение органического цикла Ренкина и низкокипящих рабочих тел позволяет использовать для выработки электроэнергии источники низкопотенциального тепла. В этом случае теплообменник парогенератора может быть, например, встроен в обычную русскую печь, размещён на трубе печи-буржуйки, на выхлопной трубе двигателей внутреннего сгорания транспортных средств (автомобилей, тепловозов) или в горячей зоне технологических установок.

В докладе приведены результаты исследования и разработки в НИУ «МЭИ» высокоскоростных турбогенераторов для микротурбинных энергоустановок мощностью 1…130 кВт.

Перечень ссылок

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.

2. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В.Ликутин, О.А.Суржикова, Е.Б.Шандарова. – М.: Энергоатомиздат, 2008.- 231 с.

3. Пожидаев В.М. Микротурбинные электроагрегаты – новое направление в малой энергетике // Академия энергетики № 4, 2005 г., с. 27-33.

4. Микротурбинные установки Capstone // Проспект компании БПЦ Энергетические Системы, 2009 г., 20с.

5. Серков С.А., Грибин В.Г., Румянцев М.Ю. и др. Распределённая генерация тепла и электричества для труднодоступных районов на основе инновационных паровых турбогенераторов // Neftegaz.ru № 1-2, 2015, с. 20-25.

УДК 629.3.064.5

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗВИТИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДОНБАССА

А.М. Фиронов
ООО “АМФ КОНСАЛТИНГ,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,
г. Москва, Российская Федерация

В условиях ведущейся против России экономической блокады и экзистенциональной угрозы, фокус на прорывные, экологически чистые, безопасные и наиболее эффективные транспортные технологии неуклонно растет, что уже сейчас проявляется ростом мирового производства электроприводных транспортных средств и, существенно отличной от традиционных, дорожной и обеспечительной инфраструктуры: электрозарядных станций, «умных дорог», развитых систем коммуникации V2X, ADAS и пр.

In the context of the economic blockade and existential threat being waged against Russia, the focus on breakthrough, environmentally friendly, safe and most efficient transport technologies is steadily growing, which is already manifested by the growth in global production of electric vehicles and, significantly different from traditional, road and support infrastructure: electric charging stations, “smart roads”, developed communication systems V2X, ADAS, etc.

Ключевые слова: *инфраструктура, бесконтактная зарядка, накопители, энергия, электромобиль.*

Keywords: *infrastructure, contactless charging, storage, energy, electric vehicle.*

В современных условиях восстановления и развития производственных мощностей и экономики Донецкой Народной Республики транспорт является одной из важнейших составляющих. В условиях глобализации экономики, фокус на экологически чистые, безопасные и наиболее эффективные транспортные технологии будет неуклонно возрастать, что уже сейчас проявляется взрывным ростом мирового производства электроприводных транспортных средств и существенно отличной от традиционной дорожной и обеспечительной инфраструктуры: электрозарядных станций, «умных дорог», развитых систем коммуникации V2X, ADAS и пр.

Транспортная система Республики сейчас включает в себя

значительную часть транспорта на электротяге: железнодорожный, городской электрический троллейбусный и трамвайный [1] и закупаются карьерные самосвалы на аккумуляторных батареях, а в будущем и карьерные роботы-челноки, беспилотные роботизированные системы управления в концепции «интеллектуальный» карьер ОАО «БелАЗ» [2].

Однако, существующие контактные электротранспортные сети и распространяемые электрозаправки для электромобилей отражают весьма консервативные и традиционные технологические подходы к системам электроснабжения и накопления бортовых аккумуляторов, в которых транспортные средства привязаны к контактным местам и элементам зарядки, что всегда перегружает жизненное пространство людей техническими конструкциями, требует для автономных транспортных средств избыточной массы электробатарей, которые делают электромобили не столь привлекательными в эксплуатационных характеристиках, как экономически и экологически, так и с точки зрения безопасности [3].

Рисунок 1 – Маршруты электротранспорта Донецка

Эти вызовы времени требуют поиска инновационных решений в системах накопления и использования энергии наземных транспортных средств (НТС): более современных и гибких, более комфортных, менее энергозатратных, более эффективных в долгосрочной перспективе на фоне быстроизменяющихся конструкций НТС и мест их эксплуатации.

Наиболее перспективным решением, которое сейчас просматривается в обозримом будущем, является бесконтактная

зарядка автомобилей, как в статическом режиме – на парковке, так и в динамическом – во время движения. При этом, требуется наличие устройства отдающего энергию в дорожном полотне и приемного устройства в автомобиле [4].

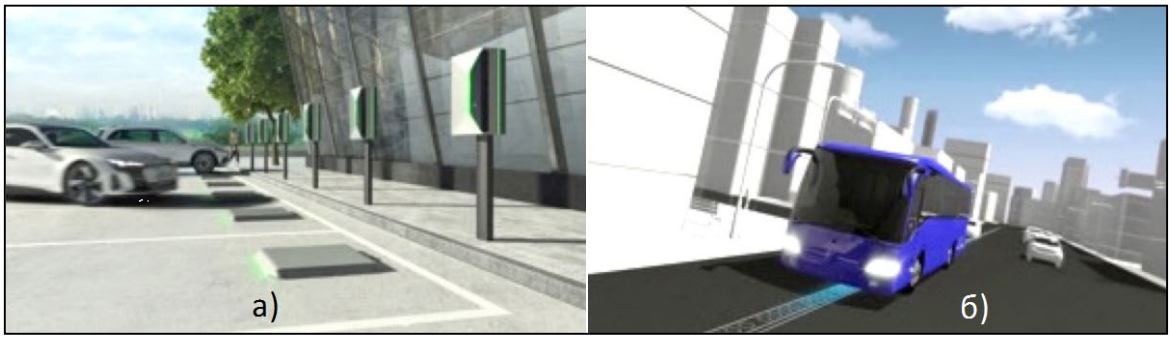


Рисунок 2 – Варианты бесконтактной зарядки: а) статической и б) динамической

Как видно, такой способ размещения зарядных устройств не требует кабельной подвесной инфраструктуры или централизованной специальной заправочной станции, не портит вид улиц и при этом может быть весьма эффективным способом подзарядки транспортных средств в самом широком спектре применения.

Обзор технологий бесконтактных зарядных устройств обобщенно можно представить следующим образом (рис.3).

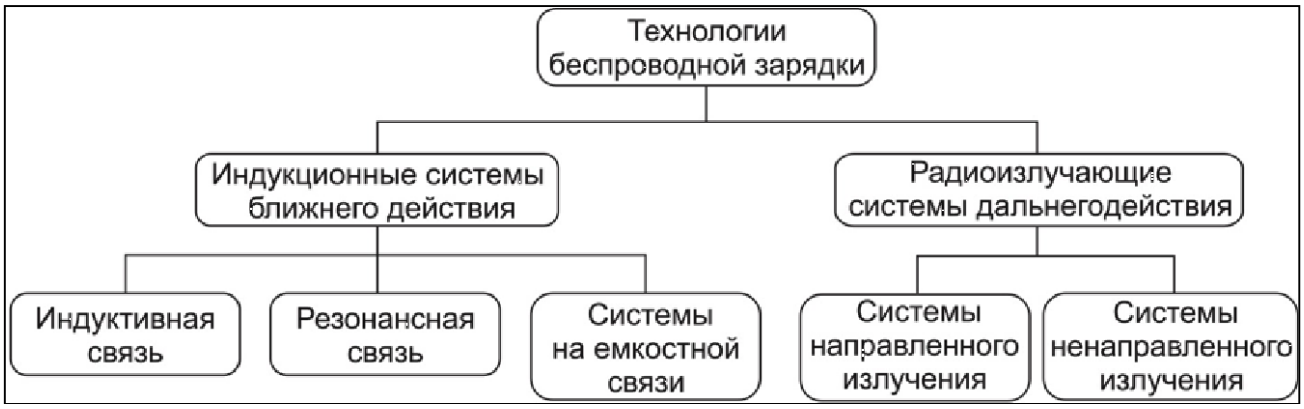


Рисунок 3 – Обзор технологий беспроводных зарядок

В последние годы интерес к этим технологиям растет во всем мире, а география и протяженность тестовых участковых дорог, вовлеченность компаний автопроизводителей и национальных дорожных ведомств указывают на регулярный рост инвестиций и системный подход к внедрению технологий на уровне принятия законов и международных стандартов. Имеются даже свои мировые лидеры развития беспроводных зарядных технологий и есть конкурентная среда на фоне новых появляющихся публикаций,

исследований, патентов, стандартов, бизнес-проектов и натурных образцов. Растет число концепций бесконтактных зарядок.

Рисунок 4 – Примеры реализации технологий беспроводных зарядок

В наиболее общем случае, возможно дооборудовать приемо-передающими устройствами любые массово производимые транспортные средства. Однако, компания АМФ-Консалтинг совместно с Политехническим и Технологическим (МИРЭА) университетами Москвы разрабатывает свою концепцию, в которой дополнительное преимущество бесконтактной зарядки достигается использованием не электролитных литий-ионных или никель-кадмиевых батарей, а применением емкостных накопителей повышенной удельной мощности. Подана заявка на патент и создана действующая модель.

Как показывают результаты испытаний лучших мировых концепций зарядных бесконтактных систем электромобилей, хотя и близких к идеальным условиям, КПД передачи энергии достигает 90% – 95%, что обнадеживает и вселяет уверенность на эффективное применение технологии, и в реальных дорожных условиях. Также имеются сообщения, что скорость прокладки дорожных бесконтактных зарядных линий уже сейчас, в условиях города, может составлять 3÷4-х километров за ночь, а стоимость инновационного дорожного полотна будет лишь на 15-20% выше от стандартных дорожных покрытий [5].

Рисунок 5 – Схема и натурная модель концептуальной технологии беспроводной зарядки

Для возрождающейся промышленной инфраструктуры Донбасса, для заново отстраиваемых городов, тестирование новой технологии транспортной инфраструктуры может стать подходящим испытательным полигоном и катализатором инновационного экологически- и социально-ответственного подхода развития всего региона, в котором экологическую нагрузку традиционно несут горно-добывающая и металлургическая отрасли.

Выводы

– Концепции бесконтактных зарядных технологий позволяют раскрыть потенциал преимуществ электроприводных транспортных средств в городских условиях в полной мере.

– Держатели «ноу-хау» формируют конкурентные компетенции, стандарты, технологии, коммерческую состоятельность и инвестиционную привлекательность.

– Реализуемость концепции «электрических дорог» возможна в высокой степени кооперации с различными структурами научных, образовательных и производственных учреждений. Расширение функционала V2X способствует развитию электромобильности.

– Имеющиеся разработки научных коллективов ФНАЦ ВИМ, МИРЭА, Мосполитеха заявлены к участию в конкурсах ФСИ, РНФ, АСИ на фоне быстро развивающихся проектов Европы, Азии, Америки, также могут быть развернуты к тестовым испытаниям в кратчайшие сроки.

Перечень ссылок

1. Сидоренко К.И. ISSN 2519–2019 Вестник института экономических исследований 2020, № 1(17) г. Донецк, ДНР

2. Делегация ДНР достигла договоренности о сотрудничестве с "Белазом". https://tass.ru/ekonomika/17554333

3. Фиронов А.М. «Статус и тенденции развития электромобилей в мире», Материалы II Международной научно-практической конференции НТИ «Автонет». Екатеринбург, 10 июля 2023 г., «Перспективные транспортные технологии».

4. Фиронов А.М. Международный форум URBAN MOBILITY FORUM 2023. 20.12.2023, г. Москва. Доклад: «Концепции электрических дорог решают проблемы электромобилей. Расширение функционала V2X в развитии электромобильности».

5. Фиронов А.М. Международная научно-практическая конференция. 26 и 27 марта 2024г. Российский рынок систем электрохимического накопления электрической энергии и батарейных систем электротранспорта. Проблемы и перспективы. https://rusbat-expo.com/conference#!/tab/676936431-1.

УДК 658.261

ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ В УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИЯ 4.0. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК

Е.С. Мотовилов, К.А. Варнавский
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф.Горбачева»
г. Кемерово, Российская Федерация

Цифровизация угольной промышленности отрасли рамках «Индустрии 4.0» требует электроснабжения качественной электроэнергией и обеспечение бесперебойного электроснабжения. Что ставит вопрос об энергоэффективности и экологичности внедрения современных IT-технологий на угольных предприятиях.

Digitalization of the coal industry like Industry 4.0 requires high-quality electricity supply and uninterrupted power supply. Which in turn raises the question of energy efficiency and ecology of the implementation of IT technologies at coal enterprises.

***Ключевые слова**: угольная шахта, цифровизация, бесперебойное питание*

***Keywords:** coal mine, digitalization, uninterrupted power source*

Современные тенденции развития угольной промышленности связанны с цифровизацией производственных процессов и внедрением современных IT-технологий связанных с «Индустрией 4.0». В статье, посвященной цифровизации угольной промышленности рассматриваются предложения, связанные с процессами обработки больших массивов данных – BigData и последующее применение искусственного интеллекта [1].

Внедрение IT-технологий в процессе развития потребует наращивания серверных мощностей, отвечающих за обработку данных и корректность выполнения поставленных задач. Требования, предъявляемые к серверным мощностям угольных предприятий будут приближенны к требованиям центров обработки данных (ЦОД). ЦОД имеют определенные требования качеству электроэнергии (ЭЭ), которые представляют собой минимальные отклонения от номинальных значений и требования по обеспечению отказоустойчивости.

В современных ЦОД более 60% ЭЭ потребляется серверными процессорами. При этом потребление ЭЭ является не линейным и зависит от загруженности серверного оборудования [2]. На рисунке 1 представлен график зависимости потребляемой ЭЭ процессора от нагрузки на него.

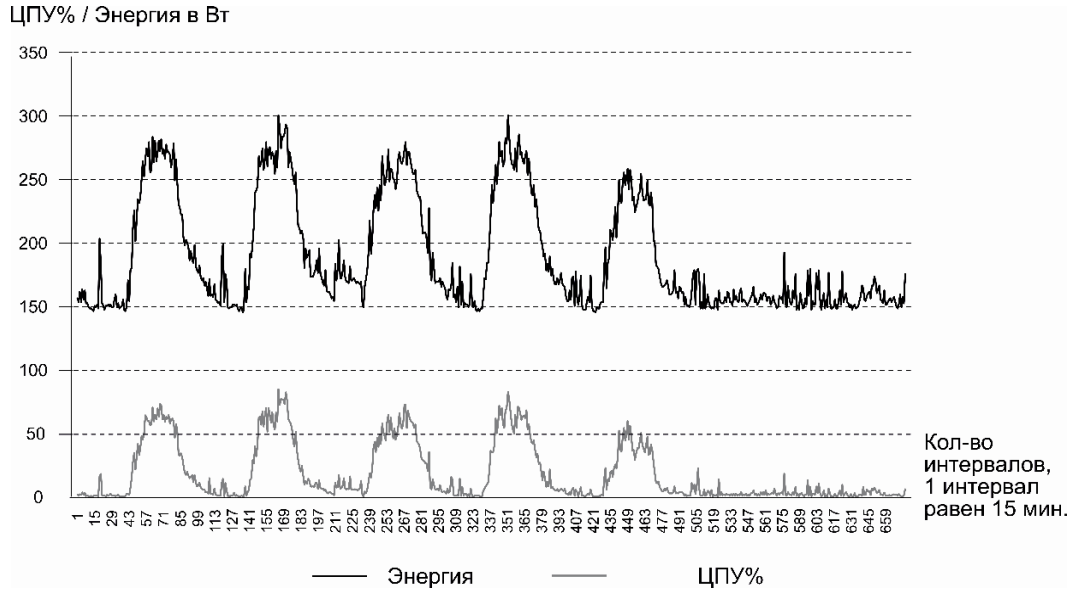


Рисунок 1 – График зависимости потребления энергии процессором от нагрузки [2]

Горнодобывающее и транспортное оборудование имеют большое количество частотных приводов на горных предприятиях, следовательно, график потребления ЭЭ серверным оборудованием будет иметь гораздо большую нелинейность. Также использование большого количества нелинейных электропотребителей будет отдавать в сеть высшие гармоники из-за использования частотных приводов, что может негативно сказаться на работоспособности серверного оборудования. Более выражено это будет на угольных шахтах, потому что ведение подземных работ помимо отработки угольного пласта включает в себя множество вспомогательных процессов. Угольная шахта – это объект повышенной опасности, следовательно, требования к внедряемым IT-технологиям будут высокие.

Учитывая объемы данных и необходимую скорость их обработки, количество и качество потребляемой ЭЭ, необходимое для корректной работы серверных мощностей угольных предприятий потребуется установка источников бесперебойного питания (ИБП), целью которых будет являться обеспечение бесперебойной и стабильной работы серверного оборудования на угольных предприятиях.

На сегодняшний день известны 2 типа (ИБП) – это статические и динамические. Основной задачей ИБП является бесперебойное электроснабжение и фильтрация электроэнергии приходящей потребителю, дополнительно ИБП могут выступать в роли источника резервного питания.

В статических ИБП роль накопителя энергии выполняют аккумуляторные батареи, которые подзаряжаются в процессе работы, а фильтрация электрической энергии происходит при помощи двойного преобразования [3]. Структурная схема статического ИБП представлена на рисунке 2.

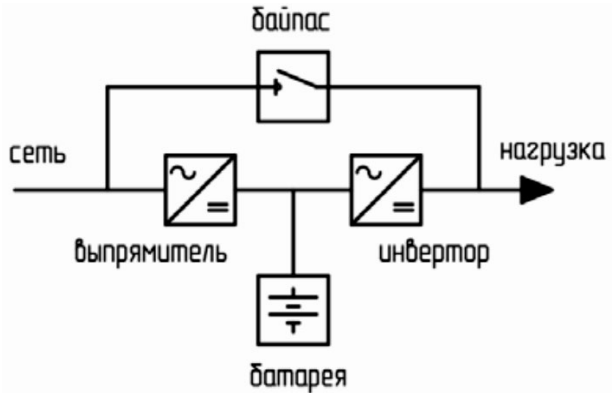


Рисунок 2 –Структурная схема статического ИБП[3]

В динамических ИБП в роли накопителя выступает массивный маховик, а задачу фильтрации ЭЭ выполняет связка дросселя и синхронного генератора (мотор-генератора). Структурная схема динамического ИБП представлена на рисунке 3.

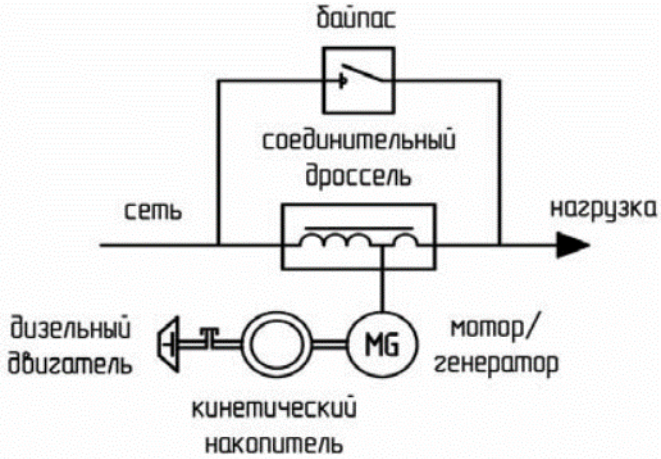


Рисунок 2 – Структурная схема динамического ИБП [3]

Схема динамического ИБП отличается от статического использованием меньшего количества компонентов системы, что

делает такую схему более надежной. Динамические ИБП способны выдерживать более высокие токи короткого замыкания относительно статических ИБП [3], что в условиях цифровизации угольных предприятий позволит повысить отказоустойчивость серверного оборудования, следовательно повысить уровень безопасности ведения горных работ.

Если с одной стороны статические ИБП являются более экономичным вариантом с точки зрения установки и модульности, но менее устойчивым к токам короткого замыкания и мощностью до 1 МВт, то динамические ИБП наоборот – являются менее экономичными в установке, но способны работать с менее стабильной нагрузкой и большими мощностями – более 1 МВт [3].

Однако в современном мире актуальным вопросом является вопрос об энергоэффективности современных ЦОД, так как в среднем они потребляют около 3-5% производимой ЭЭ в мире [4], но при этом не всегда отдают полную мощность.

Шахтный метан, который выделяется при добыче угля, также является одной из причин ухудшения экологической обстановки, так как влияет на парниковый эффект и разрушение озонового слоя. На его долю приходится 14% антропогенных выбросов в атмосферу, 6% на угольные шахты, что составляет около 400 млн тонн CO_2-экв.год [5].

Следовательно, для уменьшения выбросов шахтного метана в атмосферу, более благоприятного влияния на экологию и сокращения расходов на электроснабжение серверных мощностей угольных предприятий предлагается использование ИБП, состоящих из газопоршневой установки (ГПУ) на шахтном метане в связке с массивным маховиком. Компоновочная схема предлагаемой установки представлена на рисунке 4.

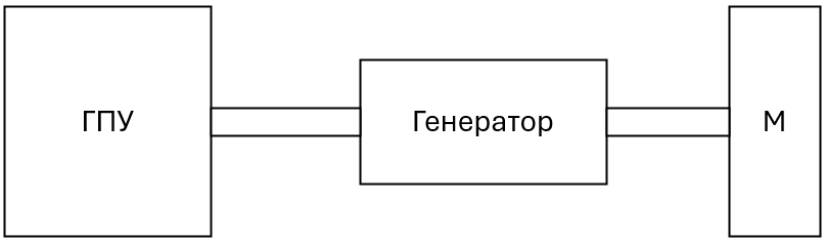


Рисунок 4 – Компоновочная схема ГПУ с маховиком.
ГПУ – Газопоршневая установка; М – Массивный маховик

В представленной схеме накопителем энергии является массивный маховик, который вращается одновременно с генератором, тем самым накапливая кинетическую энергию. В момент повышения

нагрузки накопленная маховиком кинетическая энергия поддерживает необходимую частоту вращения генератора, тем самым компенсируя просадку мощности в ГПУ. Использование ГПУ на шахтном метане в связке с массивным маховиком позволит обеспечить бесперебойную работу серверных мощностей угольных предприятий независимо от внешней электрической сети, что позволит избежать скачков и просадок напряжения и других негативных факторов, которые могут возникнуть в процессе ведения горных работ. Такое решение позволит сократить расходы на электроснабжение серверного оборудования и снизить уровень загрязнения атмосферы за счет использования шахтного метана в качестве топлива для работы серверных мощностей.

Благодарности. *Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).*

Перечень ссылок

1. Plakitkin Yu.A. Digitization of the Russian coal sector economy – from Industry 4.0 to Society 5.0 / Yu.A. Plakitkin, L.S. Plakitkina // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). – 2018. – Т. 140. – № 4/2018. – С. 22-30.
2. Сухов Р.Р. Новые метрики энергоэффективности ИТ-отрасли / Р.Р. Сухов, М.Б. Амзараков, Е.А. Исаев // Бизнес-информатика. – 2022. – Т. 16. – № 2. – С. 49-61.
3. Вихров, М. Е. Сравнение особенностей функционирования статических и динамических ИБП и рекомендации по их применению / М. Е. Вихров, А. Е. Тамаровский // Фёдоровские чтения - 2018 : XLVIII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы, Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. – С. 256-258. – EDN YWIVXN.
4. Экология и дата-центры. Как в России и за её пределами «озеленяют данные» / Хабр // Хабр URL: https://habr.com/ru/companies/lanit/articles/479300/ (дата обращения: 05.05.2024).
5. Рак А.Н. Когенерационная энергетика Донбасса: современность и перспективы утилизации шахтного метана / А.Н. Рак, С.В. Шлепнёв. – 2019. – № 9. – С. 90-93.

УДК 338.2

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЕКТОВ В ГОРОДСКИХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Д.К. Цаголов, С.Ю. Балахонов, Е.М. Лисин
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация

В статье проведен анализ систем теплоснабжения и выделены проблемы, требующие реализации энергосберегающих проектов. На основе рассмотрения программ энергосбережения города Москвы обосновано повышение эффективности теплоснабжения в виде перехода к ИТП. Составлен алгоритм и даны рекомендации перехода к ИТП в энергосберегающих проектах ДНР.

The paper analyzes heat supply systems and identifies problems that require the implementation of energy-saving projects. Based on the consideration of energy saving programs in the city of Moscow, an increase in the efficiency of heat supply in the form of a transition to IHP is justified. An algorithm was compiled and recommendations were given for the transition to IHP in energy saving projects of the DPR.

Ключевые слова: *теплоснабжение, энергосберегающие программы, ЦТП, ИТП, энергоэффективность*

Keywords: *heat supply, energy saving programs, CHP, IHP, energy efficiency*

На сегодняшний день теплоснабжение является одним из самых энергоёмких секторов экономики энергетики. При этом как продемонстрировали последние отопительные сезоны, накопившиеся за долгие годы проблемы в данном секторе, требуют оперативных решений, так как они наносят серьёзный экономический, экологический и социальный ущерб.

Следует отметить, что схема организации и состояние систем теплоснабжения в городах существенно различается [1]. В то же время можно выделить следующие общие для них основные проблемы:

- высокая степень износа оборудования станций и тепловых сетей,
- использование устаревших низкоэффективных технологий,
- несбалансированность мощностей и структуры оборудования с потребностью на тепловом и электроэнергетическом рынках,

- неприспособленность к работе в условиях либерализации рынка тепла и повышения требований к качеству снабжения при росте дебиторской задолженности,
- некачественное и неэффективное регулирование внутридомовых систем теплоснабжения на основе ЦТП.

Для решения вышеперечисленных проблем в городах осуществляются энергосберегающие муниципальные программы [2]. Основной их целью является повышение эффективности использования энергетических ресурсов потребителями города.

Первая крупная энергосберегающая программа была реализована в Москве в соответствии с указанием с. 25 Федерального закона от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергоэффективности». Она обязала организации с участием государства или муниципального образования и организации, осуществляющие регулируемые виды деятельности, разрабатывать мероприятия в области энергосбережения и повышения энергоэффективности, а также формировать [2]:

- целевые показатели энергосбережения и повышения энергоэффективности, достижение которых должно быть обеспечено в результате реализации мероприятий, и их значения;
- показатели экономической эффективности от проведения этих мероприятий.

На основе анализа опыта от реализации программы были сформированы требования к программам в области энергосбережения в Москве и утверждены Приказом Минэнерго от 30.06.2014 № 398. В дальнейшем данные требования были распространены и на реализацию энергосберегающих мероприятий в системах энергоснабжения других городов в соответствии с постановлением Правительства РФ от 11 февраля 2021 г. № 161 “Об утверждении требований к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности”.

Энергосберегающие программы затрагивают системы теплоснабжения и водоснабжения. В рамках энергосберегающих мероприятий особенно следует отметить массовый переход на блочные пластинчатые теплообменники в тепловых пунктах и постепенный переход от центральных тепловых пунктов (ЦТП) к индивидуальным (ИТП) в новом строительстве при изношенности и необходимости замены магистральных сетей теплоснабжения и водоснабжения. Это связано с существенными преимуществами ИТП над ЦТП в области энергосбережения, представленные в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Основные отличия ЦТП от ИТП

Центральный тепловой пункт (ЦТП)/БЦТП	Индивидуальный тепловой пункт (ИТП)/БИТП
Температурный режим для множества подключённых зданий. Сложность в балансировке нагрузки для потребителей	Температурный режим устанавливается индивидуально для конкретного здания
Невозможность установить оптимальную температуру ГВС для конкретного здания	Температура горячей воды постоянна у потребителей
Циркуляция ГВС не обеспечивается должным образом	Постоянная циркуляция ГВС у потребителя
Большие теплопотери по трубопроводам от ЦТП до потребителя	Теплопотери ниже так как длина магистральных труб от точки врезки в тепловые сети до ИТП меньше
В случае аварии на ЦТП без горячей воды и тепла окажутся все подключенные потребители	ИТП более надежные и ремонтопригодные
Техническое обслуживания сложное и длительное. В этот период потребители без тепла и горячей воды	Техническое обслуживания проще и менее затратное по времени
Высокое электропотребление приводов сетевых насосов	Сниженное электропотребление приводов сетевых насосов.
Необходимость в специальном техническом помещении	Отсутствует необходимость в специальном помещении

Таким образом, выбор между ЦТП и ИТП в пользу ИТП обусловлен, в первую очередь, меньшей потерей тепла при транспортировке теплоносителя по магистралям, обеспечением наиболее оптимальных параметров теплоносителя у потребителя и простотой обслуживания. При это также необходимо учесть такие важные условия, как количество потребителей, площадь строения и инфраструктура района [4].

Анализ опыта замены ЦТП на ИТП в рамках энергосберегающих программ Москвы позволил его обобщить и сформировать алгоритм и условия перехода, обеспечивающие экономию затрат с учетом структурных особенностей организации тепловых сетей:

1. Из помещения ЦТП демонтируется все оборудование кроме противопожарных и водопроводных насосов. Высвободившиеся от оборудования площади используется под иные цели.

2. При необходимости замены магистральных трубопроводов, они демонтируются и прокладываются новые в тех же каналах. Внутриквартальные трубопроводы горячего водоснабжения отрезаются.

3. ИТП размещается в здании в специально отведенном месте в техподполье и включает в себя теплообменники горячего водоснабжения, циркулирующие насосы в системах отопления и горячего водоснабжения, приборы автоматического регулирования и контроля за теплоносителями.

4. Устанавливаются пластинчатые водонагреватели горячего водоснабжения с объединением двух ступеней в один моноблок. В ИТП должен быть также обеспечен ввод трубопровода холодной воды с механическим водосчетчиком, направляемой на горячее водоснабжение.

5. При подключении к тепловым сетям многосекционного многоэтажного здания устраивается один ИТП на каждые 3–5 секций. Тепловая мощность ИТП не должна превышать расчетную нагрузку на отопление.

6. В жилых зданиях рекомендуется устанавливать циркуляционные насосы горячего водоснабжения.

7. Существующие системы отопления секций здания подключаются к ИТП через стандартные узлы управления.

Для решения проблем жилищно-коммунального хозяйства Правительство ДНР утвердило программу модернизации ЖКХ до 2030 года. В ДНР работают три крупнейших государственных энергопредприятия – «Энергия Донбасса», «Государственная магистральная сетевая компания» и «Региональная энергопоставляющая компания», входящие в сферу управления Министерства угля и энергетики ДНР. Они обеспечивают в полном объеме потребности ДНР в электроэнергии и тепле. Жилой фонд республики представлен популярными домами серий 1960-1985 годов, которые в основном обеспечиваются тепловой энергией через системы централизованного теплоснабжения. На сегодняшний день ЦТП системы теплоснабжения городов республики требуют серьезной модернизации и капитального ремонта.

При проведении муниципальной программы энергосбережения и повышения эффективности использования энергетических ресурсов и воды в ДНР нужно обратить внимание на системы индивидуального

теплоснабжения, используя опыт внедрения ИТП в рамках энергосберегающих проектов города Москвы. Переход на индивидуальные тепловые пункты при модернизации энергоснабжающей инфраструктуры с использованием современных технологий, позволит повысить эффективность теплоснабжения и решит большинство проблем ЖКХ.

Перечень ссылок

1. Гашо Е. Г., Пузаков В. С., Гужов С. В. Анализ проблем и тенденций развития систем теплоснабжения крупных городов России //Теплоэнергетика. – 2021. – №. 3. – С. 75-88.
2. Ливинский П. А. Реализация программ энергосбережения в Москве. Проблемы и пути решения //Энергосбережение. – 2014. – №. 2. – С. 4-8.
3. Клешнин Ю. А. Применение центральных и индивидуальных тепловых пунктов в системах теплоснабжения //Вестник науки. – 2020. – Т. 1. – №. 8. – С. 81-82.
4. Ливчак В. И. Установка ИТП в зданиях вместо замены изношенного оборудования в ЦТП и перекладки сетей горячего водоснабжения //Энергосбережение. – 2008. – №. 1. – С. 36-40.

УДК 621.314.524

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧИСЛА ФАЗ ДЛЯ ПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА

М.А Федин., Е.В. Качалина, А.В. Молостова., С.А. Федина, М.Л. Зотов, Д.А. Жгутов, А.И. Василенко
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Настоящая работа посвящена имитационному моделированию и исследованию электромагнитных процессов в специальных симметрирующих трансформаторах (электромагнитных преобразователях числа фаз), применяемых для питания индукционно-резистивных систем нагрева, а также расчёту их электрических и энергетических характеристик.

This work is devoted to simulation modeling and research of electromagnetic processes in special balancing transformers (electromagnetic phase number converters) used to power induction-resistive heating systems, as well as calculation of their electrical and energy characteristics.

***Ключевые слова*:** Электротехнологии, промышленный электрообогрев, индукционно-резистивная система нагрева, электрооборудование, система электропитания, симметрирование нагрузки, симметрирующий трансформатор, преобразователь числа фаз.

Keywords: *electrical technologies, industrial electric heating, induction-resistive heating system, electrical equipment, power supply system, load balancing, balun transformer, phase number converter.*

Добыча, переработка, транспортировка, хранение нефти, газа и других продуктов в условиях российского климата выявили необходимость подогрева магистральных трубопроводов, резервуарных парков, технологических установок и других объектов. На сегодняшний день индукционно-резистивные системы нагрева, основанные на использовании поверхностного эффекта в электрических проводниках переменного тока, наиболее оптимизированы под задачи электрообогрева протяженных трубопроводов [1].

На рис. 1 представлен эскиз устройства индукционно-резистивного (комбинированного) нагрева, представляющего собой

ферромагнитную трубу *2*, внутри которой находится стержневой индуктор *1*.

Мощности современных ИРСН, являющихся однофазными нагрузками, в настоящее время могут достигать сотен киловатт, поэтому в системе электроснабжения таких устройств электрообогрева необходимо предусмотреть симметрирование нагрузки для согласования первичной трехфазной сети с однофазной нагрузкой.

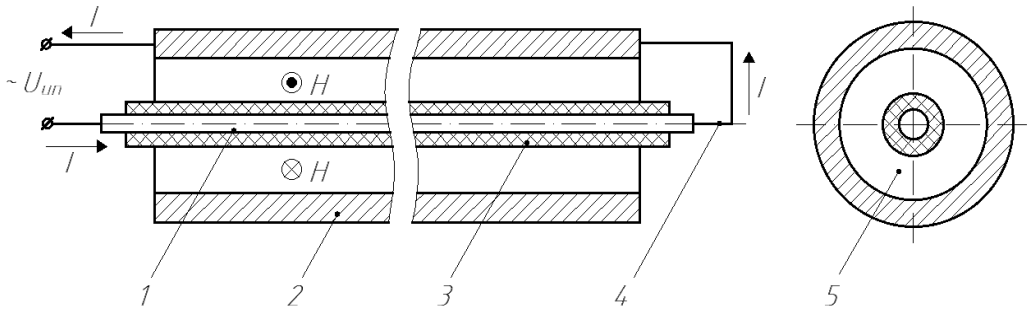


Рисунок 1 – Индукционно-резистивная система нагрева: 1– проводник; 2– стальная труба; 3 – электрическая изоляция; 4 – электрическое соединение; 5 – зазор между проводником и трубой

Наиболее оптимальным вариантом решения задачи симметрирования двухфазной нагрузки является использование в схеме электроснабжения специального трансформатора, соединенного с использованием схемы трансформатора Скотта.

Проведённый авторами литературный обзор и патентный поиск позволили создать новый симметрирующий трансформатор, названный авторами электромагнитным преобразователем числа фаз (ЭМПЧФ) по схеме Скотта, для питания мощных однофазных ИРСН [2].

В результате работы в среде MATLAB/Simulink была получена имитационная модель предложенного ЭМПЧФ (рис. 2) [3].

Подбирая значения емкости конденсатора С2, добиваются компенсации индуктивного сопротивления $x_н$. Регулируя емкость конденсатора C_1, выравнивают токи в питающих фазах $I_a=I_b=I_c$ путем создания фазового сдвига на вторичной обмотке высотного трансформатора.

Температура ИРСН в процессе работы может изменяться в диапазоне от - 60 °С до 200 °С, что оказывает существенное влияние на параметры схемы замещения такой системы. Поэтому требуется, чтобы симметрирующее устройство было регулируемым, что

достигается оперативными переключениями фазосдвигающих конденсаторов по сигналу системы управления [4].

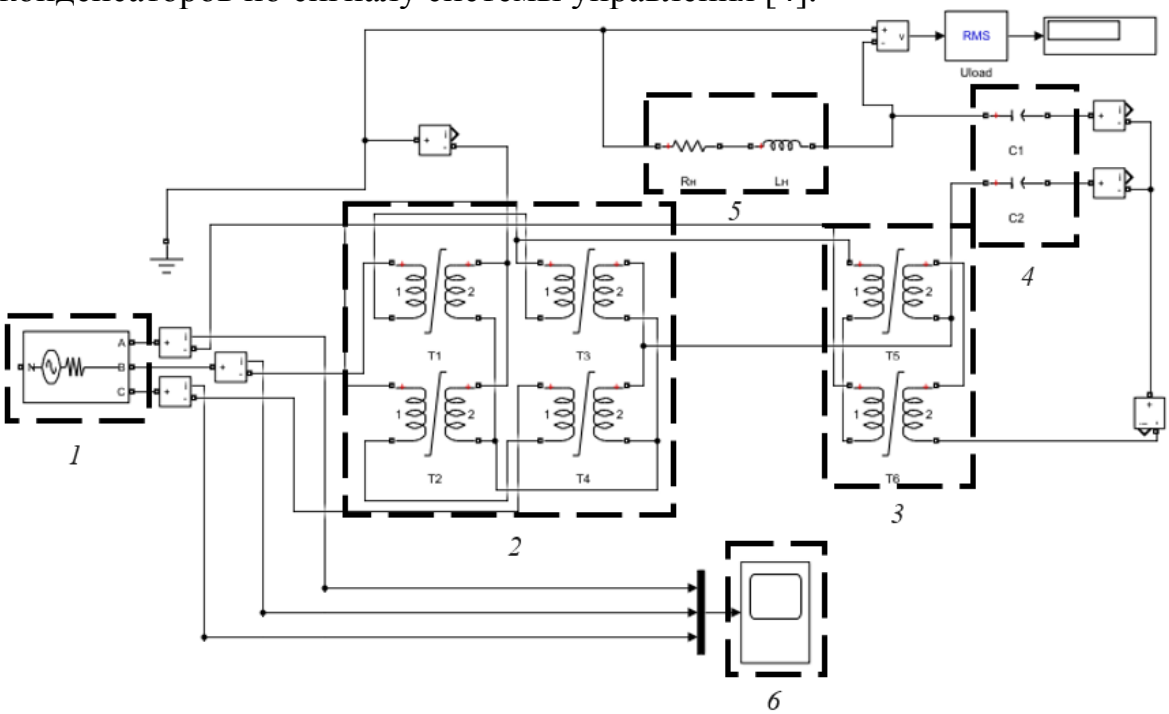


Рисунок **2** – Имитационная модель схемы электроснабжения ИРСН с применением специального трансформатора – ЭМПЧФ

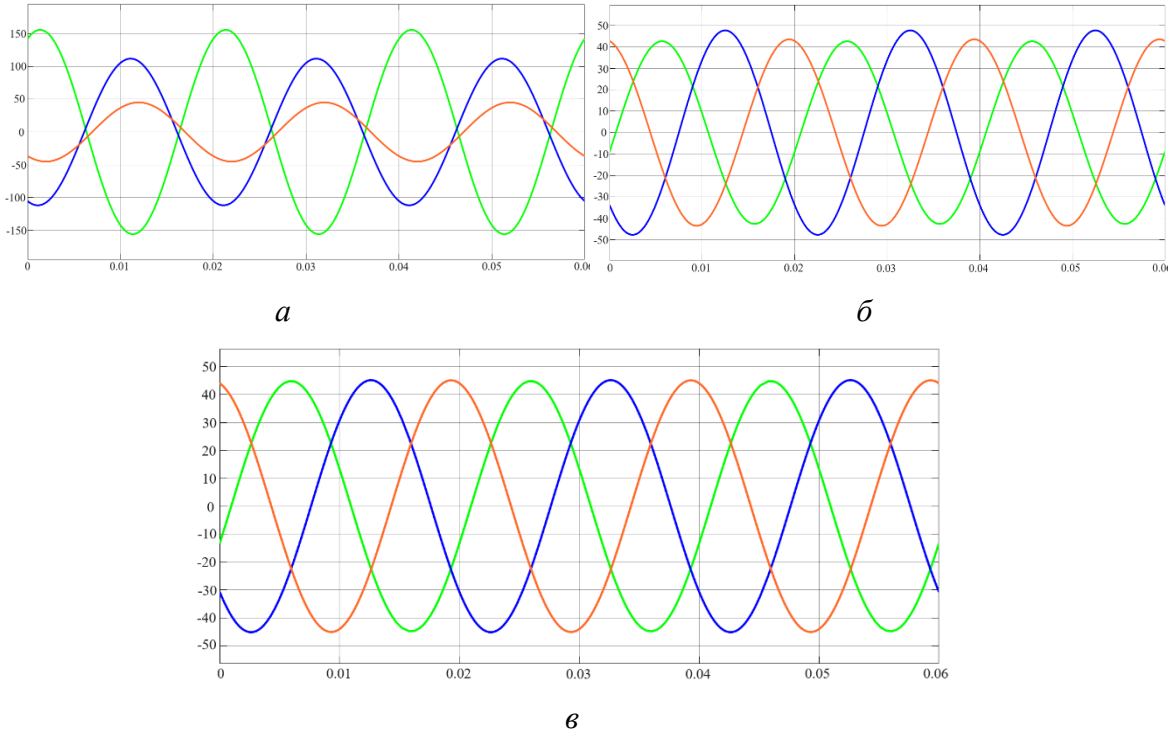


Рисунок 3 – Временные диаграммы токов первичных обмоток симметрирующего трансформатора без симметрирования (*а*), с симметрированием без изменения (*б*) и с изменением (*в*) значений C_1 и C_2 при нагреве до 70 °С

По результатам вычислительного эксперимента, проведённого с использованием имитационной модели, можно утверждать, что предложенный симметрирующий трансформатор позволяет симметрировать токи в питающей сети с высокой точностью и обеспечивать на выходе форму напряжения близкую к синусоидальной, что упрощает расчёты. Результаты расчетов и моделирования подтверждаются многолетним опытом проектирования и техническими характеристиками современных однофазных трансформаторов. Разработана конструкция симметрирующего трансформатора суммарной установленной мощностью 352 кВА для питания однофазной ИРСН мощностью 195 кВт. Выработаны рекомендации по изменению значений корректирующих ёмкостей при разогреве трубопровода с ИРСН. Предложенное симметрирующее устройство, построенное по модифицированной трансформаторной схеме Скотта и предназначенное для питания однофазных индукционно-резистивных систем нагрева, сочетает в себе функции как преобразовательного трансформатора, так и электромагнитного преобразователя числа фаз и в дальнейшем будет испытано с использованием экспериментального стенда с физической моделью ИРСН, а также в промышленной системе электрообогрева.

Перечень ссылок

1. Струпинский М. Л. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли / М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков, А. Б. Кувалдин. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 524 с.
2. Кувалдин А. Б. Сравнение индукционных и резистивных систем электрообогрева промышленных трубопроводов / А. Б. Кувалдин, М. Л. Струпинский, Н. Н. Хренков [и др.] // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сборник научных трудов. — Екатеринбург: [УрФУ], 2014. — С. 125 – 130.
3. Федин М. А. Разработка математической модели электромагнитного поля и схемы замещения индукционно-резистивной системы нагрева для промышленных трубопроводов / М. А. Федин, Е. В. Качалина, А. В. Молостова [и др.] / Промышленная энергетика, №12, 2023. С. 2 – 9.
4. Кувалдин А. Б. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих среда/ Кувалдин А. Б., Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Шатов В. А. /Электричество, №11, 2005. С. 56 – 61.

УДК 621.438

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПЛИТТЕРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИАЛЬНОЙ ТУРБИНЫ

М.А. Островский, Р.Е. Зуйкин, И.А. Максимов
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация

В настоящей работе проведено численным исследование процесса установки сплиттеров в проточную часть радиальной турбины органического цикла Ренкина с целью повышения ее эффективности. Результаты расчета течения в радиальных турбинах на низкокипящем теплоносителе R236ea с улучшенной геометрией показали повышение изоэнтропийного КПД ступени на 2,5% относительно исходной турбины без сплиттеров.

In this paper, a numerical study of the process of installing splitters in the flow part of a radial turbine of the Rankine organic cycle is carried out in order to increase its efficiency. The results of calculating the flow in radial turbines with low-boiling coolant R236ea with improved geometry showed an increase in the isentropic efficiency of the stage by 2.5% relative to the initial turbine without splitters.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, CFD метод, радиальные турбины, низкокипящий теплоноситель.

Keywords: *organic Rankine cycle, CFD method, radial turbines, low-boiling coolant.*

Непрерывный рост стоимости ископаемого топлива и платы за выбросы вредных веществ предопределяет необходимость повышения эффективности и экологической безопасности энергетических установок. Для отечественной генерации особой актуальностью обладает модернизация действующих тепловых электрических станций (ТЭС), работающих на природном газе, поскольку их доля в общей структуре выработки электроэнергии составляет порядка 50%.

Наибольшей тепловой экономичностью среди ТЭС обладают парогазовые установки (ПГУ) утилизационного типа, работающие по бинарному циклу и представляющие собой комбинацию газотурбинной установки (ГТУ), котла-утилизатора (КУ) и паротурбинной установки (ПТУ). За счет высокого уровня начальной

температуры (1600-1650°С) электрический КПД нетто передовых зарубежных ПГУ может достигать значений свыше 60%. В свою очередь, более низкий уровень температур на входе в газовые турбины (1060-1360°С) обусловил относительно невысокую эффективность отечественных ПГУ: электрический КПД нетто 50-55%.

Добиться повышения эффективности действующих ПГУ без повышения начальных параметров рабочей среды возможно за счет перехода от бинарного к тринарному циклу [1]. Предпосылки для осуществления подобной модификации отечественных парогазовых установок, заключающейся в надстройке дополнительного низкотемпературного контура производства электроэнергии, кроются в относительно высоком уровне температуры уходящих газов у нашедших широкое применение в РФ одноконтурных котлов-утилизаторов. Однако энергетическая и экономическая целесообразность перехода к тринарным энергетическим установкам неочевидна ввиду отсутствия результатов комплексных термодинамических исследований, конструктивных разработок и техникоэкономических оценок.

Для обеспечения высокого уровня экономической эффективности тринарных циклов необходимы новые конструкторские решения, позволяющие обеспечить создание высокоэффективного энергетического оборудования тринарных энергоустановок, для чего требуется проведение исследований процессов газовой динамики в турбомашинах низкокипящего цикла. Целью настоящей работы является разработка метода повышения газодинамической эффективности радиальной турбины для органического цикла Ренкина с использованием CFD подхода.

В качестве исходных данных для моделирования использовались результаты одномерного расчета параметров фреона R236ea представленых в таблице 1. Для предотвращения истечения потока при сверхзвуковой скорости в турбине, что в свою очередь вызывает волновые потери и скачки уплотнения, а, следовательно, и резкое снижение эффективности турбины, критический коэффициент расширения фреона R236ea не должен быть ниже 0,424. В связи с этим было принято решение о распределении перепада давления на 3 отсека одноступенчатых радиальных турбин (рисунок 1), расположенных на одном валу, со скоростью вращения 3000 об/мин.

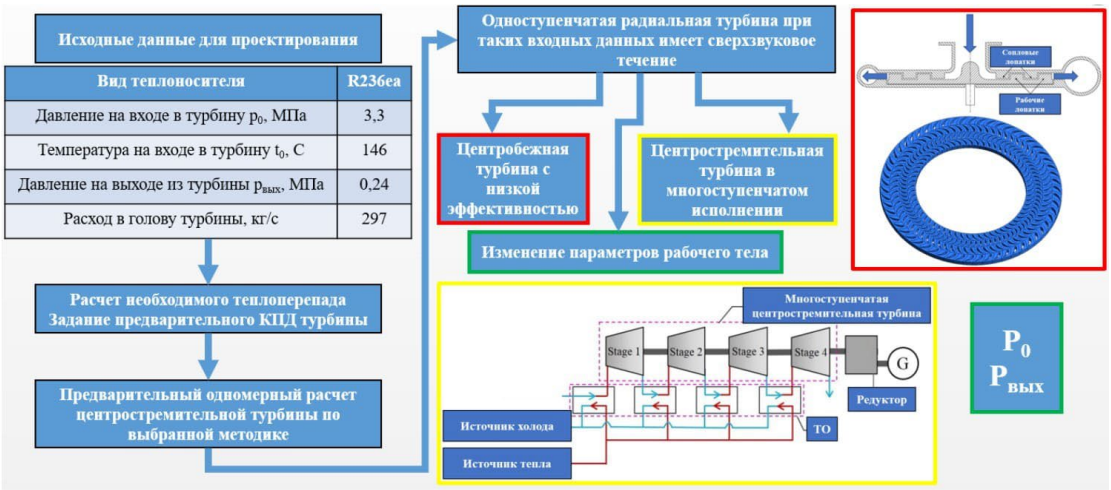


Рисунок 1 – Алгоритм подхода к решению вопроса сверхзвукового течения в каналах

Таблица 1 – Параметры фреона R236ea в различных ступенях турбины по результатам предварительной одномерной оптимизации

Параметр	Величина		
	1 ступень	2 ступень	3 ступень
Давление на входе в турбину, МПа	3,3	1,7	0,8
Температура на входе в турбину, °С	146	114	92
Давление на выходе из турбины, МПа	1,7	0,8	0,24
Температура на выходе из турбины, °С	114	92	63
Расход, кг/с	297		

В качестве объекта исследования была выбрана первая ступень радиальной турбины. Численное моделирование исследуемой центростремительной турбины было проведено с использованием коммерческого программного пакета ANSYS CFX v18.2. Геометрические размеры турбины были перенесены в ANSYS BladeGen 18.2 для дальнейшего построения математической сетки проточной части с помощью инструмента ANSYS TurboGrid v18.2 (рисунок 2).

Моделью турбулентности была выбрана SST, для более точного расчета пристеночного слоя. Граничными условиями являлись температура 146 °С и полное давление 3300 кПа на входе в модель, а в качестве выходных условий было определено статическое давление 1700 кПа. Частота вращения была установлена на уровне 3000 оборотов в минуту. Условие отсутствия скольжения было применено ко всем стенкам математической модели.

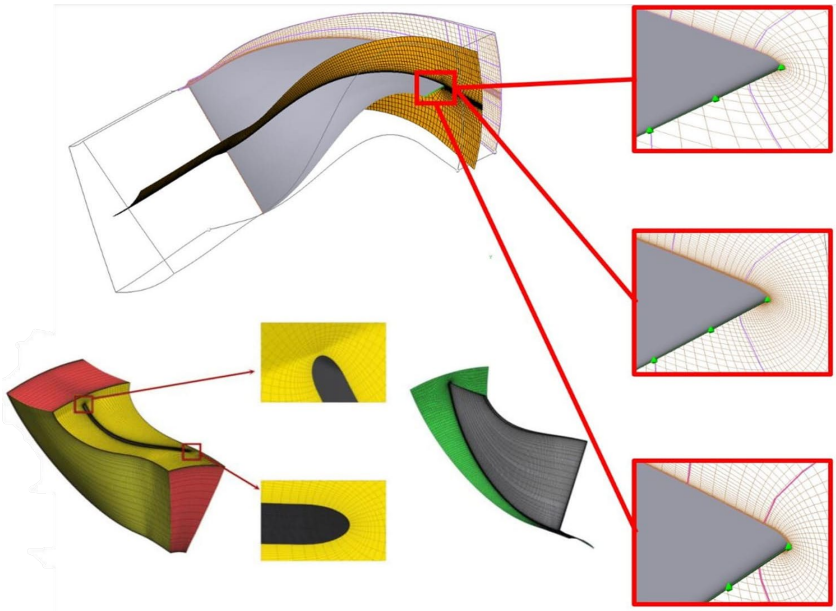


Рисунок 2 – Пример математической сетки исследуемых моделей

Перед моделированием первой ступени турбины было проведено исследование на сходимость математической сетки с целью оптимизирования временных и мощностных затрат на моделирование (рисунок 3). Исследование показало, что изоэнтропийный КПД турбины практически не изменяется, при количестве элементов сетки больше 8500000 ячеек.

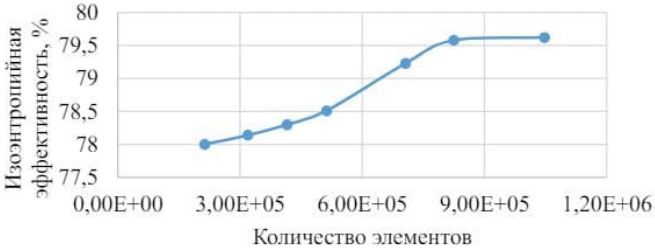
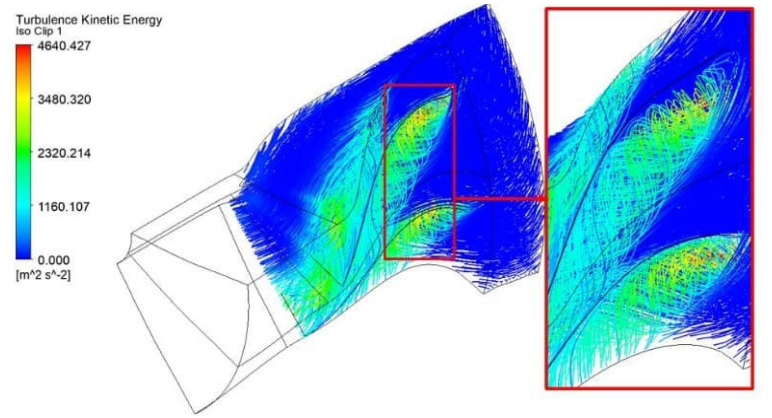
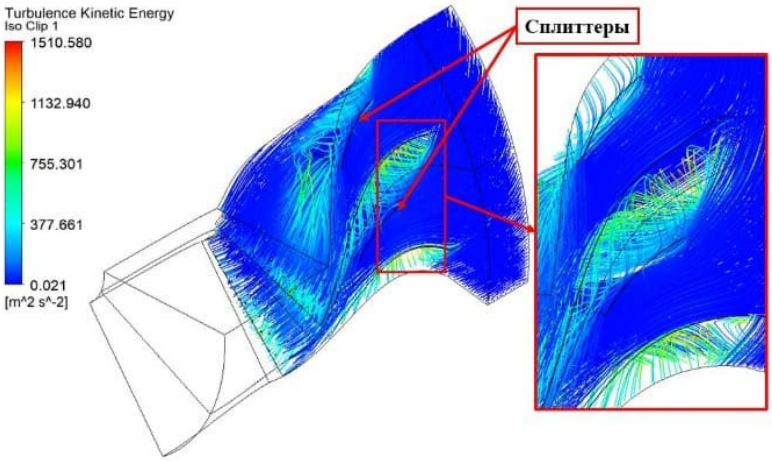


Рисунок 3 – Зависимость эффективности исследуемой ступени от количества элементов в математической сетке модели

Уровень турбулентной кинетической энергии вихревых структур в каналах модифицированной и базовой турбин показаны на рисунке 4. Установка сплиттеров привела к снижению интенсивности образования вихревой структуры и, как следствие, к уменьшению ее влияния на параметры потока, что в свою очередь привело к приросту КПД ступени на 2,5% по сравнению с базовым вариантом без сплиттеров. Оценка эффективности ступени проводилась с использованием встроенного инструмента программного комплекса CFX.



(а)



(б)

Рисунок 4 – Сравнение структур вихревых течений для исходной (а) и улучшенной (б) турбин

Результаты предварительного одномерного проектирования и 3D-моделирования базового варианта турбины сравниваются в таблице 2. Выявлено, что погрешности в массовом расходе, мощности и изоэнтропийной эффективности центростремительной турбины без добавления сплиттеров находятся в допускаемых пределах. Таким образом, полученные результаты 3D-моделирования модифицированной турбины с применением сплиттеров, указанные в таблице 3, могут считаться достоверными.

Таблица 2 – Сравнение результата трехмерного моделирования и одномерного расчета

Параметр	Одномерный расчет	3D моделирование	Относительная ошибка, %
Расход, кг/с	297	291	2,1
КПД ступени, %	81,8	79,7	4,3
Мощность, МВт	3,68	3,41	7,6

Таблица 3 – Сравнение эффективности базовой и улучшенной конструкций турбин

Параметр	Базовая модель	Улучшенная модель	Прирост, %
КПД ступени, %	79,7	82,2	2,5

Установлено, что размещение сплиттеров в радиальных турбинах в срединном сечении рабочих лопаток приводит к существенному приросту эффективности ступени, в частности, для радиальной турбины на фреоновом теплоносителе R236ea с температурой и полным давлением на входе и выходе – 146, 114℃ и 3,3, 1,7 МПа соответственно, приводит к повышению изоэнтропийной эффективности на 2,5% относительно турбины без сплиттеров.

Благодарность

Исследование проведено в НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Минобрнауки России (государственное задание № FSWF-2023-0014, соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.).

This study conducted by Moscow Power Engineering Institute was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWF-2023-0014, contract No. 075-03-2023-383, 2023/18/01).

Перечень ссылок

1. Kindra V., Rogalev N., Rogalev A., Naumov V., Sabanova E. Thermodynamic Optimization of Low-Temperature Cycles for the Power Industry // Energies. — 2022. — Т. 15. — № 9. — с. 2979.

УДК 53.088.23

РАСКРЫТИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОЦЕДУРЫ РЕГИСТРАЦИИ РАБОЧИХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ, ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Н.А. Петерс, Л.В. Цыхлер, А.А. Лапкис, М.К. Сорокин
Волгодонский инженерно-технический институт - филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Волгодонск, Российская Федерация

В работе рассмотрено влияние метода выделения огибающей токовых сигналов, сопровождающих рабочий цикл «открытие-закрытие» электроприводной арматуры.

The work examines the influence of the method for isolating the envelope of current signals accompanying the "opening-closing" operating cycle of electric drive valves.

Ключевые слова: *электроприводная арматура, техническая диагностика, огибающая сигнала, неопределённость, погрешность.*

Keywords: *electric drive valves, technical diagnostics, signal envelope, uncertainty, error.*

Для определения технического состояния электроприводной арматуры (ЭПА) необходимо с помощью огибающей зарегистрированных значений токовых сигналов ЭПА получить информацию о фактических значениях, определяющих техническое состояние объекта диагностики. Процедура получения огибающей токовых сигналов влияет на точность косвенных измерений диагностических параметров. Для определения степени влияния этой процедуры на точность косвенного получения данных о фактических значениях диагностических параметров, необходимо провести расчёт неопределённости полученных значений огибающей сигнала, согласно [1].

Точность расчёта значений огибающей влияет на оперативность выявления дефектов ЭПА. Согласно действующей методике [2] определяющими параметрами ЭПА являются:

1) отношение пускового тока к рабочему;
2) плавность хода;
3) несимметричность токов;
4) значение тока срыва при выполнении операции «открытие»;

5) значение тока затяга при выполнении операции «закрытие»;

6) значение тока на рабочем ходу.

Выполненные расчёты подтверждают необходимость раскрытия неопределённости, сопровождающей процедуру выделения огибающей, для корректного определения технического состояния ЭПА, что в свою очередь влияет на «вхождение» значений определяющего параметра в границы работоспособного состояния объекта диагностирования. Некорректно выделенная огибающая, может повлиять на качество визуализации графического отображения того или иного дефекта. Пример огибающей ЭПА представлен на рисунке 1.

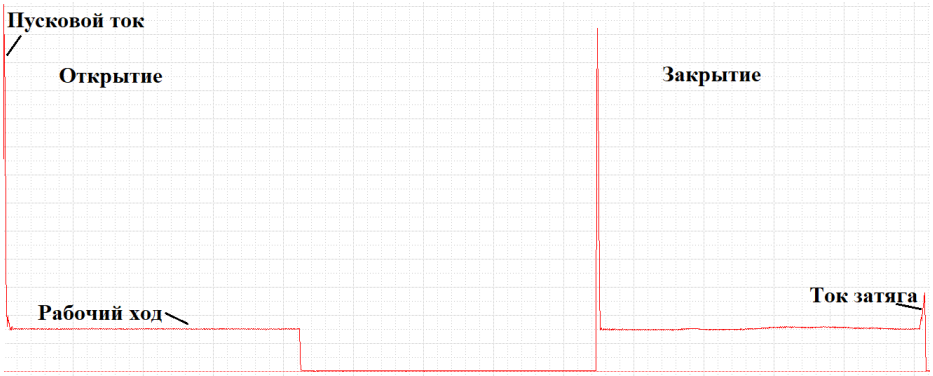


Рисунок 1 – Огибающая токового сигнала фазы А ЭПА

Протокол диагностики ЭПА представлен на рисунке 2.

Пусть X – измеряемая величина. Для целей диагностики используется значение огибающей данной величины. Для выделения огибающей используется метод среднеквадратического значения (СКЗ), когда СКЗ на интервале, содержащем N отсчётов величины X [3], определяют по формуле:

$$\sigma(X_{\text{СКЗ}}) = \sqrt{S(X_{\text{СКЗ}})}$$

$$S(X_{\text{СКЗ}}) = \sum_{i=1}^{N} (y_i \times dX)^2,$$

где y_i – коэффициенты чувствительности, $S(X_{СКЗ})$ – дисперсия СКЗ величины X

$$y_i = \frac{\partial X_{\text{СКЗ}}}{\partial X_i} = \frac{1}{2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} X_i^2}{N}}} \cdot \frac{2X_i}{N} = \frac{X_i}{N \cdot X_{\text{СКЗ}}}$$

Нововоронежская АЭС	**Протокол № 143 диагностического обследования электроприводной арматуры**							**Энергоблок № 4**	
Дата проведения	Наименование системы			Назначение		Вид арматуры		Цех - владелец	
14.11.2022	Система главных паропроводов 3 блока			Регулятор БРУ-3А ТГ-11		ан запорно-дроссельный		ТО4	
Оперативное наименование	Типоразмер	Тип привода	Мощность двигателя, к	егулировани уплотнения	Место подключение	Завод-изготовитель	Зав. №	Класс по П-001-9	Группа по ПНАЭГ-7-008-89
БРУ-А №3	1569-300/300-	ЭП100000/1	6,00		М38М шк.1 ф.	н/у	н/у	3Н	С

Сведения о измерительной и регистрирующей аппаратуре:
Для измерения и регистрации токовых сигналов использован переносной измерительно-вычислительный комплекс Крона-520 заводской № в соответствии с ЭМТД 66-071-2014 РП. Погрешность измерительного комплекса составляет 5%. Дата поверки 14.02.2022г.

Основание для проведения диагностических измерений: заявка ТЦ-4 на проведение измерений во время ППР-2022.

Оценочные критерии для формирования заключения о техническом состоянии электромеханической части арматуры при выполнении движения рабочему органу":
- время открытия и закрытия арматуры по факту срабатывания в сравнении с данными НТД (**Тоз не более Титд**);
- разность времени открытия и закрытия арматуры по факту срабатывания (**не более 5%**);
- плавность рабочего хода при открытии и закрытии арматуры (**Yоз не менее 80%**);
- величина рабочего тока при открытии и закрытии арматуры (**Iр не более Iном и попадает в поля допусков по этому параметру**);
- расхождение между значениями рабочего тока при открытии и закрытии (**не более 5%**);
- величина пускового тока при открытии и закрытии арматуры по отношению к рабочему току (**Iп/Iр не более 15**);
- усилие при срыве и затяге рабочего органа по величине тока срыва при открытии и тока дожатия при закрытии арматуры, **(Iс-Iро)/Iро х 100% (Iд-Iрз)/Iрз х 100%, не более 30%**;
- соответствие формы огибающей токового сигнала при открытии и закрытии (см. графики огибающих) эталону для данного типоразмера армат на участках рабочего хода, срыва и затяга запорного органа;
- соответствие спектра токового сигнала (см. графики спектров) опорному для данного типоразмера арматуры, в т.ч. по амплитуде на частотах 2 (**А норм. = -40дБ и ниже; А повыш. = -30дБ; А предельно допуст. = -20дБ**).

Время срабатывания, с		Разность	лавность ход		Рабочий		Пусковой ток				Срыв и затяг запорного органа				Люфт	Спектр
при Тнтд= 10 с		о и Тз,	%		А		А		раз		А		с-Iро)/Iро	д-Iрз)/Iрз	с	Amax, дБ на f25 и f75 Гц
То	Тз	ΔТ	Yо	Yз	Iро	Iрз	Iпо	Iпз	по/Iро	пз/Iрз	Iс	Iд	х100%	х100%		
8,1	8,1	0	87,2	86,2	2,6	2,5	14,7	15,0	5,6	6,0	2,8	3,4	6,3	34,1	0,8	-23
норма	норма	норма	норма	норма	соотв.		соотв.	соотв.	соотв.	соотв.	соотв.	не соотв	соотв.	не соотв	не соотв	повышенная

Рисунок 2 – Протокол №2 диагностического обследования ЭПА

Тогда составим выражение для дисперсии СКЗ:

$$S(X_{\text{СКЗ}}) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{X_i}{N \cdot X_{\text{СКЗ}}} \times dX \right)^2$$

$$s(X_{\text{СКЗ}}) = \left(\frac{dX}{X_{\text{СКЗ}}} \right)^2 \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} X_i^2}{N^2} \right) = \left(\frac{dX}{X_{\text{СКЗ}}} \right)^2 \times \frac{X_{\text{СКЗ}}^2}{N}$$

$$s(X_{\text{СКЗ}}) = \frac{dX^2}{N}$$

Тогда СКО СКЗ составит:

$$\sigma(X_{\text{СКЗ}}) = \frac{dX}{\sqrt{N}}$$

Таким образом, результат усреднения методом RMS имеет меньшую неопределённость, чем исходная измеренная величина.

Учитывая, что при диагностике электроприводного оборудования усреднение осуществляется за один период сетевой частоты, то число N можно определить как отношение частоты дискретизации и сетевой частоты:

$$N = \frac{f_{disc}}{f_{net}}$$

Рассмотрим пример с расчета СКО СКЗ для частоты дискретизации 10кГц и 1кГц. Число отсчетов N_1 в первом случае будет в 10 раз выше, чем во втором N_2, значит СКО СКЗ для частоты дискретизации 10кГц будет ниже в $\frac{\sqrt{N1}}{\sqrt{N2}}$.

Таким образом, неопределённость измеренных значений рабочих токов методом RMS снижается с ростом частоты дискретизации, с которой регистрируются диагностические сигналы. Как следствие, неопределённость измеренных значений тока снижается за счёт процедуры вычисления огибающей методом RMS.

Перечень ссылок

1. ГОСТ 34100.3-2017. Руководство по выражению неопределенности измерения. (ISO/IEC Guide 98-3:2008, ЮТ). – Москва: Стандартинформ, 2018. – 104 с.
2. МТ 1.2.3.02.999.0085. Диагностирование трубопроводной электроприводной арматуры. Методика. Стандарт организации: издание официальное. Утвержден и введен в действие Приказ ОАО «Концерн Росэнергоатом» № 9/270-П от 22.03.2012, введен впервые 01.06.2012. Разработан НИИ «Энергомашиностроения». – Текст: электронный. – Москва, 2012. – 127 с.
3. Hodson T.O.: Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. - Geosci. Model Dev., 15, 5481–5487, 2022.

УДК 621.316.728: 621.311

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ И УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

М.Г. Асташев, И.И. Журавлев, Е.А. Рябова, А.В.Часов
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация

В статье представлен обзор отечественных технологий и разработок для снижения потерь и повышения показателей качества электроэнергии в электрических сетях. Рассмотрены силовые схемы и физическая реализация таких устройств. Приведены устройства компенсации реактивной мощности, регулирования и стабилизации напряжения, симметрирования режимов работы трехфазных сетей.

The article provides an overview of domestic technologies and developments to reduce losses and improve the electricity quality in distribution lines. Scheme and physical models designing are considered. Such devices as SVC, AC voltage regulator-stabilizator, and balancer are presented.

***Ключевые слова**: устройства силовой электроники в электроэнергетике, регуляторы переменного напряжения, повышение показателей качества электроэнергии, симметрирование режимов работы, компенсация реактивной мощности, стабилизаторы напряжения.*

***Keywords:** power electronics devices in distribution lines, AC voltage regulators, power quality, voltage balancing, SVC, voltage stabilization.*

Введение

Проблемы уменьшения потерь и улучшения показателей качества электроэнергии на сегодняшний день являются актуальными для всего мира. За рубежом их решают устройства, именуемые FACTS [1]. Однако внедрение таких устройств в отечественные объекты электроэнергетики ограничивается в связи с текущей геополитической обстановкой. Поэтому является актуальной задача укрепления суверенитета электроэнергетического комплекса России посредством разработок и внедрений отечественных устройств силовой электроники, обеспечивающих надлежащее качество и снижение уровня потерь электроэнергии в электрических сетях. В настоящей статье предложены отечественные технологии построения силовых

устройств, направленные на решение вышеупомянутых задач. Рассмотрены устройства регулирования и стабилизации напряжения, симметрирования режимов работы сети, компенсации реактивной мощности и увеличения пропускной способности линии электропередачи (ЛЭП). Приведены структурные схемы таких устройств, а также их исполнение в виде опытных образцов.

Принцип построения устройств уменьшения потерь и улучшения показателей качества электроэнергии в сети

Предлагаемые в статье технологии построения устройств уменьшения потерь и улучшения показателей качества электроэнергии в сети базируются на регуляторах переменного синусоидального напряжения (Рисунок 1) [2].

Рисунок 1 – Структурная схема регулятора напряжения

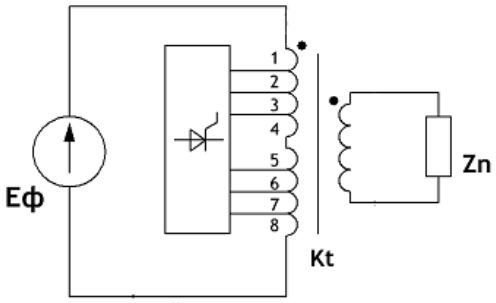
Регулятор переменного напряжения представляет собой четырехполюсник, у которого напряжение на выходе $U_{вых}$ может меняться относительного входного $U_{вх}$ с помощью трансформатора с регулируемым коэффициентом трансформации. На практике регулирование коэффициента трансформации осуществляется за счет применения трансформатора с секционированной обмоткой и полупроводникового коммутатора, который обеспечивает различные последовательные подключения секций. Для увеличения количества уровней регулирования напряжения регулятора напряжения выводы обмоток трансформатора можно конфигурировать друг с другом различными способами, получая тем самым различные регулировочные характеристики при ограниченном числе секций обмотки трансформатора. Достоинствами такой технологии является отсутствие высших гармоник в кривой тока, широкий диапазон регулирования, а также возможность ее применения в устройствах различного класса напряжения и мощностей.

Полупроводниковое устройство регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (ПУРНТ)

ПУРНТ предназначен для регулирования напряжений для подстанционных трансформаторов под нагрузкой в автоматическом режиме посредством переключения отпаек на трансформаторе (Рисунок 2) [3]. В основе ПУРНТ лежит тиристорный коммутатор,

который подключается к регулировочным ответвлениям переключателя без возбуждения (ПБВ) фазы силового трансформатора распределительной сети. Изменение состояния тиристорного коммутатора позволяет коммутировать ответвления ПБВ трансформатора, осуществляя регулирование напряжения.

а)



б)

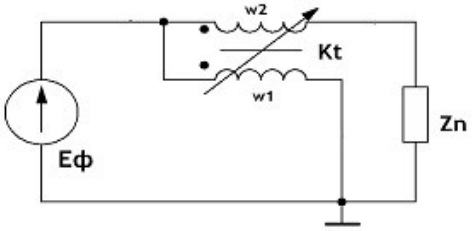
Рисунок 2 – ПУРНТ: а) физическая реализация; б) структурная схема

ПУРНТ в пределе своего диапазона регулирования могут нивелировать несимметрию напряжений в сети за счет независимого регулирования напряжения по фазам. Достоинствами ПУРНТ является сниженная установленная мощность по сравнению с номинальной мощностью трансформатора, а также сниженный класс напряжения на полупроводниковых ключах коммутатора по сравнению с сетевым напряжением. Продукция изготавливается вместе с комплектно-трансформаторной подстанцией заводом АО ВО «Электроаппарат».

Линейные регуляторы-стабилизаторы переменного напряжения (бустеры)

Бустеры (Рисунок 3) также предназначены для пофазного регулирования напряжения в местах их установки [4]. Устройство регулирует и стабилизирует напряжение в участке сети Z_n при колебаниях сети $E_ф$ 165-265 В. Бустеры не искажают синусоидальности сети, имеют высокую надежность, просты в подключении и имеют конкурентоспособную и гибкую цену в зависимости от целей применения.

а)



б)

Рисунок 3 – Бустеры: а) физическая реализация; б) структурная схема

Технология позволяет удовлетворять широкий спектр потребителей по вопросам регулирования и стабилизации сетевого напряжения. В настоящее время технология бустеров получила внедрения в городских гражданских и сельских объектах. Бустеры могут быть использованы как на подстанции, так и для единичных нагрузок. На базе завода АО ВО «Электроаппарат» и опытного завода «МЭИ» налажено производство трехфазных бустеров на 50, 100, 160 кВт: модели ТТРН-Б-50/0,4-3, ТТРН-Б-100/0,4-3 и ТТРН-Б-160/0,4-3 соответственно.

Компенсаторы реактивной мощности (КРМ)

КРМ обеспечивают регулирование уровня реактивной мощности сети в широком диапазоне. Для обеспечения различных уровней мощности КРМ достаточно лишь одного реактивного элемента [5]. Управление мощностью здесь осуществляется за счет дискретного регулирования прикладываемого к реактивному элементу напряжения. На Рисунке 4 представлена структура и физическая реализация КРМ.

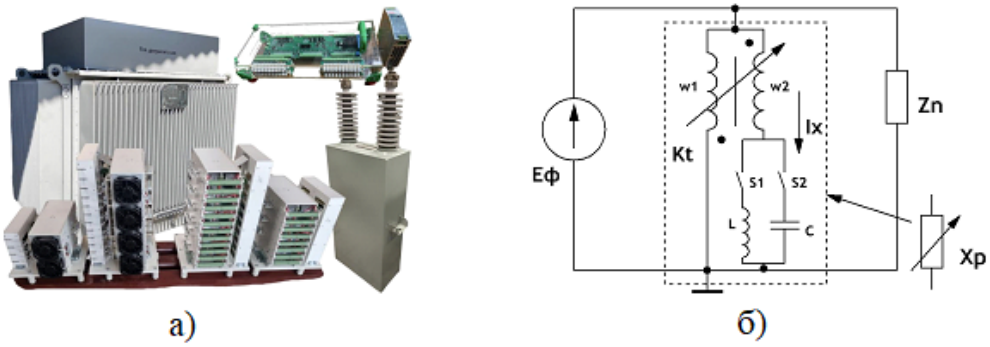


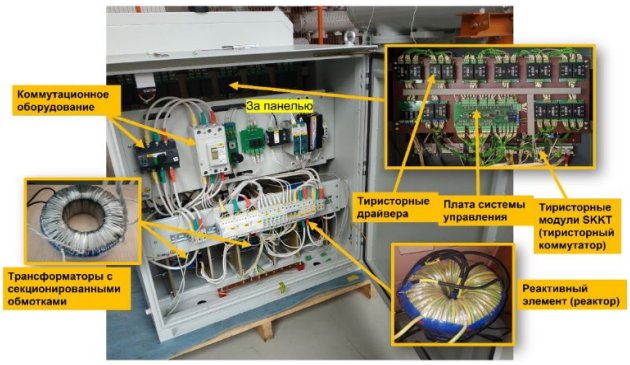
Рисунок 4 – КРМ: а) физическая реализация; б) структурная схема

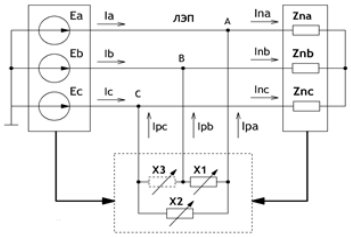
Технология КРМ позволяет реализовывать компенсаторы мощности для задач компенсации мощности как индуктивного, так емкостного характера. Предлагаемая технология КРМ была реализована в виде физической модели мощностью 5 Мвар для сетей класса 10 кВ. В настоящее время изготовление КРМ осуществляется на опытном заводе «МЭИ» и ООО «ЭНЕРВИК».

Устройство симметрирования (УС)

Устройство симметрирует режимы работы распределительной сети за счет перераспределения между фазами активной мощности. УС состоит из управляемых реактивных элементов, включаемых между фазами сети (Рисунок 5). УС позволяет полностью симметрировать режим работы сети, устраняя токи напряжения обратной и нулевой последовательностей. Технология устройства

симметрирования также позволяет компенсировать мощность в фазах сети.





а) б

Рисунок 5 – УС: а) физическая реализация; б) структурная схема.

Выводы

В статье был представлен обзор отечественных разработок устройств силовой электроники для решения задач в области электроэнергетики, в частности, снижения потерь и улучшения показателей качества электрической энергии в сети. Показано, что, имея общую часть силовой схемы построения устройств регулятора напряжения на основе трансформатора с секционированной обмоткой и полупроводниковым коммутатором, можно реализовывать различные технологии построения силовых устройств для управления параметрами электрических сетей. Показаны физические реализации и структурные схемы устройств, которые позволяют осуществлять регулирование, стабилизацию напряжения, симметрирование значений фазовых токов и напряжений, компенсацию реактивной мощности в сети. Разработанные на базе предлагаемых технологий устройства являются результатом более 10 летнего опыта апробации подобных устройств в реальных объектах электроэнергетики, и могут иметь широкую сферу применения с конкурентоспособной ценой.

Перечень ссылок

1. Маслов Д.П. Примеры применения устройств FACTS в различных энергетических системах // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 102. – С. 195–197.

2. Петров М.И. Регулирование коэффициента трансформации трансформатора регулятора переменного напряжения с синусоидальной вольтодобавкой // Интеллектуальная электротехника. – 2020. – № 1. – С. 69–77.

3. Асташев М.Г. Управление полупроводниковыми регуляторами напряжения трансформаторов под нагрузкой в распределительных сетях 6-10 кВ / Асташев М.Г. [и др.] // МНИЖ. – 2021. – №4-1 (106). – С. 41–50.

4. Панфилов Д.И. Разработка и исследование полупроводниковых регуляторов напряжения трансформаторов под нагрузкой для распределительных сетей / Панфилов Д. И. [и др.] // Электротехника. – 2021. – № 11. – С. 59– 66.

5. Панфилов Д.И., Асташев М.Г. Способ управления мощностью статического компенсатора реактивной мощности, работающего в сети синусоидального переменного напряжения. Патент №2739578, от 24.04.2020, опубл. 15.10. 2020, бюлл. №29.

УДК 62-83

РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТЫ И НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ СТАТКОМ

И.П. Шорсткин, М.Г. Киселев
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация

В работе представлена система управления СТАТКОМ, предназначенная для стабилизации частоты и амплитуды напряжения асинхронного генератора (АГ). Предложенная система управления реализована на основе dq теории, и требует для своей работы только напряжение на шине АГ. Моделирование системы управления проводилось при номинальной, пониженной и повышенной мощности. Результаты моделирования демонстрируют правильность работы разработанной системы управления.

This paper presents a novel control system designed to maintain the frequency and voltage amplitude of an asynchronous generator. The proposed control system is based on dq theory and only requires information about the voltage on the generator bus to operate. The control system was simulated at nominal, reduced, and increased power levels. The simulation results confirm the effectiveness of the proposed approach.

Ключевые слова: *СТАТКОМ, асинхронный генератор, ветряная турбина, система управления*

Keywords: *STATCOM, induction generator, wind turbine, control system*

В современном мире, где жизнь людей все больше зависит от технологий и доступа к энергии, автономные генераторы становятся все более популярными. Эти устройства позволяют получать электричество в местах, где нет доступа к централизованной сети, или в случае аварий и перебоев в электроснабжении. Существует множество типов автономных генераторов, которые отличаются по мощности, типу топлива и другим характеристикам.

Одним из перспективных направление в возобновляемой энергетике являет использование энергии ветра для автономных генераторов. В литературе существует большое количество генераторов, используемых для преобразования энергии ветра [1, 2]. В ветроэнергетике для автономных систем мощностью от 10 до 100 кВт может эффективно использоваться асинхронный генератор (АГ) с

короткозамкнутым ротором, т.к. он обладает следующими преимуществами: надежность, дешевизна, прост в обслуживании, способность вырабатывать энергию при переменной скорости вращения ротора. Однако для работы такого генератора необходим источник реактивной мощности. Дополнительную сложность вносит тот факт, что частота и амплитуда напряжения АГ зависит от величины и характера нагрузки. Наличие таких недостатков до недавнего времени не давало эффективно использовать асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором в качестве автономной источника энергии.

Развитие полупроводниковых технологий позволило минимизировать негативный эффект от перечисленных особенностей работы АГ на автономную нагрузку. Можно выделить два основных вида схемотехнических решений, позволяющих поддерживать на заданном уровне частоту и амплитуду выходного напряжения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором: регуляторы электрической нагрузки и регуляторы мощности на базе инверторов напряжения или СТАТКОМ [3, 4].

На рис. 1 показана структурная схема предлагаемого стабилизатора напряжения АГ, построенная на основе СТАТКОМ. Система состоит из: приводного механизма (ПМ), асинхронного генератора (АГ), батареи конденсаторов (С1), статического синхронного компенсатора (СТАТКОМ), датчиков напряжения (ДН), контакторов (К1, К2), нагрузки и системы управления (СУ).

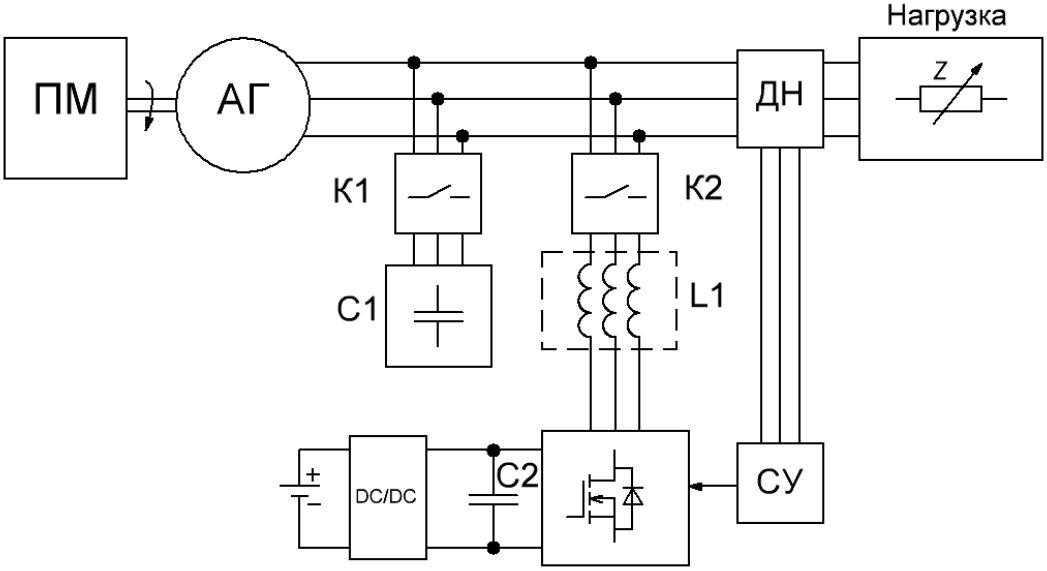


Рисунок 1 – Структурная схема системы стабилизации напряжения асинхронного генератора

В качестве приводного механизма используется ветряная турбина. Ветряная турбина подключена к асинхронному генератору с короткозамкнутым ротором. Для пуска асинхронного генератора необходима реактивная мощность, поэтому первоначальную реактивную мощность АГ получает от конденсаторной батареи С1, т.к. в начальный момент времени на выходе генератора отсутствует напряжение, поэтому конденсатор на стороне постоянного тока СТАТКОМ разряжен. После запуска АГ конденсаторная батарея может быть отключена и источником реактивной мощности будет выступать СТАТКОМ.

Блок системы управления отвечает за регулирование частоты и уровня напряжения на выходе генератора. Обобщенная схема СУ показана на рис. 2. Основным сигналом для системы управления является напряжение на выходе АГ, полученное от датчиков напряжения (ДН). На основе полученного напряжения СУ формирует сигнал задания для полупроводникового преобразователя. Система управления состоит из трех основных блоков: блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), блок вычисления напряжений задания, блок формирования сигналов управления.

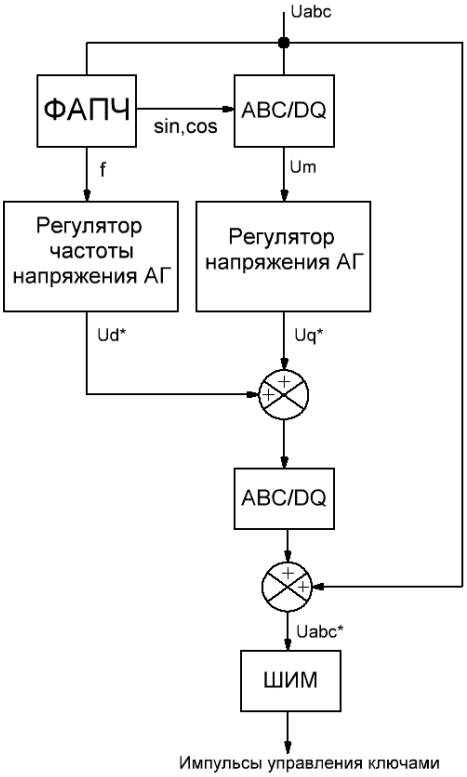


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления СТАТКОМ

Эффективность предложенного алгоритма стабилизации напряжения АГ проверялась на компьютерной модели со следующими параметрами:

• Асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором: номинальная мощность 7.5 кВт, число пар полюсов 1, линейное напряжение 400 В, номинальное число оборотов 1440 RPM

• Батарея конденсаторов емкостью 60 мкФ

• Дроссель индуктивностью 22 мГн

• Нагрузки 40 Ом

• На шине постоянного тока вместо аккумуляторной батареи и DC/DC преобразователя используется источник постоянного напряжения на 750

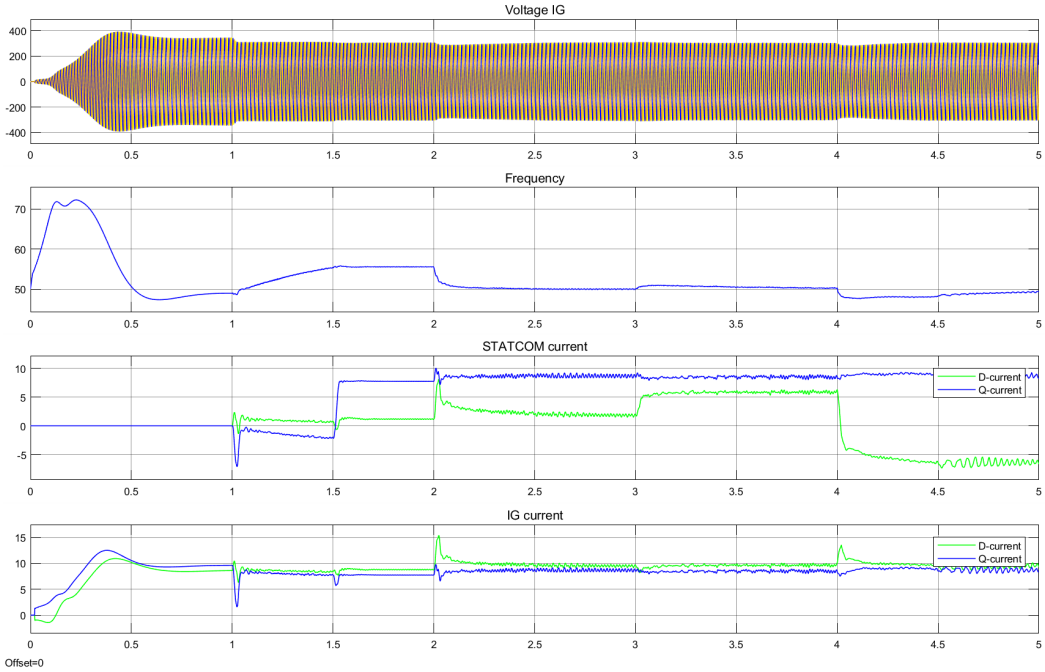


Рисунок 3 – Результаты моделирования при различных режимах работы системы СТАТКОМ-АГ. Графики сверху ввниз: трехфазное напряжение АГ, частота напряжения АГ, dq – составляющие тока СТАТКОМ, dq – составляющие тока АГ

На рис. 3 показаны результаты моделирования СТАТКОМ в режиме стабилизации частоты и напряжения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором. Асинхронный генератор работает на номинальную нагрузку с конденсаторной батареей для возбуждения. В качестве механической нагрузки используется ветротурбина с постоянной скоростью ветра и углом наклона лопастей. В начальный момент времени происходит пуск АГ при помощи конденсаторной батареи. В момент времени t1=1с подключается СТАТКОМ и происходит стабилизация амплитуды напряжения за счет регулирования реактивной мощности АГ. Спустя 0.5с напряжение на шине АГ достигает 310 В, и батарея конденсаторов отключается. С этого момента источником реактивной мощности для АГ становится

только СТАТКОМ. В момент t2=2с к процессу стабилизации амплитуды напряжения АГ добавляется стабилизация частоты. В момент времени t3=3с происходит сброс активной нагрузки до половины номинальной мощности, в результате изменяется скорость и момент двигателя. В момент времени t4=4с происходит подключение дополнительной нагрузки, так чтобы мощность, потребляемая АГ превысила номинальную.

По результатам моделирования видно, что частота и амплитуда напряжения асинхронного генератора стабилизируется к заданным значениям при подключении СТАТКОМ к АГ. На основе полученных результатов можно сделать вывод о корректной работе предложенного алгоритма управления СТАТКОМ.

Перечень ссылок

1. Zuher Alnasir, Mehrdad Kazerani “An analytical literature review of stand-alone wind energy conversion systems from generator viewpoint” in Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 28, pp. 597-615, December 2013

2. T. Shanker and R. K. Singh, "Wind energy conversion system: A review," 2012 Students Conference on Engineering and Systems, Allahabad, India, 2012, pp. 1-6

3. S. Singh, M. L. Azad and A. Kumar, "Electronic load controllers for self excited induction generator," 2016 International Conference on Innovation and Challenges in Cyber Security (ICICCS-INBUSH), Greater Noida, India, 2016, pp. 300-303.

4. J. Dalei, K. B. Mohanty, S. Singh and G. S. Garain, "Fuzzy PI controller for improved voltage regulation in STATCOM based SEIG," 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi, India, 2015, pp. 1-5.

УДК 621.039

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ НА АЭС

Н.В. Кобзева, А.Д. Негодяев
Нововоронежский политехнический институт - филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Нововоронеж, Российская Федерация

Целью доклада является демонстрация результатов анализа, и оценка значимости проводимых мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности АЭС.

The aim of this paper is to present the results of analysis and estimate the effect of conducted measures of increasing the energy efficiency of nuclear power plants.

Ключевые слова: *энергоэффективность, энергоресурсы, АЭС, АО «Концерн Росэнергоатом».*

Keywords: *energy efficiency, energy resources, nuclear power plant, JSC «Concern Rosenergoatom».*

Сбережение ресурсов при производстве (ресурсосбережение) и, как следствие, снижения себестоимости промышленной продукции является одной из важнейших задач современности. В месте с этим, одним из основных критериев развития промышленности является повышение уровня энергоэффективности, который представляет собой отношение полезного эффекта от использования энергоресурсов к затратам энергоресурсов, произведённым в целях получения такого эффекта применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому и физическому лицу.

Повышение уровня энергоэффективности в Российской Федерации регламентируется федеральным законом [1], в соответствии с которым государственное регулирование в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности осуществляется в том числе путем установления:

1) требований к обороту отдельных товаров, функциональное назначение которых предполагает использование энергетических ресурсов;

2) запретов или ограничений производства и оборота в Российской Федерации товаров, имеющих низкую энергетическую эффективность, при условии наличия в обороте или введения в оборот аналогичных по цели использования товаров, имеющих высокую

энергетическую эффективность, в количестве, удовлетворяющем спрос потребителей.

Основываясь на государственной политике в области энергосбережения в АО «Концерн Росэнергоатом» (далее - Концерн) введена «Энергетическая политика АО «Концерн Росэнергоатом» [2], которая определила в качестве основных приоритетов своей деятельности рациональное использование энергетических ресурсов и развитие деятельности в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности при условии соблюдение законодательных и нормативных требований, предъявляемых к деятельности Концерна.

В 2013 году в Концерне были утверждены цели для АЭС в области энергоэффективности на среднесрочную перспективу и тогда же действовала сводная программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности действующих АЭС

Повышение энергоэффективности программы осуществлялось за счет внедрения мероприятий:

1) по повышению надежности и увеличению выработки электроэнергии;
2) по снижению потребления электрической и тепловой энергии;
3) по снижению потребления технической и питьевой воды;
4) по внедрению автоматизированных информационно-измерительных систем учета.

При этом наибольший экономический эффект достигается за счет модернизации основного оборудования приводящей к увеличению выработки электроэнергии и снижению потребления электроэнергии на собственные нужды.

В докладе представлен анализ и сводные данные по целевым показателям энергетической политики Концерна реализуемой в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности на действующих АЭС.

Приведены примеры мероприятий, реализуемых на базе Нововоронежской АЭС, направленных на модернизацию систем учета потребления энергоресурсов, рациональное использования энергетических ресурсов и повышение выработки электроэнергии, выполненных/ выполняемых в рамках энергетической политики АО «Концерн Росэнергоатом».

Перечень ссылок

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

2. Приказ филиала ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС» № 1932а от 15.11.13 г «О вводе в действие Энергетической политики».

3. Приказ АО «Концерн Росэнергоатом № 9/01/934-П от 19.06.2023 г «О введении в действие заявлений о политиках АО «Концерн Росэнергоатом».

4. Сводная Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности филиалов ОАО «Концерн Росэнергоатом» - действующих АЭС. Корректировка 2014 г.

5. «Отчет о проведении энергетического анализа Нововоронежской АЭС за 2022год» № 02/2023-ПТО/06-31г филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС».

6. Решение АО «Концерн Росэнергоатом» № Р1.2.2.06.001.0308-2023 «О замене статора турбогенератора серии ТЗВ-1200-2А УЗ на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 на статор конструкции аналогичной статору турбогенератора энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2, отмене решения № 9/Ф07010318/5727-ТД» от_05.05.2023 г.

7. Отчет о тепловизионном обследовании зданий филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», АО «РИР» 2023 г.

8. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС» «Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности филиала АО «Концерн Росэнерогоатом» «Нововоронежская атомная станция» на 2023-2027 гг» от 19.12.2022 г

УДК. 621.311.212

ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ, ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ДАННЫХ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЭС

Д.С. Сычев
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская федерация

Целью статьи является описание существующих методов учета статей водного баланса водохранилищ и их влияние на энергетические показатели работы гидроэлектростанции. Все расчеты проводились по фактическим данным наблюдений, полученных от Федерального агентства водных ресурсов, региональных УГМС, данных из открытых источников.

The purpose of the article is to describe the existing methods of accounting for articles of the water balance of reservoirs and their impact on the energy performance of a hydroelectric power plant. All calculations were carried out based on actual observation data obtained from the Federal Agency for Water Resources, regional UGMS, and data from open sources.

Ключевые слова: *гидрометеорологические, гидрологические, водохозяйственных данные, гидроэлектростанция.*

Keywords: *hydrometeorological, hydrological, water management data, hydroelectric power station.*

Современный этап цифровизации энергетики в значительной степени связан с созданием новых программных средств, с помощью которых решаются задачи автоматизации управления электрическими станциями ЕЭС России, включая и гидроэлектрические станции (ГЭС). Предыдущий этап автоматизации управления каскадами ГЭС в рамках автоматизированной системы диспетчерского управления ЕЭС был основан на программных комплексах планирования режимов ГЭС на долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном горизонтах. Эти программные комплексы имели различную структуру, разные подходы к решению, разные методы поиска оптимальных решений, разные модели ГЭС и их каскадов.

На сегодняшний день основными исходными гидрометеорологическими, гидрологическими и водохозяйственными данными являются макеты 017 ГЭС, заполняемые на гидроэлектростанции и на ежедневной основе и отправляемые в соответствующий филиал АО «СО ЕЭС».

Гидрологические данные.

Определение параметров режима и величины расхода по разным методам и с использованием различных измерительных систем должно давать близкие результаты, особенно измерения расхода на ГЭС и гидрометеопостах. Однако, такое расхождение между данными измерений на ГЭС и на гидрометеопостах в среднесуточных значениях расхода и в меженный, и в половодный период составляет от 5% до 25%. Государственный мониторинг водных объектов отмечает главные недостатками существующей системы измерения являются:

1) Отсутствие единой системы сбора, обобщения и анализа информации по состоянию поверхностных водных объектов;

2) Недостаточное количества створов наблюдений и продолжающееся сокращение их численности в последние годы.

Исходными данными для бокового притока к водохранилищам ГЭС($W_{бок}$) является также макет 017, заполняемый на ГЭС по данным от регионального УГМС. Надежность данных о боковом притоке также нуждается в подтверждении, ввиду малой освещенности гидрологическими постами.

Метеорологические данные

Согласно методике [1], потери на дополнительное испарение (разница между осадками и испарениями) рассчитывается по формуле:

$$W_{дис} = h_{дис} \cdot F_{ср} \quad (1)$$

где $F_{ср}$ – средняя площадь зеркала водохранилища за расчётный интервал времени (определяется по кривой связи верхнего бьефа),

$h_{дис}$ – слой дополнительного испарения в расчётном интервале, м.

$$h_{дис} = h_{в} - h_{ос}, \quad (2)$$

где, $h_{в}$ – слой испарения с водной поверхности

$h_{ос}$ – слой осадков на водную поверхность

Значения по осадкам и испарению следует учитывать по отдельности. Для определения требуемых значений необходимо понимать, каким количеством метеостанций и гидрологических

постов на сегодняшний день обладает исследуемый объект и их рассредоточенность по площади.

Освещённость водных объектов метеопостами можно рассмотреть на примере водохранилищ Волжско-Камского каскада, представленных в открытых источниках [2]. Список метеостанций в данной статье приводить несообразно, однако стоит остановиться на количественной и качественной оценке полученных данных. Общее количество действующих метеостанций составляет 57 [3]. На метеостанциях были запрошены метеоданные за период с 2010 по 2022 год с расчётным интервалом в 1 сутки в рамках проведения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Исследование и разработка рекомендаций по учету сезонной невязки водохозяйственного баланса Волжско-Камского каскада ГЭС при планировании водно-энергетических режимов». Данные были предоставлены, однако внутри указанных интервалов представлены не все данные (отсутствие измерений за отдельные периоды времени, отсутствие измерений отдельных параметров и т.д.). Также отсутствовали данные для некоторых метеостанций, вследствие чего используемое количество метеостанций можно сократилось до 45.

Для расчета осадков над ложем водохранилищ ситуация схожая, метеостанции вокруг водохранилищ расположены неравномерно, а также из-за отсутствует информация о водосборной площади каждой метеостанции. Следует отметить, что пренебрежение данными по осадкам при расчетах водно-энергетического режима может в значительной степени снизить эффективность работы гидроэлектростанции. Для сопоставления, средняя величина осадков над куйбышевским водохранилищем составляет 2,25 км^3, при полезном объёме в 33,9 км^3, возможный неучтённый дождевой сток может составляет 6,63% от величины полезного объёма.

Испарения, как и осадки требует ежедневного учета и введение их в водных баланс водохранилищ. Из-за отсутствия данных по наблюдениям с помощью плавучих испарителей на большинстве водных объектов, расчёт возможно проводить по формуле Зайкова в мм/сут:

$$W_{\text{исп}} = 0{,}14 \cdot (e_0 - e_{200}) \cdot (1 + 0{,}72 \cdot w_{200}) \quad (3)$$

где, e_0 – значение максимальной упругости водяного пара, определенное по температуре поверхности воды в водоеме, мб;

e_{200} – влажность воздуха над водоемом на высоте 200 см, мб;

w_{200} – среднее значение скорости ветра над водоемом на высоте 200 см, м/с.

Средняя величина испарения с акватории куйбышевским водохранилища составляет 2,95 км3.

Дополнительно стоить отметить необходимость ведения и постоянного мониторинга данных именно по безвозвратному отбору воды из водохранилищ. На сегодняшний день потери на безвозвратное водопотребление возможно определить по данным Федерального агентства водных ресурсов, сведённых из форм 2-ТП водхоз.

Все вышеперечисленные компоненты вносят вклад в размер сезонной невязки водного баланса ГЭС и как следствие снижение эффективности при планировании водно-энергетических режимов.

В настоящее время при планировании режимов работы ГЭС учет невязки водного баланса производится на основании данных о фактической величине невязки водного баланса за предшествующие годы. Величина невязки притока воды в водохранилища за период половодья достигает 5% от годового стока. В частности, на Волжско-Камском каскаде величина невязки достигает 10 км3, что при пропуске только через нижневолжские ГЭС, может позволить выработать дополнительно около 1300 млн. кВтч электроэнергии.

Такие показатели отвечают сразу нескольким критериям работы электроэнергетической системы, критерию максимального вытеснения тепловых мощностей и максимальной экономии топлива в энергосистеме.

Выводы

Существующая сеть наблюдений за гидрометеорологическими и водохозяйственными данными требует увеличения количества автоматизированных постов. Требуется разработка современных методик расчёта бокового притока в водохранилища, т.к. это влияет на точность определения составления водного баланса водохранилищ, зависящих от УГМС.

Перечень ссылок

1. Приказ министерства природных ресурсов Российской Федерации от 30 ноября 2007 года №314 «Об утверждении Методики расчёта водохозяйственных балансов водных объектов».

2. Действующие метеорологические станции сети Росгидромета URL: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2667, дата обращения: 18.05.2023.

3. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2021 году: Справочное издание / Санкт-Петербург, Росгидромет, 2022. // http://www.hydrology.ru/ru/content/obzor-sostoyaniya-sistemy-gidrologicheskih-nablyudeniy-obrabotki-dannyh-i-podgotovki-6.

УДК 621.311.24

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА НА СУТКИ ВПЕРЕД ПО МЕТОДУ СУПЕРПОЗИЦИИ

Н.В. Алиходжина
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация

Целью статьи является описание разработанной модели прогнозирования скорости ветра в интересующей точке по данным прогноза ближайших наземных метеостанций (МС) и данным ветроизмерительных комплексов (ВИК). Верификация модели производится на примере путем сравнения измеренных значений скорости ветра по данным ВИК «Усть-Камчатск» с модельными значениями.

Все расчеты проводились по фактическим данным наблюдений ВИК «Усть-Камчатск», метеостанции «Усть-Камчатск (Аэропорт)» и метеостанции «Ключи». Сравнение разработанной автором модели проводилось с существующим методом корреляционного предсказания, т.к. он используется в случае недостаточности данных на выбранной метеостанции для проведения ветроэнергетических расчетов

The purpose of the article is to describe the developed model for predicting wind speed at a point of interest based on the forecast of the nearest ground-based weather stations (WS) and data from wind measuring complexes (WMC). Verification of the model is carried out by comparing the measured values of wind speed according to the data of the Ust-Kamchatsk WMC with the model values.

All calculations were carried out based on the actual observation data of the Ust-Kamchatsk WMC, the Ust-Kamchatsk (Airport) weather station and the Klyuchi weather station. The model developed by the author was compared with the existing correlation prediction method, since it is used in case of insufficient data at the selected weather station for wind energy calculations

***Ключевые слова**: модели прогнозирования скорости ветра; ветроэнергетика; ВИЭ; краткосрочный прогноз скорости ветра*

***Keywords**: wind speed forecasting models; wind energy; renewable energy; short-term wind speed forecast*

Ветроэнергетика является одной из динамично развивающихся отраслей энергетики в мире. На начало 2023 года суммарная установленная мощность ВЭС в мире составила 908 ГВт, увеличившись за предыдущий год на 77,6 ГВт, что на 17% меньше по сравнению с 2022 г. Программа поддержки ВИЭ (программа ДПМ ВИЭ в соответствии с Постановлением Правительства РФ №449 от 28 мая 2013 г) способствовала появлению в России нового сектора электроэнергетики. В условиях обеспечения технологического суверенитета страны, особое внимание уделяется оборудованию для ВЭС. В связи с этим почти не уделяется внимание совершенствованию методов ветроэнергетических расчетов и моделям прогнозирования основных характеристик ветра (скорость ветра и направление) на площадке расположения ВЭС. На сегодняшний день большая часть моделей, применяемых для прогнозирования скорости ветра, разработана за пределами России, что делает их неприменимыми в наших условиях. Отечественные исследования мало затрагивают данные вопросы и часто базируются на моделях искусственного интеллекта и простой статистической обработке. Главным недостатком таких подходов является неясность процесса построения прогноза, а также трудность оценки правильности получения результатов. С учетом стохастичности ветра говорить о точности моделей трудно, но по некоторым параметрам все же можно оценить их достоверность. Например, по среднесуточной или среднечасовой скорости ветра на площадке измерения, полученной по фактически измеренным данным и по смоделированным.

Целью статьи является описание разработанной модели прогнозирования скорости ветра в интересующей точке по данным прогноза ближайших наземных метеостанций (МС) и данным ветроизмерительных комплексов (ВИК). Верификация модели производится на примере путем сравнения измеренных значений скорости ветра по данным ВИК «Усть-Камчатск» с модельными значениями.

Все расчеты проводились по фактическим данным наблюдений ВИК «Усть-Камчатск», метеостанции «Усть-Камчатск (Аэропорт)» и метеостанции «Ключи». Сравнение разработанной автором модели проводилось с существующим методом корреляционного предсказания, т.к. он используется в случае недостаточности данных на выбранной метеостанции для проведения ветроэнергетических расчетов [1].

В таблице 1 приводится подробная информация по анализируемым ВИК и МС. Расположение ВИК и МС по территории полуострова Камчатки представлено на рисунке 1 (красный маркер – ВИК, желтый маркер – МС). Общий период наблюдений указывает диапазон дат, которые совпадают с данными и датами измерений ВИК. Удаленность МС от площадки ВИК определялась по кратчайшему расстоянию по спутниковым картам.

На МС представлены данные с интервалом 3 часа, т.е. в сутки всего 8 измерений, а на ВИК данные представлены с интервалом в 10 минут. Для расчетов данные ВИК используются с таким же интервалом, как и на МС. Поэтому ряды наблюдений становятся существенно короче, но приведены к одинаковым условиям. Также в виду разного расположения МС и ВИК, данные первых приводятся к географическим условиям расположения ВИК, т.е. выполняется моделирование данных МС с учетом рельефа местности [1].

Таблица 1 – Сведения по ВИК и МС, расположенных в Усть-Камчатске на полуострове Камчатка России

Название	ВИК			Удаленность МС от ВИК, км
	Высота над у.м.	Широта	Долгота	
Усть-Камчатск ВИК	15	56°15'37.09"	162°34'18.03"	-
Усть-Камчатск (аэропорт)	18	56° 14,22'	162°41,52'	8,2
Ключи	29	56° 19'	160° 50'	111,8

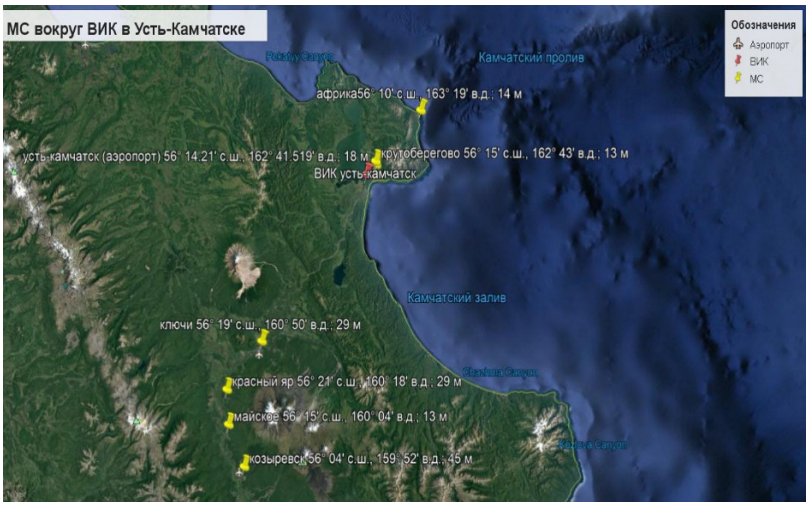


Рисунок 1 – Расположение ВИК и МС на территории полуострова Камчатка

Как видно из рисунка 1 ближайшими к ВИК являются три МС: Ключи, Усть-Камчатск (аэропорт) и Крутоберегово. Согласно данным с сайта «Расписание погоды» [1, 2] данные МС Крутоберегово передаются на МС Усть-Камчатск (аэропорт) поэтому МС Крутоберегово в дальнейших расчетах не рассматриваем.

В текущей практике планирования выработки ВЭС на кратковременный промежуток времени принято использовать данные по прогнозу скорости ветра с ближайшей метеостанции. Чаще всего метеостанция расположена в десятках километров от ВЭС, кроме того их разделяют различные объекты, которые оказывают существенное влияние на аэродинамику местности. В связи с этим для повышения точности прогнозирования выработки ВЭС требуются более точные данные по скорости ветра в точке расположения ВЭС [2].

Автором предлагается использовать данные не одной метеостанции, как это делается сейчас, а использовать все близлежащие станции, которые окружают интересующую нас точку. Моделирование данных проводится по следующему алгоритму:

1. Определяются ближайшие метеостанции, по восьми направлениям розы ветров;
2. Полученные с них данные приводятся к условиям рельефа площадки расположения ВЭС с учетом турбулентности нижнего приземного слоя атмосферы, т.к. используются часовые данные;
3. Моделируются значения скорости ветра с использованием метода наложения (принципа суперпозиции);

Ближайшие метеостанции определяются исходя из того, что удаленность от рассматриваемой точки не более 150 км. Кроме этого, если на направлении встречается несколько станций, то выбирается первая встретившаяся.

На формирование скорости и направления ветра влияет огромное количество факторов. В связи с этим было принято решение использовать готовое решение из гидротермодинамической метеорологии для нижнего приземного слоя атмосферы [3].

Определение коэффициентов для метода наложения определяются по формуле 1:

$$V_{ВИК} = K_{МС_{у-к}} * V_{МС_{у-к}} + K_{МС_к} * V_{МС_к} \quad (1)$$

Анализ влияния точности моделей прогнозирования скорости ветра на прогнозирование выработки одиночной ВЭУ проводился для 2-х методик на примере ВИК «Усть-Камчатск». Сравнение проводилось в виде относительных отклонений $\delta N_{ф\text{-}м}$ модельных рабочих мощностей одиночной ВЭУ $N_м$ относительно фактических

$N_ф$. Определение фактической рабочей мощности проводилось по измеренным значениям скорости ветра на высоте башни ВЭУ по мощностной характеристике ВЭУ марки Komai (мощность 275 кВт, высота башни – 37 м.), установленной на Усть-Камчатской ВЭС. Результаты оценки погрешности по двум рассмотренным методикам представлены в таблице 2 в виде средней ошибки при прогнозировании суточной выработки ВЭС.

Таблица 2 – Средняя ошибка при прогнозировании суточной выработки ВЭУ

Название методики	Ошибка, %
метод корреляционного предсказания	30 %
Модель суточного прогнозирования скорости ветра на площадке ВЭС с учетом турбулентности нижнего приземного слоя атмосферы	15 %

Выводы

Как видно из таблицы 2 по всем методикам ошибка прогноза выработки ВЭУ выше 10%, причем наименьшую ошибку дает разработанная модель. Так же стоит отметить, что каждая модель для построения требует определенную длину ряда наблюдений за скоростью ветра. Данные представлены в таблице 3.

Таблица 3– Минимально необходимая длина ряда наблюдений за скоростью ветра

Название методики	Минимальный период наблюдений
метод корреляционного предсказания	3 года
авторегрессия скользящего среднего	1 месяц
Модель суточного прогнозирования скорости ветра на площадке ВЭС с учетом турбулентности нижнего приземного слоя атмосферы	1 день

Перечень ссылок

1. Ветроэнергетика : учебное пособие по курсам "Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики", "Физические основы использования возобновляемых источников энергии" и др. / А. Г. Васьков, Г. В. Дерюгина, Н. К. Малинин, Р. В. Пугачев, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2016 . – 384 с. - ISBN 978-5-7046-1765-5 .

2. Алиходжина Н.В., Дерюгин Г.В., Чернов Д.А., Тягунов М.Г., Модели вертикального профиля ветра по данным ветроизмерительных комплексов полуострова Камчатка. Журнал «Вестник МЭИ» № 1. 2019 С. 35-42. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-35-42.

3. Лайхтман Д.Л. и др. Динамическая метеорология. Теоретическая метеорология. – © Гидрометеоиздат, 1976, с. 612

УДК 330.1

ПОКАЗАТЕЛЬ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ КОМПАНИЙ

А.Д. Шилина, Ю.Г. Коломиец
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация

В статье рассматривается показатель энергоемкости для электросетевых компаний, его сущность и факторы на него влияющие.

The article discusses the energy intensity indicator of electric grid companies, its essence and factors influencing it.

Ключевые слова: *энергоёмкость, электросетевая компания, энергетика.*

Keywords: *energy intensity, electric grid company, energy industry.*

При оценке эффективности деятельности энергетических компаний используют различные показатели – и экономические, и технические. Некоторые из них, можно считать взаимосвязанными друг с другом. Такие показатели дают понимание о том, где возможно добиться экономии энергии, а сравнение таких показателей в динамике за ряд лет способен дать информацию о том насколько эффективно реализует компания мероприятия по энергоэффективности. Электросетевые компании являются капиталоемкими и затратными на обслуживание. Энергетическая эффективность выражается в полезном расходовании энергии с максимальной эффективностью. Поэтому важно понимать, как можно повлиять на экономию ресурсов, прежде топливно-энергетических (ТЭР).

В данной работе рассматривается такой показатель, отображающий эффективное использование энергоресурсов как энергоемкость, учитывающий расходование всех видов ТЭР, которые были использованы как на основные, так и на вспомогательные технологические процессы. Для электросетевых компаний таковыми являются потери электроэнергии на основном технологическом процессе – транспорт электроэнергии, а также расход электроэнергии, тепловой энергии и моторного топлива – на вспомогательных технологических процессах.

Размер фактических потерь отражается в годовых отчетах электросетевых компаний – как один из ключевых показателей их деятельности. При этом размер фактических потерь является показателем энергоэффективности только основного технологического процесса – транспорта электроэнергии по линиям электропередач, а другие виды затрат ТЭР на вспомогательных технологических процессах – в годовых отчетах электросетевых компаний показываются отдельно. Расходы ТЭР на вспомогательных технологических процессах зависит от структуры электросетевого хозяйства, степени его износа и используемых технологий технического обслуживания, диагностики и ремонта может быть значительным.

Необходимо отметить, что государственным стандартом ГОСТ Р 51750-2001 дается общее определение технологической энергоемкости продукции (услуг) [1]. Вместе с тем, показатель энергоемкости, учитывающий все виды затрат ТЭР электросетевой компании на транспорт электрической энергии – в годовых отчетах электросетевых компаний отсутствует. В нормативных документах, регулирующих деятельность электросетевых компаний, также отсутствуют определение показателя «энергоёмкость электросетевой компании», методика его определения и требования применения как показателя энергоэффективности [2, 3].

С учетом вышеизложенного сформулировано понятие энергоёмкости электросетевой компании и разработаны формулы:

Первый вариант: Энергоемкость электросетевой компании (удельный расход энергии) – это отношение энергозатрат определенного периода на основной и вспомогательные технологические процессы электросетевой компании при оказании услуг по передаче электрической энергии к сумме выручки от услуг по передаче электроэнергии (кг у.т. /млн. рублей).

Этот вариант термина «энергоемкость электросетевой компании» более по смыслу является равнозначным термину «удельный расход энергии» на миллион рублей выручки от услуг по передаче электроэнергии.

Тогда формула технологической энергоемкости электросетевой компании будет иметь вид (1):

$$Э1_{тэск} = \frac{\sum E_{техп}}{В} = \frac{0{,}123 * \Delta E_{ф} + 0{,}123 * E_{ээ} + 1{,}45 * E_{мт} + 0{,}143 * E_{тэ}}{В}, \quad (1)$$

где: Э1тэск – технологическая энергоемкость электросетевой компании (в кг у.т. на млн. рублей);

В – сумма выручка от услуг по передаче электроэнергии потребителям (в млн. рублей);

$\sum E_{техп}$ – потребление энергии (в кг. у.т.) на основной и вспомогательные технологические процессы электросетевой компании при передаче электрической энергии;

$\Delta E_{ф}$ – фактические потери электрической энергии (в кВт*ч) – являются затратами (расходом) электрической энергии для её передачи, при этом умножение на коэффициент 0,123 применяется для перерасчета из кВт*ч в кг. у.т.;

$E_{ээ}$ – потребление электрической энергии на вспомогательные технологические процессы, при этом умножение на коэффициент 0,123 применяется для перерасчета из кВт*ч в кг. у.т.;

$E_{мт}$ – потребление моторного топлива (в кг.) на вспомогательные технологические процессы (ремонт и техническое обслуживание электросетевого хозяйства), при этом умножение на коэффициент 1,45 применяется для перерасчета из кг. дизельного топлива в кг. у.т.;

$E_{тэ}$ – потребление тепловой энергии на вспомогательные технологические процессы, при этом умножение на коэффициент 0,143 применяется для перерасчета из Гкал в кг. у.т.

Второй вариант: Энергоемкость электросетевой компании – отношение энергозатрат определенного периода на основной и вспомогательные технологические процессы электросетевой компании при оказании услуг по передаче электрической энергии к объему электрической энергии, которая поставлена электросетевой компанией по договорам энергоснабжения электрической энергии и потреблена энергопринимающими устройствами ($E_{отп}$) (кг у.т. / кг у.т. – т. е. в данном варианте энергоемкость является по сути коэффициентом энергоемкости).

$$Э2_{тэск} = \frac{\sum E_{техп}}{0{,}123 * Eотп} \quad (2)$$

$$Э2_{тэск} = \frac{0{,}123 * \Delta E_{ф} + 0{,}123 * E_{ээ} + 1{,}45 * E_{мт} + 0{,}143 * E_{тэ}}{0{,}123 * Eотп}, \quad (2.1)$$

Структура второго варианта формулы ($Э2_{тэск}$) по своему виду аналогична первому варианту ($Э1_{тэск}$), с той лишь разницей, что в знаменателе формулы находится не выручка (В), а объем электрической энергии, которая поставлена электросетевой компанией по договорам энергоснабжения электрической энергии и потреблена энергопринимающими устройствами (в кВт * ч) ($E_{отп}$).

Этот вариант термина «энергоемкость электросетевой компании» ($Э2_{тэск}$) более по смыслу является коэффициентом энергоемкости и удобен для проведения сравнительного анализа между различными электросетевыми компаниями, а также для сравнения энергоёмкости до и после

проведения энергоэффективных мероприятий, включающих в себя не только реконструкцию электросетевого хозяйства компании, но и внедрение в уже существующую систему цифровых технологий, которые направлены в основном на снижение потерь, потребления ТЭР и т.п. При этом нельзя не упомянуть, что и сами цифровые технологии затрачивают ТЭР компании на свое функционирование.

Стоит отметить, что как современное российское законодательство в области энергетики и энергоэффективности, так и деятельность электросетевых компаний в части энергосбережения – направлены на снижение потребления ТЭР на основных и вспомогательных технологических процессах, в том числе за счет применения цифровых технологий.

При этом предлагаемый автором показатель оценки энергоэффективности позволил бы производить сравнительный анализ степени влияния энергоэффективных мероприятий.

Перечень ссылок

1. Государственный стандарт Российской Федерации «Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах» (ГОСТ Р 51750-2001)
2. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. №35-ФЗ «Об электроэнергетике»
3. Постановление правительства Российской Федерации от 27 декабря 2004 г. №861 «Правила недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказании этих услуг»
4. Приказ Минэкономразвития России от 1 августа 2019 г. № 471 «Об утверждении методики расчета энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации и оценки вклада отдельных факторов в динамику энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации»
5. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение: учебное пособие для вузов / Г.В. Шведов, О.В. Сипачева, О.В. Савченко; под ред. Ю.С. Железко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 424 с.: ил.

УДК 621.314.57

ТРЁХФАЗНЫЕ ИНВЕРТОРЫ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Г.С. Мыцык, Мье Мин Тант, М.Ю. Румянцев, А.В. Берилов
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва, Российская Федерация

Дано определение способа многоканального преобразования энергетического потока, и на примере структурно-алгоритмического синтеза 3-х фазного инвертора напряжения с 3-х канальным преобразующим трактом (в каждой фазе) рассмотрены особенности его практической реализации. Сформулированные преимущества перед альтернативными вариантами дают основание считать его перспективным для промышленного освоения в области повышенных мощностей.

A definition of a method for multi-channel conversion of an energy flow is given, and using the example of a structural-algorithmic synthesis of a 3-phase voltage inverter with a 3-channel converting path (in each phase), the features of its practical implementation are considered. The stated advantages over alternative options give reason to consider it promising for industrial development in the field of increased capacity.

Ключевые слова: *фазный инверторный модуль, М канальная мостовая его топология, ШИМ в каналах, трансфильтры, фильтры, выходные трансформаторы.*

Key words: *phase inverter module, M-channel bridge topology, PWM in channels, transfilters, filters, output transformers.*

Мировой тенденцией развития сегодня является использование возобновляемых источников энергии: кинетической энергии воды (1), ветра (2) и тепловой энергии солнца (3). Эти три направления использования энергии обобщенно обозначаются как малая энергетика. Для преобразования этих видов энергии в электрическую энергию с заданными параметрами приходиться применять или электромашинные преобразователи (ЭМП), или электронные (статические) преобразователи (ЭПС), или же совместно ЭМП и ЭПС. При повышенных мощностях преобразования, порядка 1 МВА и более наибольшие трудности вызывает практическая реализация ЭПС. По сути, проблема здесь сводится к отсутствию полностью управляемых ключевых элементов (УКЭ) с требуемыми значениями рабочих напряжений, токов и частоты. При использовании реально

располагаемых УКЭ для решения поставленной задачи приходиться использовать или последовательное, или параллельное соединение УКЭ (к примеру, транзисторов). Несложно показать, что на сегодня такой способ решения задачи наращивания мощности ЭПС уже нельзя считать перспективным. Доказательность этого положения основана на том, что при том же (повышенном) значении числа УКЭ современные способы структурно-алгоритмического синтеза (САС) ЭПС позволяют решать эту задачу с явным преимуществом, как по энергетическим, так и по массогабаритным показателям.

Способ многоканального преобразования (МКП) параметров электрической энергии, – как перспективный способ решения поставленной задачи. Суть способа МКП заключается в последовательном или параллельном соединении не отдельных УКЭ, а функционально завершённых преобразующих ячеек (ПЯ), обозначаемых каналами. При этом для получения провозглашаемых преимуществ этого способа преобразования (перед упомянутым традиционным способом) принципиально важным является следующая алгоритмическая характеристика такого многоканального ЭПС (*M*-ЭПС). Применительно к рассматриваемому здесь 3-х фазному инвертору напряжения (ТИН на рис.1) она заключается в том, что: 1) энергетический поток (ЭП) каждой из трёх фаз разбивают на *M* число равных частей; 2) каждую из этих *M* частей преобразуют (инвертируют) по принципиально одинаковым алгоритмам (с ШИМ по синусоидальному закону, например, – рис.2); 3) на тактовой частоте ШИМ последовательно сдвигают по фазе эти части ЭП на фазовый угол $\delta=\pi/M$; 4), а затем эти *M* частей ЭП суммируют или последовательно, или параллельно. Реализация 2-го варианта показана на рис.1, где суммирование токов каналов (т.е. параллельное суммирование частей ЭП) осуществляется с помощью так называемых *M* обмоточных трансфильтров – ТФ-*M*. Заметим, что применительно к применительно к другому классу ЭПС – к трансформаторно-выпрямительным устройствам с МКП (ТВУ-6*M*), используется также и более раннее обозначение этого узла – «уравнительный реактор». Используемый здесь (и в других работах) новый термин «трансфильтр» более адекватно отражает как физику его функционирования, так и подход к его проектированию, причём независимо от применения его в различных классах ЭПС.

Доведение качества выходного напряжения *M*-ТИН до требуемого уровня обеспечивается традиционным путём – применением простейших Г образных фильтров Их установленная мощность определяется тактовой частотой ШИМ – $f_т$ в каналах и

числом каналов *M*: чем больше значения этих параметров, тем меньше значение этого показателя. Значимость этой закономерности иллюстрации следующим примером: при одном и том же значении тактовой частоты однополярной ШИМ (ОШИМ) в каналах ресурсные затраты (в форме произведения параметров фильтра *LC*) при числе каналов в ТИН *M*=4 в 5 раз меньше, чем при *M*=1.

Краткая история освоения принципа МКП применительно к инверторам (у нас в стране, во много на теоретическом уровне) отражена в небольшом перечне публикаций [1÷5]. В зарубежных источниках информации о принципе МКП найти не удалось.

Ещё о структурно-алгоритмической организации М-ТИН+3ТФ-М.Представленный на рис.1 пример *M*-ТИН (при *M*=3) структурно содержит три однофазные 3-канальные инверторные ячейки (3-ОИЯ$_j$), каждая из которых выполнена по мостовой схеме в виде трёх высокочастотных (ВЧ) стоек транзисторов (1, 2; 3, 4; 5, 6), образующих 3 канала, и одной низкочастотной (НЧ) стойки (на транзисторах 7, 8), общей для трёх каналов. В данном случае предпочтение отдано мо-стовой структуре ОИЯ$_j$ (относите-льно более традиционной и простой полумостовой структуры [1]) по двум её преимуществам: 1) из-за лучшего (по сути, в 2 раза) использования напряжения питания (с вытекающими отсюда преимуществами по энергетическим показателям); 2) из-за возможности работы на не симметричную 3-х фазную нагрузку при сохранении амплитудной и фазовой симметрии 3-х фазной системы выходных напряжений *M*-ТИН.

Однако, использование мостовой структуры ОИЯ$_j$ при общем источнике электропитания потребовало введения выходных развязывающе-согласующих трансформаторов напряжения (РСТН) – рис.1. От РСТН (в случае доказанной целесообразности) в принципе можно отказаться, если выполнить источник электропитания не общим для трёх фаз, а в виде 3-х гальванически развязанных источников. Эта задача должна решаться при конкретно поставленном техническом задании. Число каналов определяется заданной мощностью нагрузки и характеристиками реально располагаемых транзисторов.

Дополнительно о трансфильтрах (ТФ-М). Помимо функции суммирования токов каналов ТФ-*M*: а) – по принципу своей работы они выравнивают также значения токов каналов; б) – обеспечивают полное подавление тех высших гармоник в выходных напряжениях каналов, которые образуют симметричные *M* фазные системы.

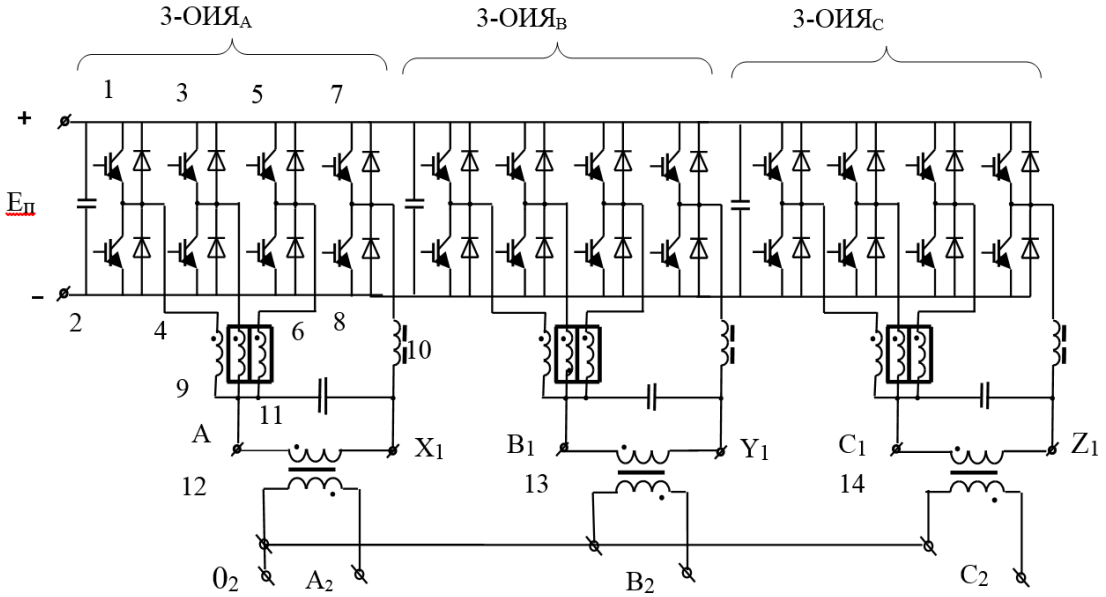


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема силовой части 3-х фазного 3-х канального инвертора напряжения (3-ТИН) с суммированием токов каналов посредством 3-х обмоточных трансфильтров (ТФ-3) и с выходными развязывающе-согласующими трансформаторами напряжения (РСТН)

По физике рабочих процессов ТФ-*М* представляет собой функциональный узел с особыми свойствами. Однако, методика его расчёта во многом аналогична трансформаторам напряжения. Конструктивно обмотки *М*-ТФ целесообразно размещать на стержнях пространственно симметричного магнитопровода.

О принципе реализации алгоритмов управления М-ТИН. Процесс формирования сигналов управления $\psi_1 \div \psi_8$ транзисторами 1÷8 3-ТИН одной фазы показан на рис.1. Он реализуется традиционным («вертикальным») способом – путём сравнения *М* фазной системы развёртывающих сигналов треуго-льной формы – $u_р(t)$ тактовой частоты $f_т$ с 3-х фазными сигналами задания (в данном случае) синусоидальной формы – $u_з(t)$ выходной частоты – f_2 (рис.2). В результате сравнения тих сигналов в компараторах формируются парафазные сигналы с ШИМ (по sin закону) для транзисторов каждой ВЧ стойки. Транзисторы 7, 8 4-й НЧ стойки переключают по простейшему π алгоритму – ψ_7, ψ_8 (рис.2). Нужно заметить, что их токовая нагрузка втрое больше, чем у транзисторов ВЧ стоек.

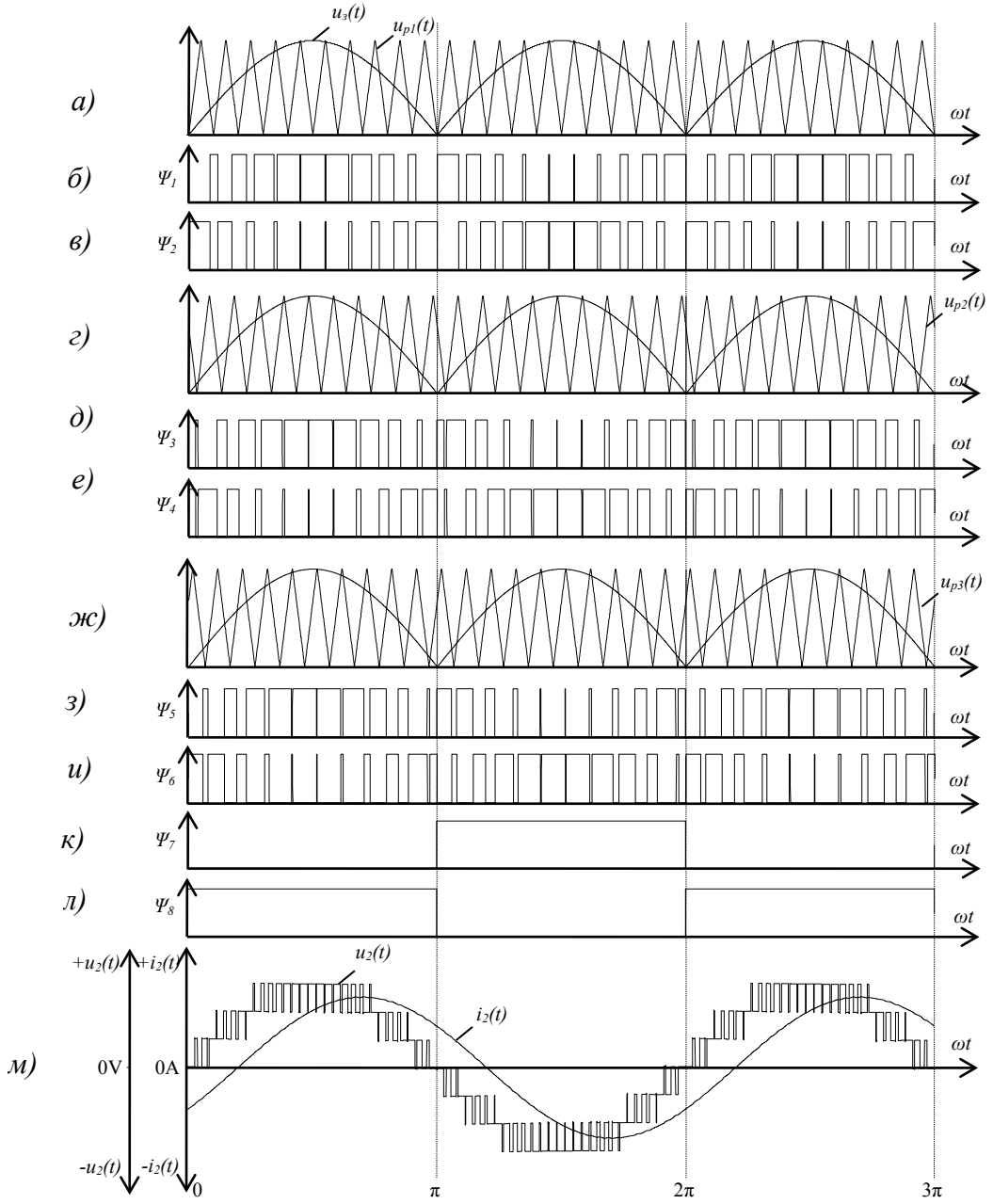


Рисунок 2 – Осциллограммы, поясняющие процесс формирования: *а)÷л)* – сигналов управления $\psi_1 \div \psi_8$ транзисторами 1÷8 3-ОИН$_A$ фазы «*А*»; *м)* – её выходного напряжения (с амплитудно-широтно-импульсной – АШИМ)

Выводы

1. Рассмотренный в работе способ САС *М*-ТИН+3ТФ-*М* направлен на улучшение их показателей качества, который в обобщённых категориях совершенствования и развития может быть сформулирован, как способ (технология) энерго-и ресурсосбережения, улучшения электромагнитной совместимости и расширения областей его применения по уровню мощности, что

даёт основание считать его перспективным для промышленного освоения.

2. Решения класса *M*-ТИН+3ТФ-*M* (преимущественно для солнечных фотоэлектрических станций сетевого типа) способны: а) сохранять заданные показатели качества выходного напряжения при их работе, как на симметричную, так и на не симметричную нагрузки с заданным cosφ; б) решать все традиционно предъявляемые к ним функциональные задачи.

3. С увеличением числа каналов *M* снижаются искажения выходного напряжения *M*-ТИН+3ТФ-*M*, в результате чего снижается установленная мощность выходных фильтров и их постоянная времени, что способствует повышению устойчивости генерирующей системы из нескольких параллельно работающих инверторов.

4. Исследования показали, что габаритная мощность ТФ-*M* (для одной фазы), приведенная по частоте к частоте (50 Гц) выходного напряжения *M*-ТИН, составляет доли % от выходной мощности одной фазы.

5. В качестве инструментария для решения поставленных задач САС использовалось имитационное компьютерное моделирование в среде *OrCAD* при непосредственном и активном участии в этом процессе аспирантов и докторантов.

6. Разработка решений класса *M*-ТИН+3ТФ-*M* доведена в НИУ «МЭИ» (в инициативном порядке) до стадии ОКР.

7. При заинтересованности организаций в промышленном освоении перспективной технологии создания *M*-ТИН+3ТФ-*M* возможно и целесообразно сотрудничество в создании опытных образцов.

Перечень ссылок

1. Авторское свидетельство СССР №341144. Регулируемый преобразователь постоянного тока в переменный с улучшенной кривой выходного напряжения. Авторы: А.В. Иванов, В.И. Климов, В.И. Левин. Опубл. в 1973, Бюл. №2.

2. Мыцык Г.С., Михеев В.В., Фридман П.М. Многоканальное построение преобразователей с промежуточным высокочастотным преобразованием. Электричество, 1992, №4. – С.22÷31.

3. Михеев В.В., Мыцык Г.С., Зуева Е.В. Многофункциональные инверторы с многофазной широтно-импульсной модуляцией. Электричество, 1992, №7. – С.23÷31.

4. Мыцык Г.С, Мье Мин Тант. Структурно-алгоритмический синтез однофазных многоуровневых инверторов напряжения с амплитудно-широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. Промышленная энергетика, 2023, №3. – С.17÷29.

5. Патент РФ на изобретение №2784845, H 02M 7/48 /Трёхфазный инвертор напряжения повышенной мощности для солнечной фотоэлектрической станции // Авторы: Г.С. Мыцык, Мье Мин Тант. Опубл. 30.11.2022. Бюл. №30.

УДК 621.31

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМ ФИЛЬТРОМ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

А.А .Дюдяков, С.А. Янченко
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация

Представлен алгоритм управления на основе расширенного фильтра Калмана для безтрансформаторного ГФ в трехфазной четырехпроводной сети гистерезисным регулятором тока обеспечивающий подавление высших гармоник (ВГ) тока нелинейной нагрузки и регулирование напряжения звена постоянного тока инвертора в условиях искаженного напряжения сети.

In this paper, a control algorithm of three phase four-wired transformerless hybrid power filter (HPF) based on extended Kalman filter (EKF) with hysteresis current control is proposed to improve the performance of the HPF under real grid condition. The proposed control algorithm is designed to provide current harmonics mitigation and dc bus voltage regulation under distorted and unbalanced supply conditions.

Ключевые слова – *качество электроэнергии, высшие гармоники, нелинейная нагрузка, гибридный фильтр, фильтр Калмана.*

Keywords: *power quality, harmonics, non-linear load, hybrid power filters, Kalman filter.*

ГФ – является средством подавления ВГ тока, отличающимся высокой эффективностью и гибкостью благодаря сочетанию активного фильтра (АФ) и пассивного фильтра (ПФ) гармоник. Последовательное соединение ПФ с АФ без трансформатора обеспечивает подавление последовательного и параллельного резонанса, компенсацию реактивной мощности, а также подавление ВГ в широком спектре [1]. Кроме того, большое падение напряжения на ПФ позволяет использовать более низкое напряжение звена постоянного тока (ЗПТ) инвертора АФ и, следовательно, снижает мощность активной части.

Эффективность ГФ реализованного при помощи теории мгновенной реактивной мощности (p-q регулирование), наиболее широко используемым алгоритмом управления для реализации устройств активной фильтрации [2], значительно ухудшается при подаче несбалансированного искаженного сетевого напряжения [3]. Вместо типичного подхода к вычислению опорного тока, основанного на фильтрации ВГ

в системе αβ координат, предлагается алгоритм на основе расширенного фильтра Калмана, который обеспечивает быструю и точную идентификацию ВГ с устойчивостью к искажениям напряжения сети.

На рис. 1, а показана рассмотренная конфигурация ГФ [1], состоящая из ПФ, настроенного на 7-ю гармонику, и последовательного безтрансформаторного АФ на основе трехфазного инвертора напряжения (ИН), управляемого напряжением сети, током нагрузки или током сети. В качестве нелинейной нагрузки используется 6-импульсный мостовой выпрямитель мощностью 10 кВт с LC-фильтром, являющийся источником 5-ой, 7-ой, 11-ой и 13-ой гармоники тока. Неидеальные условия питания, включая искажение напряжения и несимметрию, воспроизводятся управляемым источником сетевого напряжения.

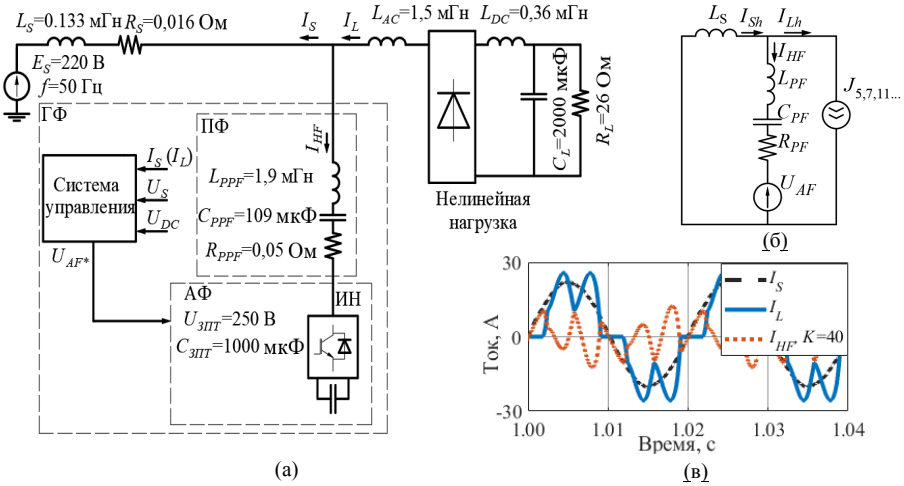


Рисунок 1 – (а) Схема моделируемого ГФ; (б) схема замещения ГФ; (в) кривая тока сети I_S, тока нагрузки I_L и тока ГФ I_{HF}

Недостаток p-q регулирования [3], устраняется при управлении ГФ с помощью расширенного фильтра Калмана, обеспечивающего выявление ВГ.

В данном случае опорный ток для компенсации ВГ при помощи ГФ, определяется гармоническим током нагрузки I_{Lh} и током для заряда емкости ЗПТ инвертора I_{chr} (рис. 2):

$$I_{HF}=I_{Lh}+I_{chr}=\{I_{L1}(t)-I_L(t)\}+\{e_{PI}\cdot\sin(\omega_{S1}(t)\cdot t+\varphi_{1S}(t)+\pi/2)\} \qquad (1)$$

где: I_{L1} – величина основной гармоники тока нагрузки, I_L – измеряемый ток нагрузки; e_{PI} - выходной сигнал с PI регулятора; w_{S1} и φ_{1S} - частота и фаза основной гармоники напряжения сети.

Из (4) следует, что эффективность ГФ, управляемого с помощью фильтра Калмана, в основном зависит от того, насколько точно опре-

делены величина основного тока нагрузки, а также частота и фазовый угол напряжения питания. Это достигается путем применения фильтров Калмана к измеряемым сигналам, которые обеспечивают быструю и точную оценку спектров гармоник независимо от уровней искажений [4].

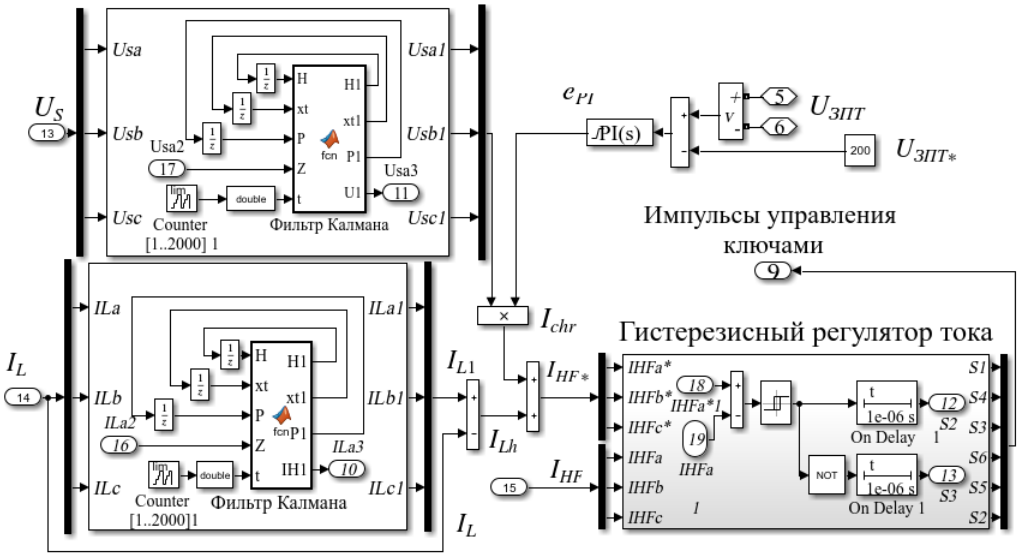


Рисунок 2 – Схема системы управления на основе фильтра Калмана

Рассматриваемый сигнал представляется в виде ряда Фурье следующим образом:

$$y(t)=\sum_{k=1}^{m} r_k \cdot \sin\left(k \cdot \omega \cdot t+\varphi_k\right). \quad (2)$$

Здесь переменные $r1(t),...,rm(t)$, $\omega(t)$, $\varphi1(t),... \varphi m(t)$ для m наиболее значимых гармоник тока нагрузки могут быть использованы для формирования вектора состояния **x**, который полностью определяет сигнал y на временном шаге t:

$$\mathbf{x}(t)=\left[r_1(t),\ldots, r_m(t), \omega(t), \varphi_1(t)\ldots\varphi_m(t)\right]^T \quad (3)$$

Представление вектора (6) во временной области:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}(t))=\sum_{k=1}^{m} r_k(t)\cdot \sin\left(k \cdot \omega(t) \cdot t+\varphi_k(t)\right). \quad (4)$$

В каждый момент времени t соответствующая оценка $\hat{x}(t)$ может быть определена с использованием предыдущей оценки $\hat{x}(t\text{-}1)$ и разницей между измеренным значением $z(t)$ и оценкой во временной области $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t))$:

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t)=\hat{\boldsymbol{x}}(t\text{-}1)+\mathbf{G}(t)\cdot[z(t)\text{-}\boldsymbol{h}\left(\hat{\boldsymbol{x}}(t\text{-}1)\right)] \quad (5)$$

где $\mathbf{G}(t)$ - коэффициент усиления Калмана, определенный для момента времени t как:

$$\mathbf{G}(t)=\mathbf{P}(t)\cdot\mathbf{H}^{\mathbf{T}}(t)\cdot(\mathbf{H}(t)\cdot\mathbf{P}(t)\cdot\mathbf{H}^{\mathbf{T}}(t)+\mathbf{R})^{-1}, \qquad (6)$$

здесь $\mathbf{H}(t)$ - якобиан размера [2m + 1] x1, представляющий частные производные от $h(t)$ по x(t):

$$\mathbf{H}(t)=\mathbf{dh}(t\text{-}1)/\mathbf{dx}(t\text{-}1)=\begin{bmatrix} \sin(\hat{\omega}(t\text{-}1)\cdot t+\hat{\varphi}_1(t\text{-}1) \\ \dots \\ \sin(\hat{\omega}(t\text{-}1)\cdot t+\hat{\varphi}_m(t\text{-}1) \\ \sum_{k=1}^{m}\hat{r}_k\cdot t\cdot\cos\left(\mathrm{k}\cdot\hat{\omega}(t\text{-}1)\cdot\mathrm{t}+\hat{\varphi}_k(t\text{-}1)\right) \\ \hat{\mathrm{r}}_1(t\text{-}1)\cdot\cos(\hat{\omega}(t\text{-}1)\cdot t+\hat{\varphi}_m(t\text{-}1)) \\ \dots \\ \hat{r}_m(t\text{-}1)\cdot\cos(\hat{\omega}(t\text{-}1)\cdot\mathrm{t}+\hat{\varphi}_m(t\text{-}1)) \end{bmatrix} \qquad (7)$$

$\mathbf{P}(t)$ - поправка на ковариационную матрицу ошибок, вычисляется для следующего такта следующим образом:

$$\mathbf{P}(t+1)=\mathbf{\Phi}\cdot[\mathbf{P}(t)\text{-}\mathbf{G}(t)\cdot\mathbf{H}(t)\cdot\mathbf{P}(t)]\cdot\mathbf{\Phi}^{\mathbf{T}}+\mathbf{Q}. \qquad (8)$$

Q – ковариационная матрица процесса размером [2m+1]x[2m+1], определяющая случайное изменение переменных в пределах $\mathbf{x}(t)$; **R** - ковариационная матрица шума измерений.

На рис. 3 представлен гармонический состав тока сети при работе ГФ с двумя алгоритмами управления при синусоидальном, искаженном (6% от 5-й и 5% от 7-й гармоник напряжения) и несбалансированном (K_{2U} составляет 4%) напряжении питания.

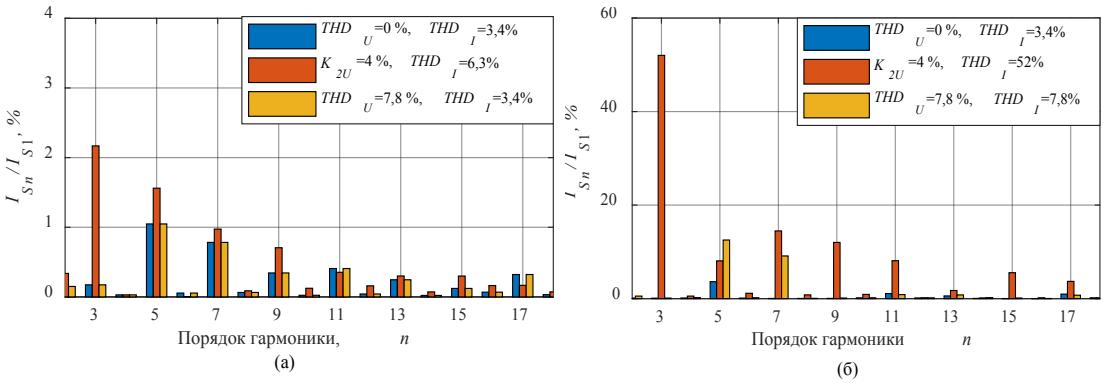


Рисунок 3 – Гармонические спектры моделируемых токов для предложенного подхода с использованием фильтра Калмана (а) и p-q регулирования (б)

Как и ожидалось, ГФ с p-q регулированием демонстрирует высокую чувствительность к качеству питающего напряжения (рис. 3 (б)), что приводит к значительному снижению эффективности компенсации при несинусоидальности (желтые столбцы, рис. 3 (б)) и особенно при несиметрии (красные столбцы, рис. 3 (б)) напряжение питания в сравнении с идеальным случаем сбалансированного синусоидального напряжения (рис. 3(б), синие столбцы).

Напротив, снижение эффективности ГФ с предложенным алгоритмом управления на основе фильтра Калмана гораздо менее заметно: значения основных компенсированных гармоник при несинусоидальном (желтые полосы, рис. 3(а)) и несимметричном (красные столбцы, рис. 3(а)) напряжениях показывают сопоставимые уровни с теми, которые были измерены для идеального случая (синие столбцы, рис. 3(а)).

Выводы

Предложенный алгоритм на основе фильтра Калмана показал высокую устойчивость эффективности при искаженном напряжении сети. Ввиду устойчивости предложенного алгоритма управления на основе фильтра Калмана к искажениям сетевого напряжения, он является более предпочтительным для применения в условиях реальных электрических сетей. В дальнейшем планируется изучение предложенного алгоритма с целью реализации экспериментального прототипа на базе микроконтроллера LAUNCHXL-F28379D.

Перечень ссылок

1. Lam C, Wong M, Han Y (2011) Investigation of LC-hybrid active power filters in resonances prevention and compensation capabilities. In: Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics, Macao, China, 6-7 Oct. 2011, 21-24

2. Lam C, Wong M (2012) Adaptive DC-Link Voltage-Controlled Hybrid Active Power Filters for Reactive Power Compensation. IEEE Transactions on Power Electronics 27(4): 1758-1772.

3. Watanabe E, Aredes M (2004) The p-q theory for active filter control: some problems and solutions. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. 15(1):78-84

4. Uener M (1991) Frequency, Amplitude, and Phase Tracking of Nonsinusoidal Signal in Noise with Extended Kalman Filter, Thesis, Naval Postgraduate School

УДК 621.314

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Р.Н. Саратовский
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
г. Алчевск, ЛНР, Российская Федерация

Рассматривается структура и принцип построения источника питания для индукционного нагрева металлических заготовок и способ регулирования выходного напряжения.

The structure and principle of constructing a power source for induction heating of metal workpieces and a method for regulating the output voltage are considered.

Ключевые слова: источник питания, система управления, индукционный нагрев, инвертор.

Keywords: *power supply, control system, induction heating, inverter.*

В промышленных технологиях электротермической обработки металлов все шире используются электротехнологические системы высокочастотной индукционной термообработки металлов на основе транзисторных источников питания (ТИП), из-за их существенных энергетических и технологических преимуществ. ТИП обеспечивают электропитание индукционных установок токами частотой десятки – сотни кГц и индукционных комплексов мощностью десятки - сотни киловатт, реализуя при этом быстродействующее регулирование режимов электротермической обработки. В последние годы активно разрабатываются специализированные индукционные технологии для реализации процессов, в которых необходимо регулирование выходного напряжения и его стабильность при изменении параметров нагрузки в широких пределах.

Для решения задач, связанных с построением ТИП, для которых нагрузка с постоянными параметрами встречается очень редко, всё чаще применяются мостовые резонансные инверторы напряжения (РИН) нагруженные через согласующий трансформатор на последовательно соединенные нагрузочный конденсатор и индуктор. Данная структура построения ТИП отличается простотой силовой части, но в тоже время сложной системой управления, которая обеспечивает необходимый технологический процесс и нормальную и

безаварийную работу преобразователя. Необходимый технологический процесс зависит от требуемой мощности и режима работы преобразователя, который осложняется еще и тем, что регулировку или стабилизацию выходных параметров необходимо осуществлять в широком диапазоне изменения параметров нагрузки и неоднозначных внешних воздействий.

Поэтому возникает необходимость создания ТИП с функцией регулирования и (или) стабилизации выходных параметров, который мог бы обеспечить качественный процесс индукционного нагрева в условиях быстрого изменения параметров нагрузки и возможного изменения напряжения питающей сети. Разработка такого ТИП является актуальной задачей и имеет большое теоретическое и практическое значение.

В связи с этим **целью** данной статьи является анализ принципа построения ТИП на базе РИН, обеспечивающего глубокое регулирование выходного напряжения, минимизацию его габаритной мощности и эффективный процесс индукционного нагрева металлических заготовок.

При потребности в преобразователе с большой мощностью всё чаще применяют ТИП на базе нескольких высокочастотных РИН построенных по многоячейковой структуре формирования выходного напряжения параллельно-последовательного типа [1], которая получила большое распространение, так как здесь не возникает трудностей с симметрированием токов и напряжений между ячейками РИН. В таких ТИП каждая ячейка РИН питается от общего неуправляемого выпрямителя и содержит свой высокочастотный трансформатор, вторичные обмотки которых соединены последовательно в контур суммирования напряжения. Регулирование выходного напряжения для такой структуры осуществляется кодовой модуляцией, при которой выходные напряжения каждой ячейки РИН пропорциональны весовым коэффициентам двоичного кода, исходя из того, что каждая ячейка РИН может находится в двух состояниях: вольтодобавочном и закороченном [2]. Однако такой принцип регулирования обеспечивает дискретную регулировку напряжения, которая зависит от количества дискретных ячеек РИН и приводит к увеличению массогабаритных показателей ТИП. Для устранения этого недостатка, а именно для обеспечения уменьшения габаритной мощности ТИП и осуществления линейного регулирования выходного напряжения в структуре многоячейкового ТИП решено было сократить количество дискретно регулируемых ячеек РИН до двух (ДРЯ1 и ДРЯ2) и дополнительно ввести непрерывно регулируемую

ячейку РИН (НРЯ). Схема силовой части ТИП состоящего из двух ДРЯ1 и ДРЯ2 и одной дополнительно введенной НРЯ с последовательным контуром суммирования напряжения приведена на рисунке 1.

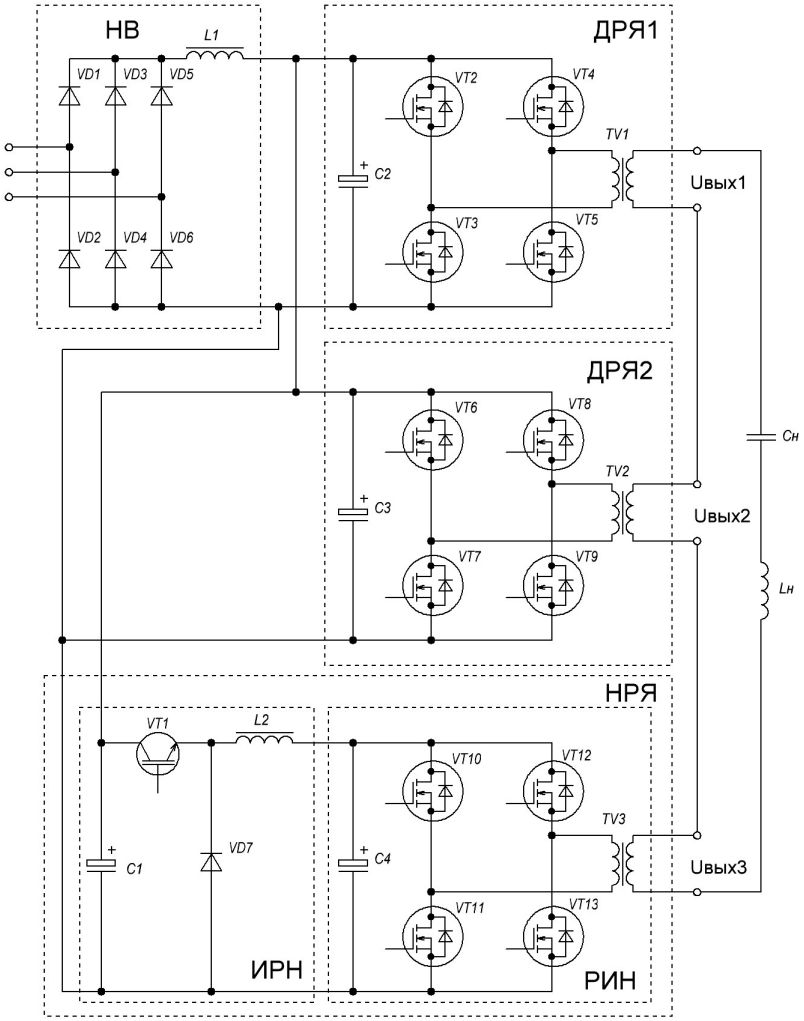


Рисунок 1 – Схема силовой части ТИП

В качестве ДРЯ1 и ДРЯ1 используются РИН на транзисторах типа MOSFET, получающие питание от неуправляемого выпрямителя (НВ). В качестве НРЯ используется РИН, получающий питание от транзисторного импульсного регулятора напряжения понижающего типа (ИРН), который питается от того же НВ. Согласование с индукционным нагревателем (L_H) осуществляется с помощью компенсирующего нагрузочного конденсатора (C_H) и высокочастотных согласующих трансформаторов (TV1 - TV3), вторичные обмотки которых соединены последовательно с C_H и L_H.

Необходимая точность и глубина регулирования выходного напряжения от 0 до $U_{ВЫХmax}$ ТИП обеспечивается линейной регулировочной характеристикой НРЯ и изменением комбинации включённых ДРЯ в моменты достижения НРЯ предельных значений собственного диапазона регулирования напряжения ΔU в зависимости от сигнала задания. При этом выходные напряжения ДРЯ1 и ДРЯ2 ($U_{ВЫХ1}$ и $U_{ВЫХ2}$) имеют одинаковые фиксированные значения равные максимальному значению выходного напряжения НРЯ $U_{ВЫХ3max}$, и в нужный момент находятся в двух состояниях: вольтдобавочном или закороченном. Выходное напряжение НРЯ ($U_{ВЫХ3}$) изменяется линейно в пределах собственного диапазона регулирования напряжения ΔU прямопропорционально величине управляющего сигнала. Таким образом, выходное напряжение ТИП на всем диапазоне регулирования определяется суммой выходных напряжений РИН дискретных ячеек и регулируемой, т.е. $U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ1} + U_{ВЫХ2} + U_{ВЫХ3}$. Сформированное прямоугольное суммарное выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ подается далее на последовательный резонансный L_HC_H контур, где и формируется уже высокочастотное напряжения для нагрева металлических заготовок.

График формирования выходного напряжения ТИП ($U_{ВЫХ}$) на всем диапазоне регулирования представлен на рисунке 2.

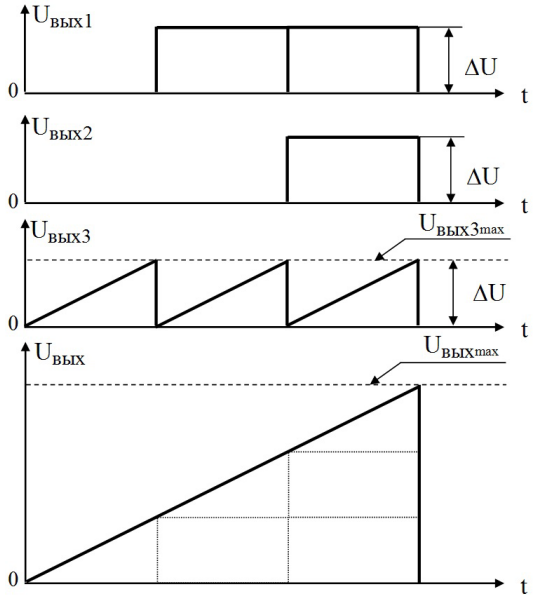


Рисунок 2 – График формирования выходного напряжения ТИП

Регулировочная характеристика НРЯ обеспечивается за счет комбинированного одновременного управления ИРН и РИН. Система управления ИРН, построена по принципу подчиненного регулирования координат и является асинхронной релейной системой,

которая служит для ограничения отдельных фазовых координат ИРН (напряжение на выходе ИРН и тока дросселя) на заданном уровне. Система управления РИН построена по принципу самовозбуждения с адаптивным блоком задания фазового сдвига между выходным током и напряжением РИН, которая позволяет синхронно автоматически подстраивать частоту управления всех РИН на резонансную частоту последовательного колебательного контура, обеспечивая при этом минимальную индуктивную расстройку и оптимальный режим работы на переменную нагрузку с минимальными коммутационными потерями в транзисторах [3] во всех ячейках РИН. В этом случае непрерывное отслеживание изменения резонансной собственной частоты нагрузочного контура, связанное с изменением параметров индуктора в ходе технологического процесса и постоянная подстройка частоты управления обеспечивает оптимальное согласование ТИП с индукционным нагревателем.

Проанализировав структуру построения ТИП можно сделать **вывод**, что рассмотренный ТИП обеспечивает энергетически эффективный процесс индукционного нагрева металлических заготовок и уменьшение его габаритной мощности за счет предложенного способа формирования и глубокого линейного регулирования выходного напряжения.

Адаптивный алгоритм управления РИН по принципу самовозбуждения полностью обеспечивает оптимальную коммутацию силовых транзисторов и устойчивую работу РИН как в различных динамических режимах, сопровождающихся изменением в широком диапазоне параметров индукционной нагрузки, характерных для процесса индукционного нагрева металлических заготовок, так и при скачках сетевого напряжения.

Предложенная структура ТИП может быть использована при разработке надежных, высокоэффективных, универсальных источников питания для различных индукционных технологий.

Перечень ссылок

1. Паралельно-послідовне з’єднання високочастотних інверторів з резонансним контуром на виході / М.М. Юрченко, В.Я. Гуцалюк, П.М. Шевченко [та ін.] // Технічна електродинаміка. Тем. вип. ”Силова електроніка та енергоефективність” – 2005. – Ч.3. – С. 16 – 19.

2. Способ регулирования выходного напряжения преобразователя частоты: пат. 2319282 Рос. Федерация / С.К. Земан, А. В. Осипов, О.Е. Сандырев; № 2006141429; заявл. 23.11.2006; опубл. 10.03.208, Бюл. 7. 10 с. : ил

3. Бондаренко Д.Н. Коммутационные процессы в транзисторных инверторах для индукционного нагрева / Д.Н. Бондаренко, СВ. Дзлиев, Д.А. Патанов // Изв. ГЭТУ. – 1996. – № 497. – С. 98-110.

УДК 621.1

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. В. Канчукова
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
г. Алчевск, ЛНР, Российская Федерация

В статье рассмотрены основные принципы энергосберегательных технологий. Выявлены основные причины внедрения инновационных технологий в энергосбережении.

The article discusses the basic principles of energy-saving technologies. The main reasons for the introduction of innovative technologies in energy saving have been identified.

Ключевые слова: *энергия, возобновляемые источники энергии, вторичные энергоресурсы.*

Keywords: *energy, renewable energy sources, secondary energy resources.*

Основным и наиболее эффективным направлением развития мировой энергетики в настоящее время стало энергосбережение. Это объясняется, прежде всего, постоянным ростом цен на энергоносители. Ощущают на себе данный факт, как промышленные объекты, так и обычные рядовые граждане.

Поэтому работа над поисками новых решений в энергетике, а именно в энергосбережении, активно ведётся учёными разных стран. Главная задача заключается в исключении нерационального, порой даже бездумного потребления природных ресурсов [1].

Энергосбережение базируется на пяти основных принципах:

Первый принцип — это использование альтернативных источников энергии.

К данным источникам энергии относятся:

1. Солнечная энергия.

Главным источником энергии на Земле является Солнце. Ежегодно на поверхность нашей планеты попадает около 173 млн ГВт солнечной энергии, что в 10 тыс. раз превышает мировую потребность в энергоресурсах.

2. Энергия ветра.

Энергия ветра — это одна из форм солнечной энергии, один из самых легкодоступных видов преобразованной энергии Солнца.

3. Энергия воды.

Это источник энергии, который использует кинетическую и потенциальную энергию воды (реки, водопады, приливы и отливы) для преобразования её в механическую энергию и, наконец, в электричество.

4. Биоэнергетика.

В качестве возобновляемого сырья может быть использована биомасса животного и растительного происхождения, продукты жизнедеятельности живых организмов, органические промышленные отходы, жидкое биотопливо и биогаз, получаемый в результате водородного или метанового брожения биомассы под воздействием бактерий.

5. Энергия приливов и отливов.

Морские приливы и волны – еще один способ получения экологически чистой возобновляемой энергии. Как посчитали ученые, мировое потребление энергии приливов может обеспечить до 3,5% электричества.

Применение инновационных технологий в сфере возобновляемой энергии позволяют получать энергию из возобновляемых источников, таких как солнце, ветер, вода и биомасса. Таким образом,

– солнечные панели становятся все более эффективными и доступными;

– ветровые турбины становятся все более мощными и надежными;

– гидроэлектростанции становятся все более эффективными и экологически чистыми.

– биогазовые установки производят энергию из органических отходов.

Также инновации в сфере возобновляемой энергии имеют важнейшее значение для решения проблем, связанных с изменением климата. Внедрение таких технологий помогают сократить выбросы парниковых газов, которые и являются основной причиной изменения климата.

И нельзя не затронуть и экономический аспект. Инновации в сфере возобновляемой энергии способствуют экономическому росту и развитию, так как они приводят к созданию новых рабочих мест, тем самым повышают конкурентоспособность компаний [2].

Второй принцип — использование вторичных энергоресурсов.

Запасы ископаемых видов топлива, которые можно использовать для выработки энергии, не безграничны. Некоторые виды уже заканчиваются, поэтому постоянно растет рыночная стоимость энергоресурсов. В связи с этим, использование побочных продуктов промышленного производства рассматривается как один из наиболее эффективных методов, способствующих избежать энергетический, и вместе с тем, экономический кризис мирового масштаба.

Все передовые страны встали на путь перехода на ВИЭ.

Технология преобразования механической энергии в электрическую достаточно сложная. Помимо этого, в процессе генерации электричества попутно вырабатываются побочные продукты или отходы, не полностью утратившие потребительскую стоимость исходного сырья.

Вторичные энергоресурсы мало используются на производстве и тратятся впустую. Но для выработки энергии они являются потенциально эффективными, которые можно использовать для покрытия собственных нужд предприятий.

По мнению экспертов, использование вторичных энергоресурсов, которые не являлись целью производства энергии, может быть экономически выгодным. Оно позволяет снизить затраты времени, минимизировать капиталовложения в выработку электроэнергии с помощью тепловых, газовых, угольных и атомных станций.

Кроме того, рациональное природопользование позволяет сократить тепловое загрязнение в промышленно развитых районах и способствует улучшению экологической ситуации на планете.

Основные направления использования вторичных энергоресурсов:

– *топливное направление*, предполагающее использование побочных продуктов в качестве тепла или для выработки тепловой энергии в утилизационных установках;

– *силовое,* предусматривающее использование ВЭР в виде электрической или механической энергии, полученной в утилизационных установках;

– *комбинированное,* предусматривающее использование ВЭР в качестве источника электрической (механической) энергии и тепла, которые получены одновременно в утилизационных установках.

Третий принцип — внедрение энергоэффективных технологий и оборудования.

В настоящее время применение энергоэффективных технологий на производственных объектах находится не на должном уровне.

Однако в данном направлении ведутся технические мероприятия, которые способствуют энергосбережению. Вот некоторые из них:

1. Установка выключателей нагрузки перед вводами силовых трансформаторов.

2. Замена высоковольтных масляных выключателей вакуумными устройствами.

3. Применение частотного регулирования насосов систем водоснабжения;

4. Установка терморегуляторов на системы электрического отопления;

5. Оснащение систем электроснабжения современными устройствами контроля потребления электрической энергии.

6. Использование установок глубокой утилизации тепла.

7. Применение контактных теплообменников – установок использования скрытой теплоты парообразования уходящих дымовых газов.

8. Перевод паровых котлов в водогрейный режим.

9. Использование когенерационных установок (мини ТЭЦ) на базе газопоршневых двигателей средней и большой мощности, которые имеют максимальные на сегодняшний день значения электрического КПД и коэффициента полезного использования теплоты топлива (до 90%).

10. Внедрение автоматизированных информационно-измерительных систем.

11. Внедрение цифровых решений, которые помогают повысить управляемость сетей, упростить процесс технического присоединения, выровнять спрос и предложение. В список основных компонентов «умной» сети входят: накопители энергии, интеллектуальные приборы учета электроэнергии, «умные» трансформаторы, а также другие элементы сети, необходимые для интеграции распределенных источников генерации и ВИЭ [3].

Список разрабатываемых технологий постоянно обновляется в сторону увеличения.

Четвертый принцип — оценка экономической целесообразности применения энергосберегающих технологий и решений.

Для реализации четвертого принципа важнейшим условием является создания системы энергетического менеджмента – управления энергоресурсами на промышленном предприятии.

Условно разработку системы можно разделить на три этапа:

1. Принятие организационных мер.

2. Выделение финансовых ресурсов.

3. Контроль.

Пятый принцип — создание информационной системы пропаганды сбережения энергии, подготовки и обучения кадров для области энергосбережения, изменения психологии населения.

Постоянное повторение одних и тех же утверждений, с целью привыкания к ним — является одним из самых эффективных способов пропаганды. А для подготовки квалифицированных кадров в области энергосбережения в образовательных учреждениях необходимо выполнять в совокупности три вида мероприятий, таких как:

– мониторинг потребления энергетических ресурсов;

– регулирование расхода носителя тепла;

– повышение мотивации участников.

Основой работы в данном направлении является правильно научить студентов беречь, а главное – сохранять энергию дома. Только в этом случае они осознают это в полной мере, и в будущем смогут совершить много открытий в энергосбережении не только на своих рабочих местах, но и в стране в целом [4].

Выводы

Энергосберегающие технологии в современном мире крайне важны и, в дальнейшем, должны занимать приоритетное место среди остальных направлений развития общества.

Перечень ссылок

1. Асланова, Г. Н. Перспективы внедрения энергосберегающих технологий / Г. Н. Асланова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 23 (103). — С. 102-104. — URL: https://moluch.ru/archive/103/23798/.

2. Инновации в сфере энергосбережения и возобновляемой энергии. — URL : https://ecvdo.ru/?ysclid=lw5emm34w755752163. Электронный ресурс.

3. Энергоэффективные и энергосберегающие технологии и оборудование. — Текст // Рынок Электротехники. — 2021. — URL: https://marketelectro.ru/node/energoeffektivnye-i-energosberegayushchie-tekhnologii-i-oborudovanie?ysclid=lw5cubaj474918847. Электронный ресурс.

4. Пропаганда энергосбережения //Информационный ресурс: http://www.energosovet.ru/stenergo.php?idd=65.

УДК 621.3

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТКОМ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Ф.А.Тришкин
ФГБОУ ВО «Кузбасский Государственный Технический Университет имени Т.Ф. Горбачева»
г. Кемерово, Российская Федерация

Аннотация: в статье рассказывается о применении СТАТКОМов на производстве, об их возможностях и преимуществам. Производится сравнение СТАТКОМа и батарей конденсаторов по их ключевым особенностям. Дается рекомендация о выборе необходимого компенсирующего устройства.

Annotation: The article discusses the application of STATCOMs in industry, their capabilities and advantages. A comparison is made between STATCOM and capacitor banks in terms of their key features. Recommendations are given on the selection of the necessary compensating device.

Ключевые слова: *СТАТКОМ, батареи конденсаторов, анализ перспектив применения.*

Keywords: *STATCOM, capacitor banks, analysis of application prospects.*

СТАТКОМ, или статический компенсатор реактивной мощности, представляют собой передовое решение для управления потоками реактивной мощности в электрических сетях в диапазоне от -100% до +100%.

Рисунок 1 – Статический компенсатор СТАТКОМ на 5 МВАр

В основе работы СТАТКОМов лежат управляемые силовые электронные компоненты, такие как тиристоры или транзисторы, которые подключаются к сети через трансформатор. Возможность регулировать фазовый сдвиг между током и напряжением, как в сторону опережения, так и запаздывания, является главным их преимуществом. Это позволяет компенсировать как индуктивную, так и емкостную реактивную мощность, не прибегая к большим и инертным реакторам и конденсаторам, как это делается в традиционных устройствах компенсации реактивной мощности (СТК или УШР) [1]. Благодаря этому, СТАТКОМы обладают компактными размерами, быстродействием и высокой энергоэффективностью. В соответствии с современными требованиями к качеству электроэнергии, СТАТКОМы вместе с СТК, фактически обеспечивают электромагнитную совместимость между сетью и нестационарными нагрузками, например, дуговые печи или мощные частотно-регулируемые приводы(ЧРП). В отличие от СТК, которые регулируют только реактивную мощность, СТАТКОМы способны управлять токами во всех четырех квадрантах, что позволяет независимо регулировать как реактивную, так и активную мощность.

СТАТКОМы необходимымы для оптимизации работы промышленных предприятий с переменными нагрузками. Они обеспечивают балансировку нагрузки, симметрию напряжения, стабилизацию напряжения и фильтрацию высших гармоник. В результате повышается эффективность работы электрооборудования, а также достигается экономия энергии во всей системе электроснабжения, от передачи до потребления[2].

СТАТКОМ также может использоваться для балансирования активной и реактивной мощности несимметричных нагрузок на промышленных предприятиях. Он способен компенсировать реактивную мощность нагрузки в каждой фазе и обеспечивать равенство активных токов в питающей линии. Для балансирования активной мощности несимметричной нагрузки также может применяться статический компенсатор реактивной мощности, однако его мощность будет значительно выше по сравнению с аналогичным устройством типа СТАТКОМ. Выбор оптимального устройства для балансировки нагрузки требует математического моделирования и технико-экономического сравнения вариантов.

Также возможно применение конденсаторной батареи в сочетании с СТАТКОМом для снижения его требуемой мощности и общей стоимости устройства. Использование СТАТКОМа помогает стабилизировать напряжение и обеспечивает равномерную нагрузку

сетевого трансформатора, что важно для подключения специфических нагрузок к электроснабжению с ограниченной мощностью и снижения технологического брака[3].

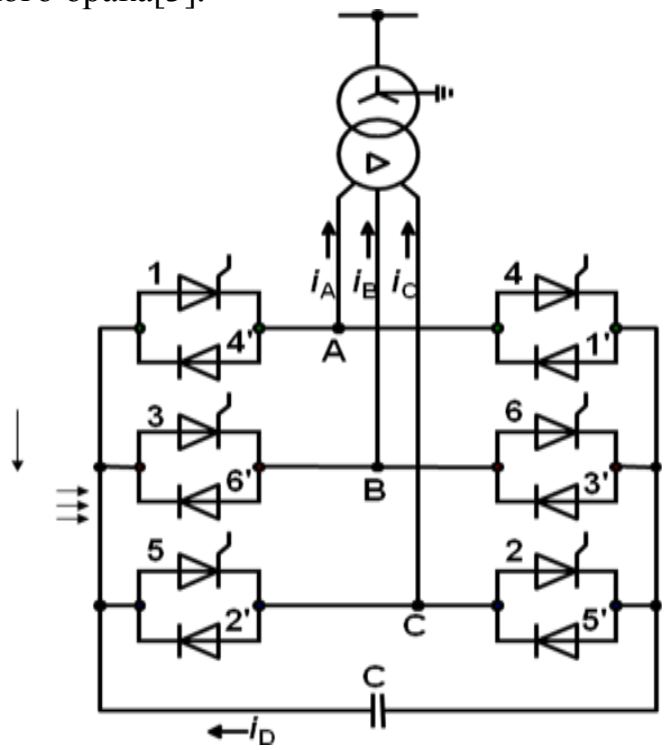


Рисунок 2 – Функциональная схема статического компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ

Сравнение СТАТКОМов и батарей конденсаторов. Оба варианта имеют свои преимущества и недостатки, от которых следует отталкиваться при выборе нужного компенсирующего устройства, так как их эффективность зависит от условий применения на производстве.

Среди преимуществ применения СТАТКОМов по сравнению с батареями конденсаторов можно выделить то, что они имеют более быстрое время отклика, более широкий диапазон регулирования, повышенную надежность, улучшенное качество электроэнергии.

СТАТКОМы могут почти мгновенно, со скоростью около 4 мс, реагировать на изменения реактивной мощности, что обеспечивает более стабильную работу сети. Способность как генерировать, так и поглощать реактивную мощность позволяет им более точно регулировать коэффициент мощности, степень регулирования составляет 100% как в положительную, так и отрицательную сторону. СТАТКОМы обладают более высокой устойчивостью к перегрузкам и колебаниям напряжения, так они способны выдерживать двух-трехкратную перегрузку в течение 300 секунд. Использование

данных компенсаторов в качестве активного фильтра гармоник позволяет в 30–100 раз уменьшить уровень нежелательных гармоник в сети переменного тока и отказаться от использования мощных пассивных фильтров.

Из недостатков СТАТКОМов можно выделить более высокую стоимость, сложную установку и обслуживание по сравнению с батареями конденсаторов. Помимо прочего данное оборудование требует более квалифицированного персонала, что может создать ряд трудностей при их применении на небольших предприятиях[4].

При применении батарей конденсаторов можно выделить такие преимущества как низкая стоимость, простая установка и обслуживание, потому что они относительно просты в конструкции. Но также можно выделить и недостатки такие как: медленное время отклика, ограниченный диапазон регулирования, низкая надежность.

Батареи конденсаторов не способны реагировать на изменения реактивной мощности так быстро, как СТАТКОМы, потому что в их конструкции используются механические переключатели для подключения и отключения конденсаторов. Способность генерировать только реактивную мощность ограничивает их возможность регулировать коэффициент мощности, так же батареи конденсаторов более подвержены перегрузкам и колебаниям напряжения, что уменьшает их ресурс.

Выбор между СТАТКОМами и батареями конденсаторов для предприятия зависит от ряда факторов, таких как его размер, тип используемого оборудования и требования к качеству электроэнергии. В целом, СТАТКОМы могут обеспечить более высокую производительность и эффективность, но они также являются более дорогим вариантом. Батареи конденсаторов могут быть подходящим выбором для небольших предприятий с менее строгими требованиями к качеству электроэнергии.

Внедрение компенсирующих устройств позволит снизить затраты на электроэнергию, так как компенсация реактивной мощности снижает потребление электроэнергии и, следовательно, затраты на неё; увеличить срок службы оборудования, потому что более качественная электроэнергия продлевает срок службы; повысить производительность, так как более стабильная работа сети способна повысить эффективность предприятия.

Вывод

Несмотря на высокую стоимость СТАТКОМа, его применение имеет такие плюсы как более тонкая и быстрая регулировка, возможность, как генерации, так и потребления реактивной энергии. Раскрыть все свои преимущества СТАТКОМ

может на производствах с резкопеременным большим потреблением реактивной мощности, таких как металлургическое производство, где невозможно постоянно переключать БК.

Перечень ссылок

1. СТАТКОМ – основа регулирования реактивной мощности в интеллектуальной энергосистеме. – URL: https://xn-----glcfccctdci4bhow0as6psb.xn--p1ai/nomera-zhurnalov/2-2-2012-g/statkom-osnova-regulirovaniya-reaktivnoj-moshchnosti-v-intellektualnoj-energosisteme/ (date accessed: 11.04.2024). – Text: electronic.

2. Устройства симметрирования напряжения в электрических сетях: принцип работы, опыт внедрения и пер-спективы применения – URL: https://ukkm.ru/articles/ustrojstva-simmetrirovaniya-napryazheniya-v-elektricheskih-setyah-printsip-raboty-opyt-vnedreniya-i-perspektivy-primeneniya/ (date accessed: 11.04.2024). – Text: elec-tronic.

3. Какова роль управляемых устройств компенсации реактивной мощности типа СТАТКОМ, кем они производятся и где применяются? – URL: https://energyland.info/analitic-show-129974 (date accessed: 11.04.2024). – Text: electronic.

4. Новые технологии компенсации реактивной мощности – URL: https://www.elec.ru/publications/promyshlennoe-oborudovanie/2183/ (date ac-cessed: 11.04.2024). – Text: electronic.

УДК 621.313.32.317

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОВЫХ ТУРБИН ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ИМПУЛЬСНОЙ РАЗГРУЗКИ

А.М. Ларин, А.А. Булгаков
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Предлагается способ аналитического представления экспериментальных импульсных характеристик паровых турбин полиноминальными функциями высокого порядка. Получены математические соотношения, позволяющие аналитически описывать импульсные характеристики для любой заданной интенсивности и продолжительности воздействия.

A method is proposed for the analytical representation of experimental impulse characteristics of steam turbines by high-order polynomial functions. Mathematical relations have been obtained that make it possible to analytically describe the impulse characteristics for any given intensity and duration of influence.

Ключевые слова: *импульсная характеристика, полиноминальная функция, интенсивность, продолжительность воздействия.*

Keywords: *impulse response, polynomial function, intensity, duration of influence.*

В настоящее время в электроэнергетических системах (ЭЭС) для предотвращения нарушения динамической устойчивости широко используется противоаварийная автоматика (ПА) [1] балансирующего действия путем изменения момента турбины. При этом в избыточных узлах ЭЭС осуществляется импульсная разгрузка (ИРТ), которая может сочетаться с ограничением мощности (ОМТ).

Поведение ЭЭС при воздействии на момент турбины зависит от условий работы, вида возмущающего воздействия, импульсной характеристики, параметров сети и др. Поэтому, для оценки эффективности применения ИРТ в подсистеме автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) необходим в каждом конкретном случае количественный анализ электромеханических переходных процессов.

Дозировка интенсивности импульсного воздействия на систему регулирования турбины производится по результатам анализа

переходных процессов с учетом экспериментально полученных импульсных характеристик, представляющих собой зависимости глубины разгрузки турбин от параметров импульса, с учетом предшествующего режима и тяжести аварии.

При экспериментальном определении импульсных характеристик [2] осуществляется воздействие прямоугольными импульсами, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры типовых экспериментальных импульсов

Интенсивность, h_u	Длительность импульса, с						
0,5	–	–	–	0,10	0,15	0,25	0,35
1,0	0,05	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7
2,0	0,05	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7
3,0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,5	0,7
4,0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3	0,5

Импульсы характеризуются двумя параметрами: длительностью t_u в секундах и интенсивностью сигнала h_u в относительных единицах.

Для отработки методики определения оптимальных управляющих воздействий в математических моделях необходимо иметь аналитическое описание импульсных характеристик для различной интенсивности h_u и длительности воздействия t_u, соответствующих табл. 1.

На рис. 1 приведены найденные в литературе [3], графические зависимости некоторых экспериментальных импульсных характеристики одного из энергоблоков.

Целью настоящей работы является аналитическое представление на основе исходных четырех экспериментальных зависимостей, позволяющее определять импульсные характеристики для любой заданной интенсивности и продолжительности его воздействия, соответствующих типовым характеристикам (табл. 1).

В работе предложен способ аппроксимации импульсных характеристик полиноминальными функциями.

Для этого осуществлялось графическое построение исходных экспериментальных характеристик и производился замер координат с дискретностью $\Delta t = 0{,}01c$. Результаты такого графического построения представлены на рис. 1.

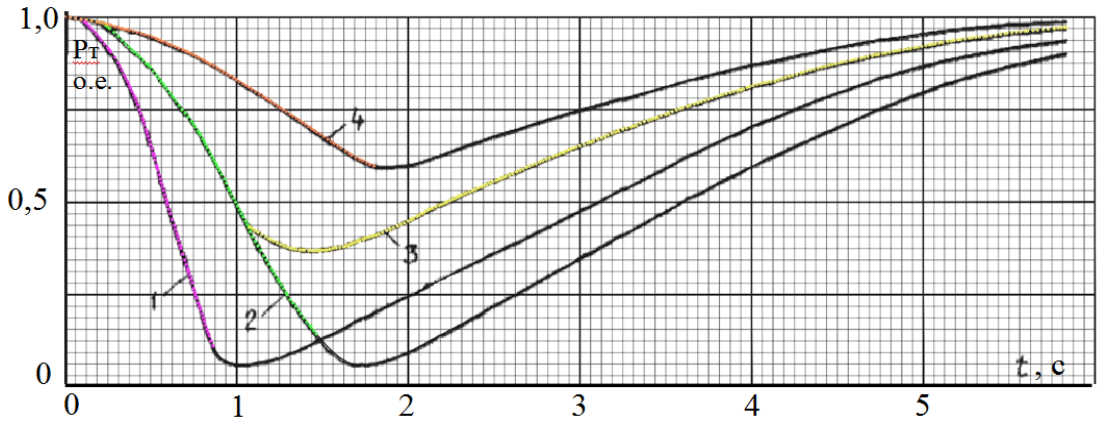


Рисунок 1 – Дискретное представление экспериментальных импульсных характеристик

1) – $h_u = 4$, $t_u = 0{,}3$ с; 2) – $h_u = 3$, $t_u = 0{,}5$ с;
3) – $h_u = 3$, $t_u = 0{,}3$ с; 4) – $h_u = 1$, $t_u = 0{,}6$ с.

Предлагаемый подход основан на аналитическом представлении импульсных характеристик полиномами высокого порядка на трех временных участках.

Первый участок характеризуется линейной функцией (мощность турбины в исходном режиме не изменяется) $P_0(t) = P_0 = const$. Длительность запаздывания во времени принята одинаковой для всех характеристик различной интенсивности и равной $T_0 = 0{,}1$ с.

Второй участок представляется полиноминальной функцией $P_1(t)$ и зависимостью определения момента времени запаздывания после снятия импульсного воздействия $T_1(t_u)$. Анализ этого диапазона изменения мощности показал, что характер снижения момента турбины зависит от интенсивности h_u. Степень уменьшения определяется длительностью импульса t_u.

Для определения зависимости $P_1(t)$ второго участка использовалась полиноминальная аппроксимация с применением метода наименьших квадратов.

Путем повышения степени полинома было определено оптимальное значение его степени. Для данного участка – шестая степень. В этом случае полиноминальная функция $P_1(t)$ для рассматриваемого участка имеет вид:

$$P_1(t) = a_{1.6} \cdot t^6 + a_{1.5} \cdot t^5 + a_{1.4} \cdot t^4 + a_{1.3} \cdot t^3 + a_{1.2} \cdot t^2 + a_{1.1} \cdot t + a_{1.0}, \quad (1)$$

где $a_{1.6} - a_{1.0}$ – коэффициенты полиноминальной функции (1).

Полученные в ходе аппроксимации коэффициенты функции $P_1(t)$ для исходных экспериментальных импульсных характеристик

приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты аппроксимации второго участка экспериментальных импульсных характеристик

Коэффициент функции	Параметры импульса			
	$h_u = 4$	$h_u = 3$	$h_u = 2$	$h_u = 1$
$a_{1.6}$	–0,059596	–0,002614	–0,000969	–0,000083
$a_{1.5}$	0,567735	0,041985	0,016279	0,002438
$a_{1.4}$	–2,161853	–0,265985	–0,109085	–0,024600
$a_{1.3}$	4,181454	0,838973	0,369688	0,116996
$a_{1.2}$	–4,294957	–1,359848	–0,660177	–0,283431
$a_{1.1}$	0,692670	0,262804	0,108691	0,025708
$a_{1.0}$	0,967565	0,983612	0,989690	0,992962
$b_{1.1}$	1,056300	1,336000	1,339500	1,341400
$b_{1.0}$	0,523100	0,661600	0,663400	0,664300

Момент времени, отражающий запаздывание после снятия импульсного воздействия, зависящий от параметров импульса (интенсивности h_u и длительности t_u) определялся в соответствии со следующим соотношением заданной интенсивности импульса:

$$T_1(t_u) = b_{1.1} \cdot t_u + b_{1.0}, \tag{2}$$

где $b_{1.1}$, $b_{1.0}$ – коэффициенты функции (2).

Полученные в ходе аппроксимации коэффициенты $b_{1.1}$ и $b_{1.0}$ для каждой отдельной экспериментальной импульсной характеристики также приведены в табл. 2.

Третий участок представляет собой ***идентичный*** для всех характеристик отрезок, отражающий запаздывание и увеличение мощности после того, как прекратилось импульсное воздействие. Для этого интервала путем параллельного переноса соответствующей характеристики вдоль оси времени и масштабирования относительно оси мощности турбины были получены коэффициенты полинома девятого порядка. В качестве исходных данных для аппроксимации был использован соответствующий отрезок импульсной характеристики со следующими параметрами: h_u=3; t_u=0,3 с.

Выбор этого участка обусловлен явно выраженным моментом запаздывания после снятия импульсного воздействия. Для последующей аппроксимации, параллельного переноса и масштабирования данный участок был смещен по оси времени t к началу координат $(t - T_1)$ и перенесен по оси мощности P на $-P_0$. Указанные графические построения показаны на рис. 2.

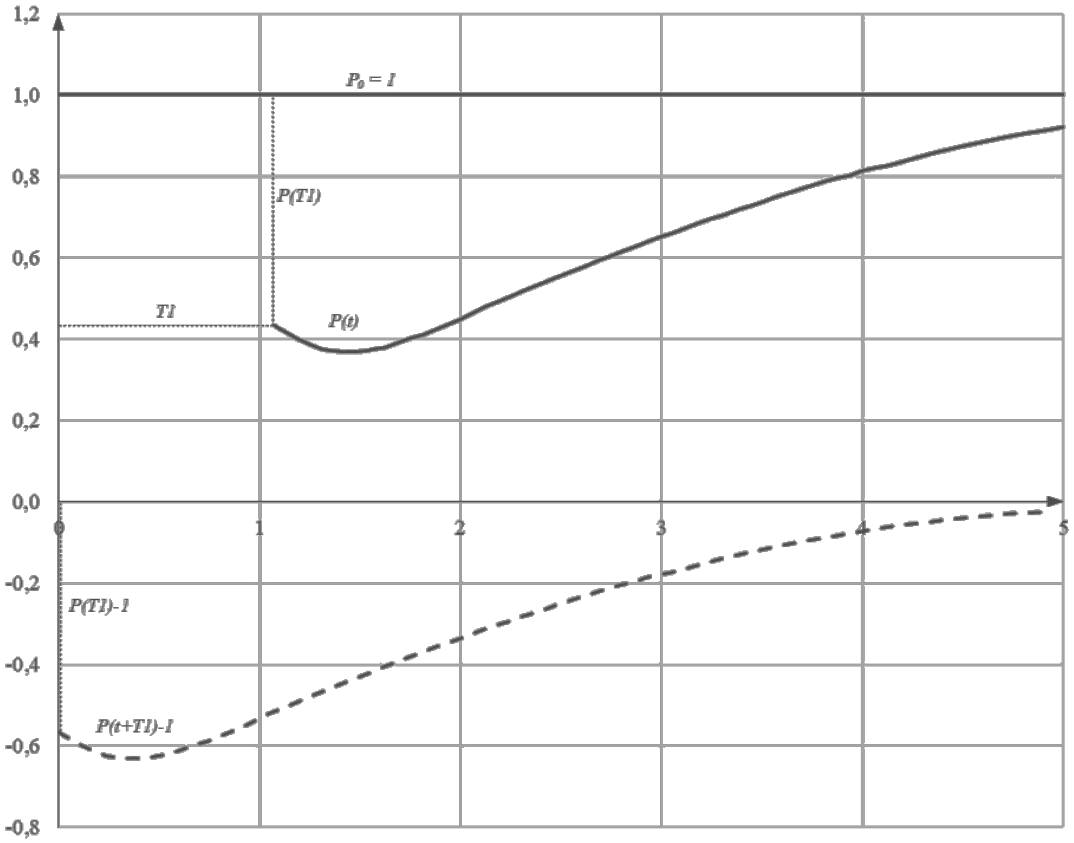


Рисунок 2 – Графические построения, поясняющие аппроксимацию третьего участка

На основании исследований было установлено, что для обеспечения точности аппроксимации, не превышающей 1%, оптимальная степень полинома для данного участка должна быть не менее девятой. Полиноминальная функция $P_2(t)$ для третьего участка имеет вид:

$$P_2(t) = k_p[a_{2.9}(t-\Delta T)^9 + a_{2.8}(t-\Delta T)^8 + a_{2.7}(t-\Delta T)^7 + a_{2.6}(t-\Delta T)^6 + a_{2.5}(t-\Delta T)^5 + \\ + a_{2.4}(t-\Delta T)^4 + a_{2.3}(t-\Delta T)^3 + a_{2.2}(t-\Delta T)^2 + a_{2.1}(t-\Delta T)^1 + a_{2.0}] + 1, \quad (3)$$

где $a_{2.9}$ – $a_{2.0}$ – коэффициенты полиноминальной функции (3); $k_p = \dfrac{P_1(T_1)-1}{P_2(T_1, \Delta T, 1)}$ – коэффициент масштабирования графика относительно оси мощности P; $\Delta T = T_1$ – значение параллельного переноса графика относительно оси времени t.

Коэффициент масштабирования k_p используется для приведения третьего участка полиноминальной функции к моменту начала запаздывания после снятия импульсного воздействия, т.е. концу второго участка $P_1(T_1)$.

Полученные в ходе аппроксимации участка $P_2(t-T_1)-1$, приведенного на рис. 2, коэффициенты полиноминальной функции $P_2(t)$, одинаковые для любой характеристики, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов полиноминальной функции, аппроксимирующей третий участок импульсных характеристик

Коэффициент функции (3)	Значение	Коэффициент функции (3)	Значение	Коэффициент функции (3)	Значение
$a_{2.0}$	–0,56142	$A_{2.1}$	–0,46137	$a_{2.2}$	0,972307
$a_{2.3}$	–0,72495	$A_{2.4}$	0,311111	$a_{2.5}$	–0,081634
$a_{2.6}$	0,013122	$A_{2.7}$	–0,00125	$a_{2.8}$	0,0000637
$a_{2.9}$	–0,0000013	-	-	-	-

Таким образом, полученные в работе функциональные зависимости позволяют аналитически определять импульсные характеристики для заданной интенсивности ($h_u = 1,2,3,4$ нр) любой продолжительности его воздействия. Некоторые из расчетных характеристик приведены на рис. 3.

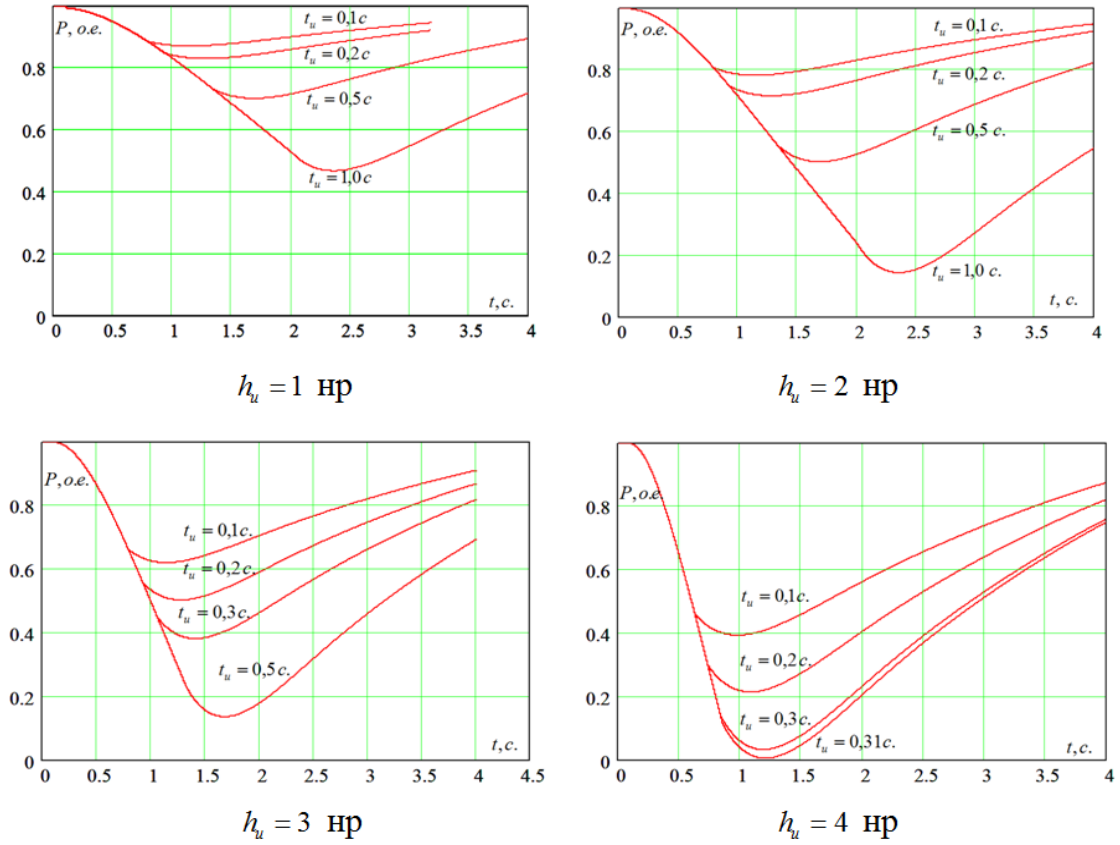


Рисунок 3 – Расчетные импульсные характеристики энергоблока

Выводы

1. Предложен способ аппроксимации экспериментальных импульсных характеристик тепловых энергоблоков на основе функционального представления полиноминальными зависимостями высокого порядка, что позволило на основе четырех экспериментальных зависимостей, определять импульсные характеристики для любой заданной интенсивности и продолжительности его воздействия.

2. Аналитическое описание импульсных характеристик при математическом моделировании электромеханических переходных процессов с учетом действия импульсной разгрузки турбины позволит более точно формировать управляющее воздействие на момент турбины для предотвращения нарушения динамической устойчивости ЭЭС при больших возмущениях.

Перечень ссылок

1. Стандарт СТО 59012820.29.240.001-2011. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. – Москва. - 2011. – 30с.

2. МУ 34-70-062-83. Методические указания по проверке и испытаниям автоматических систем регулирования и защит паровых турбин (СО 153-34.30.310, РД 34.30.310). Главное научно-техническое управление энергетики и электрификации РФ. Москва, ОРГРЭС, 1991. – 137 с.

3. Кощеев, Л.А. Автоматическое противоаварийное управление в электроэнергетических системах / Л.А. Кощеев. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 145 с.

УДК 621.313.32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТЕЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНОЙ ВЗАИМОИНДУКЦИИ МЕЖДУ ВСЕМИ КОНТУРАМИ

А.М. Ларин, И.И. Ларина
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Обосновывается возможность использования опытов затухания постоянного тока для экспериментального определения индуктивностей схемы замещения синхронных машин с учетом различной взаимоиндукции между обмотками статора, возбуждения и эквивалентным демпферным контуром с использованием интегральных и дифференциальных преобразований переходных функций. Анализируются возможные погрешности предлагаемого способа.

The possibility of using direct current decay experiments to experimentally determine the inductances of the synchronous machine equivalent circuit, taking into account various mutual inductions between the stator, field windings and an equivalent damping circuit using integral and differential transformations of transient functions is substantiated. The possible errors of the proposed method are analyzed.

Ключевые слова: *индуктивность, схема замещения, переходная функция, интегрирование, дифференцирование, погрешность.*

Keywords: *inductance, equivalent circuit, transient function, integration, differentiation, error.*

Общепринятые схемы замещения синхронных машин (СМ), основанные на равенстве взаимоиндукции между всеми контурами, достаточно точно позволяют исследовать переходные процессы в обмотке статора, но могут приводить к существенным погрешностям при расчете режимных параметров в обмотке возбуждения (ОВГ). Следовательно, при использовании таких схем задача, связанная с нахождением распределения токов между обмоткой возбуждения и демпферной системой, не может быть решена достаточно точно.

Для этого необходимо использовать более достоверные, с физической точки зрения, схемы замещения уточненной структуры, в которых учитывается различие взаимной индуктивной связи между обмотками статора, возбуждения и эквивалентного контура

демпферной системы ротора, представленные на рис. 1.

В настоящее время известны различные способы синтеза уточненной схемы замещения. В [1] получены соотношения, для приближенного определения параметров по каталожным или опытным данным.

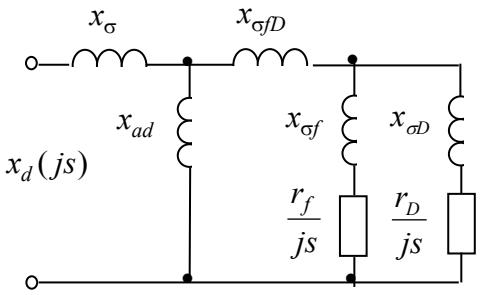


Рисунок 1 - Схема замещения СМ с учетом различной взаимоиндукции

Использование метода конечных элементов [2] не всегда приводит к получению физически реализуемой модели. Найденное в [2] индуктивное сопротивление рассеяния ОВГ имеет отрицательное значение. Способ экспериментального определения параметров двухконтурной схемы в реальных условиях работы синхронного генератора по данным опытов внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах генератора, предусмотренных стандартами на методы испытаний [3, 4], предлагается в [5]. При этом принимается, что должно быть известным сопротивление рассеяния взаимоиндукции $x_{\sigma fD}$.

Для точной оценки экстремальных значений токов в контурах СМ, возникающих при внезапных изменениях режима, например при коротких замыканиях, можно использовать схему замещения, в которой обмотки, расположенные на роторе, представлены сверхпроводящими контурами ($r_f = r_D = 0$). В этом случае достаточно знать только индуктивности. В [6] для определения индуктивных сопротивлений рассеяния предложен способ, основанный на предварительном осуществлении процедуры интегрального и дифференциального преобразования переходных функций по параметрам экспонент, аппроксимирующих кривые переходных функций в опытах затухания постоянного тока в обмотках СМ. Следует отметить, что указанный метод также регламентируется упомянутыми выше стандартами [3, 4].

Целью настоящей работы является обоснование возможности использования опытов затухания постоянного тока для определения индуктивностей схемы замещения синхронной машины в начальный момент переходного процесса с учетом взаимоиндукции между обмоткой возбуждения и эквивалентной демпферной обмоткой $x_{\sigma fD}$ отличной от взаимоиндукции между обмоткой статора и контурами на роторе x_{ad}.

При этом преобразования переходных функций предусматривается производить аппаратно с использованием специализированных интегрирующих и дифференцирующих устройств.

Определение при неподвижном роторе индуктивных сопротивлений схемы замещения установившегося режима x_d и x_{ad} синхронной машины путем аппаратного интегрирования рассматривалось в [7].

Принимая в качестве исходной уточненную схему замещения по продольной оси ротора синхронной машины [3, 4], рассмотрим вопросы формирования системы уравнений, отражающей результаты интегральных и дифференциальных преобразований переходных функций, методики проведения экспериментов, а также анализа возможных погрешностей и требования к точности используемых преобразовательных элементов измерительной схемы.

Для определения неизвестных значений индуктивностей необходимо проведение трех опытов затухания постоянного тока при неподвижном роторе: в обмотке статора при разомкнутой ОВГ, в обмотке возбуждения при короткозамкнутой и разомкнутой обмотке статора.

Основные расчетные соотношения. Полученные по данным опыта затухания постоянного тока в обмотках синхронной машины зависимости $i(t)$ могут быть использованы для определения индуктивностей, отражающих электромагнитные связи между контурами машины и характеризующих начальный момент внезапного изменения режима, а также индуктивностей, характеризующих схемы замещения установившегося режима.

Так, в соответствии с [3] при совпадении продольной оси ротора с осью намагничивания и короткозамкнутой обмотке возбуждения сверхпереходное и синхронное индуктивные сопротивления обмотки статора определяются следующими соотношениями (в системе относительных единиц):

$$x''_{d*} = \omega_б \cdot L''_d \cdot \frac{1}{Z_{sб}} = \frac{r_s}{\left(\dfrac{di(t)}{dt}\right)_{t=0}}; \qquad (1)$$

$$x_{d*} = \omega_б \cdot L_d \cdot \frac{1}{Z_{sб}} = r_s \int_0^\infty i(t)dt, \qquad (2)$$

где r_s - сопротивление постоянному току контура затухания, приведенное к одной фазе обмотки статора, о.е.; $i(t)$ - переходная функция тока статора в долях начального значения; Z_{sb} - базисное

сопротивление обмотки статора, Ом; ω_b - базисная угловая частота. 314 рад/с; $L_d^{''}, L_d$ - сверхпереходная и синхронная индуктивности, Гн.

Производная переходной функции тока и ее интегральное преобразование, входящие в (1) и (2), определяются аппаратно с использованием специализированных устройств.

При осуществлении опыта затухания постоянного тока в обмотке возбуждения при замкнутой накоротко обмотке статора аналогично соотношениям (1) и (2) имеем:

$$x_{f*}^{''} = \omega_б \cdot L_f^{''} \cdot \frac{1}{Z_{fб}} = \frac{r_f}{\left(\frac{di_f(t)}{dt}\right)_{t=0}}; \quad (3)$$

$$x_{f*} = \omega_б \cdot L_f \cdot \frac{1}{Z_{fб}} = r_f \int_0^{\infty} i_f(t)dt, \quad (4)$$

где r_f - сопротивление постоянному току контура затухания, Ом; $i_f(t)$ - переходная функция тока в обмотке возбуждения в долях начального значения); Z_{fb} - базисное сопротивление обмотки возбуждения, Ом; $L_f^{''}, L_f$ - сверхпереходная и синхронная индуктивности машины со стороны обмотки возбуждения, Гн.

Расчетные выражения для определения измеряемых индуктивностей в системе относительных единиц имеют следующий вид:

$$L_d = \frac{r_s}{Z_{sб} \cdot i_{d0} \cdot r_{sш}} \int_0^{\infty} u_{sш} dt; \quad (5)$$

$$L_{d(f)}^{'} = \frac{r_s \cdot r_{sш} \cdot i_{d0}}{Z_{sб}\left(\frac{du_{sш}}{dt}\right)_{t=0}}; \quad (6)$$

$$L_{f(s)}^{'} = \frac{r_f \cdot r_{fш} \cdot i_{f0}}{Z_{fб}\left(\frac{du_{fш}}{dt}\right)_{t=0}}; \quad (7)$$

$$L_f = \frac{r_f}{Z_{fб} \cdot i_{f0} \cdot r_{fш}} \int_0^{\infty} u_{fш} dt, \quad (8)$$

где $r_{sш}, r_{fш}$ сопротивления постоянному току токоизмерительных шунтов в обмотках статора и ротора, Ом; i_{d0}, i_{f0} - начальные значения токов в обмотках статора и возбуждения, А; $u_{sш}, u_{fш}$ - падения напряжения на шунтах обмоток статора и возбуждения, В.

Физическим условиям измерения индуктивностей $L_{d(f)}^{'}, L_d$ - при разомкнутой обмотке возбуждения и $L_{f(s)}^{'}, L_f$ - при разомкнутой

обмотке статора соответствуют схемы замещения синхронной машины, приведенные на рис. 2 и рис. 3.

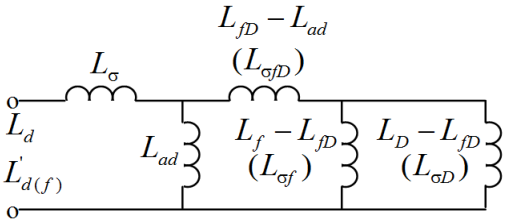


Рисунок 2 – Схема замещения СМ со стороны обмотки статора

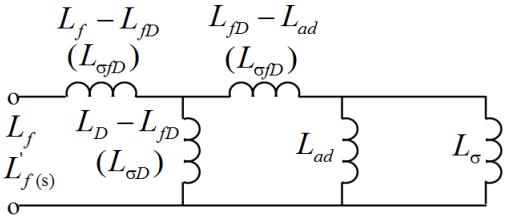


Рисунок 3 – Схема замещения СМ со стороны обмотки возбуждения

Система исходных уравнений, соответствующая опытам затухания постоянного тока и схемам замещения СМ (рис. 2, рис. 3), имеет следующий вид:

$$L'_{d(f)} = L_\sigma + \left[\frac{1}{L_{ad}} - \frac{1}{L_{fD} - L_{ad} + L_D - L_{fD}}\right]^{-1}; \quad (9)$$

$$L_d = L_\sigma + L_{ad}; \quad (10)$$

$$L'_{f(s)} = L_{\sigma f} + \left[\frac{1}{L_D - L_{fD}} + \frac{1}{L_{fD} - L_{ad} + L_{ad}}\right]^{-1}; \quad (11)$$

$$L_f = L_{\sigma f} + L_{fD} - L_{ad} + L_{ad}, \quad (12)$$

где L_{fD} - взаимоиндуктивность между обмоткой возбуждения и демпферной обмоткой; L_f, L_D - индуктивности обмоток возбуждения и демпферной обмотки; L_{ad} - взаимоиндуктивность между обмоткой статора и обмотками ротора (обмоткой возбуждения и демпферной обмоткой); $L_f - L_{fD} = L_{\sigma f}$ - индуктивность рассеяния обмотки возбуждения; $L_D - L_{fD} = L_{\sigma D}$ - индуктивность рассеяния демпферной обмотки; $L_{fD} - L_{ad} = L_{\sigma fD}$ - разность взаимных индуктивностей между контурами на роторе.

Взаимная индуктивность L_{ad} может быть определена по данным опыта интегрирования напряжения на выводах обмотки возбуждения в опыте затухания постоянного тока в обмотке статора или опыта интегрирования напряжения на выводах обмотки статора в опыте затухания постоянного тока в обмотке возбуждения в соответствии с соотношениями, полученными в [7]. Полагая значение L_{ad} известным, можно решить систему уравнений (9) – (12) относительно индуктивностей L_σ, $L_{\sigma fD}$, $L_{\sigma D}$, $L_{\sigma f}$. Тогда,

$$L_\sigma = L_d - L_{ad}; \quad (13)$$

$$L_{\sigma fD} = L_{ad} \cdot \sqrt{\frac{L_f - L'_{f(s)}}{L_d - L'_{d(f)}}} - L_{ad}\,; \tag{14}$$

$$L_{\sigma D} = \frac{L_{ad}^2}{L_d - L'_{d(f)}} - L_{ad} \cdot \sqrt{\frac{L_f - L'_{f(s)}}{L_d - L'_{d(f)}}} - L_{ad}\,; \tag{15}$$

$$L_{\sigma f} = L_f - L_{ad} \cdot \sqrt{\frac{L_f - L'_{f(s)}}{L_d - L'_{d(f)}}}\,. \tag{16}$$

Комплексный эксперимент, для определения индуктивностей уточненной схемы замещения СМ при ненасыщенном состоянии путей магнитных потоков опыты затухания постоянного тока после кратковременного предварительного намагничивания магнитопровода должен проводиться в соответствии с рекомендациями [8].

Анализ погрешностей. Оценим максимальные погрешности определения электромагнитных параметров применительно к данным турбогенератора типа ТГВ-200, имеющим следующие номинальные параметры: ($S_H = 235{,}3 MB \cdot A$; $U_H = 15{,}75\,кВ$; $\cos\varphi_H = 0{,}85$; $i_{fxx} = 720 A$).

Анализ выполним путем математического эксперимента с использованием упрощенной схемы замещения ($L_{\sigma fD} = 0$), параметры которой для исследуемого турбогенератора равны: $x_d = 1{,}941$; $x_{ad} = 1{,}766$; $x_\sigma = 0{,}175$; $x_{\sigma f} = 0{,}367$; $x_{\sigma D} = 0{,}0737$.

В дальнейшем примем, что применительно к уточненной схеме замещения $x_{\sigma f}^{УТ} = 0{,}5 x_{\sigma f}^{УП}$, а $x_{\sigma fD} = 0{,}5 x_{\sigma f}^{УП}$.

Используя соотношения (9) – (12), получим $L'_{d(f)} = 0{,}3995$; $L_d = 1{,}941$; $L'_{f(s)} = 0{,}2545$; $L_f = 2{,}133$.

Расчет максимальных погрешностей искомых параметров выполним в соответствии с [9].

$$\Delta L_l = \sum_{i=1}^{5} \left| \frac{\partial L_l}{\partial \alpha_i} \right| \cdot \Delta\alpha_i\,, \tag{17}$$

где $\alpha_i, \Delta\alpha_i$ - измеряемая в опытах величина *i*-той индуктивности и погрешность ее измерения.

Выражения для частных производных по параметрам экспериментальных измерений имеет следующий вид:

$$\frac{\partial L_\sigma}{\partial L_f} = \frac{\partial L_\sigma}{\partial L'_{f(s)}} = \frac{\partial L_\sigma}{\partial L'_{d(f)}} = 0\,; \qquad \frac{\partial L_\sigma}{\partial L_d} = 1\,; \qquad \frac{\partial L_\sigma}{\partial L_{ad}} = -1\,;$$

$$\frac{\partial L_в}{\partial L_f} = \frac{1}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)})(L_d - L'_{d(f)})}}\,; \qquad \frac{\partial L_в}{\partial L'_{f(s)}} = \frac{-L_{ad}}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)})(L_d - L'_{d(f)})}}\,;$$

$$\frac{\partial L_в}{\partial L'_{d(\mathrm{f})}} = \frac{-L_{ad}}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)})^{-1} \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^2}}; \quad \frac{\partial L_в}{\partial L_d} = \frac{-L_{ad}}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)})^{-1} \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^2}};$$

$$\frac{\partial L_в}{\partial L_{ad}} = \sqrt{(L_f - L'_{f(s)}) \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^{-1}} - 1; \quad \frac{\partial L_{\sigma f}}{\partial L_f} = 1 - \frac{\partial L_в}{\partial L_f}; \quad \frac{\partial L_{\sigma f}}{\partial L_d} = -\frac{\partial L_в}{\partial L_d};$$

$$\frac{\partial L_{\sigma f}}{\partial L_{ad}} = -1 - \frac{\partial L_в}{\partial L_{ad}}; \quad \frac{\partial L_{\sigma f}}{\partial L'_{d(f)}} = -\frac{\partial L_в}{\partial L'_{d(f)}}; \quad \frac{\partial L_{\sigma f}}{\partial L'_{f(\mathrm{s})}} = -\frac{\partial L_в}{\partial L'_{f(\mathrm{s})}};$$

$$\frac{\partial L_{\sigma D}}{\partial L_f} = \frac{-L_{ad}}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)}) \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})}}; \quad \frac{\partial L_{\sigma D}}{\partial L'_{f(s)}} = \frac{L_{ad}}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)}) \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})}};$$

$$\frac{\partial L_{\sigma D}}{\partial L_d} = \frac{-L_{ad}^2}{(L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^2} + \frac{L_{ad}}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)})^{-1} \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^2}};$$

$$\frac{\partial L_{\sigma D}}{\partial L'_{d(f)}} = \frac{L_{ad}^2}{(L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^2} - \frac{L_{ad}}{2\sqrt{(L_f - L'_{f(s)})^{-1} \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^2}};$$

$$\frac{\partial L_{\sigma D}}{\partial L_{ad}} = \frac{2L_{ad}}{(L_d - L'_{d(\mathrm{f})})} - \sqrt{(L_f - L'_{f(s)}) \cdot (L_d - L'_{d(\mathrm{f})})^{-1}}.$$

С учетом численных значений частных производных для выражений вида (17) имеем

$$\Delta L_\sigma = \Delta L_d + \Delta L_{ad}; \tag{18}$$

$$\Delta L_в = 0,5189 \cdot (\Delta L_f + \Delta L'_{f(s)}) + 0,6323 \cdot (\Delta L_d + \Delta L'_{d(\mathrm{f})}) + 0,104 \cdot (\Delta L_{ad}); \tag{19}$$

$$\Delta L_{\sigma f} = 0,4811 \cdot \Delta L_f + 0,6323 \cdot (\Delta L_d + \Delta L'_{d(\mathrm{f})}) + 1,104 \cdot \Delta L_{ad} + 0,5189 \cdot \Delta L'_{f(\mathrm{s})}; \tag{20}$$

$$\Delta L_{\sigma d} = 0,5189 \cdot (\Delta L_f + \Delta L'_{f(s)}) + 0,6801 \cdot (\Delta L_d + \Delta L'_{d(\mathrm{f})}) + 1,187 \cdot (\Delta L_{ad}). \tag{21}$$

Результаты расчета погрешностей измерения индуктивностей по соотношениям (18) – (21) для технически возможных уровней погрешностей измерения экспериментальных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Погрешности определения параметров уточненной схемы замещения турбогенератора типа ТГВ-200

Погрешность измерения экспериментальных данных, %		Погрешность в определении параметров схемы замещения, %			
$L'_{d(f)}$, $L'_{f(s)}$	L_d, L_f, L_{ad}	$L_{\sigma fD}$	L_σ	$L_{\sigma f}$	$L_{\sigma D}$
3,0	1,0	20,0	21,2	29,2	77,8
1,5	0,5	10,0	10,6	14,6	38,9
0,6	0,2	4,00	4,20	5,80	15,6
0,4	0,2	3,58	4,10	5,40	14,5

Выводы

Использование современных средств измерительной техники позволяет путем осуществления интегральных и дифференциальных преобразований

переходных функций в комплексном опыте затухания постоянного тока определять с инженерной точностью индуктивности уточненной схемы замещения синхронных машин.

Перечень ссылок

1 Dandeno P.L. Current usage suggested practices in power system stability simulation for synchronous machines / P.L. Dandeno // IEEE trans. Energy Convers.-1986.-N1.-P.77-93.

2. Escarela-Pereze R. Unique Determination of One-Damper D-Axis Circuits of Synchronous Machines Using Finite-Element Simulations / Escarela-Pereze R., Campero-Littlewood E., Niewierowicz T., Hernandez-Anaya O // IEEE Transactions on Magnetics, 2002. -Vol. 38. - №2. – P. 1245-1248.

3. ГОСТ Р МЭК 60034-4-2012 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин. Введ. 1977-28-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 77 с.

4. IEEE Std 115™-2019 - IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Including Acceptance and Performance Testing and Parameter Determination for Dynamic Analysis The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 232 p., ISBN:978-1-5044-5928-0.

5. Ларин А.М., Ткаченко А.А., Ларина И.И. Определение электромагнитных параметров обмотки возбуждения синхронного генератора из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А.М. Ларин, А.А.Ткаченко, И.И. Ларина // Электротехника и Электромеханика, 2005. - №2. – С. 32-34.

6. Ларин, А. М. Определение индуктивностей уточненной схемы замещения турбогенератора с использованием процедуры преобразования переходных функций. / А.М. Ларин, И.И. Ларина // Научные труды ДонНТУ, серия: Электротехника і энергетика, вип. 1(112). –Донецк.- 2012. – С. 152-158.

7. Рогозин, Г. Г. Определение при неподвижном роторе индуктивных сопротивлений схемы замещения установившегося режима синхронной машины / Г.Г. Рогозин, Н.С. Лапшина // Электротехника. – 1976. - №6. – С. 15-18.

8. Ларин, А. М. Обоснование необходимого уровня предварительного подмагничивания при определении электромагнитных параметров турбогенераторов методом затухания постоянного тока / А.М. Ларин, И.И. Ларина // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт: научно-практический журнал.-М.:Издательский дом «Панорама».- 2018, №7.- С.34-41.

9. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор // М.: Мир, 1985. – 272 с.

УДК 681.532.8

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ РОБОТА МАНИПУЛЯТОРА KATANA И СИМУЛЯЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ COPPELIASIM

К.Б. Петренко, Д.Н. Мирошник, А.В. Захаров
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В работе рассмотрены вопросы расчета обратной кинематики для робота манипулятора с использованием пользовательского интерфейса среды CoppeliaSim. Приведены примеры простейших расчетов для четырехзвенного робота манипулятора. Приведены схематические изображения стенда, скриншоты работы программы и пользовательского интерфейса. Представлены фрагменты пользовательского кода.

The article considers the issues of calculating the inverse kinematics for a robot manipulator using the user interface of the CoppeliaSim programming environment. Examples of the simplest calculations for a four-link robot manipulator are presented. Schematic images of the stand, screenshots of the program and user interface are given. Fragments of user code are presented.

Ключевые слова: *манипулятор, CoppeliaSim, обратная кинематика, моделирование, Python.*

Keywords*: manipulator, CoppeliaSim, inverse kinematics, modeling, Python.*

В настоящее время на производстве роботы манипуляторы выполняют большинство операций. Их функциональные возможности непрерывно увеличиваются, что ведет к усложнению их конструкций и систем управления. Это позволяет минимизировать человеческое вмешательство в процессы и улучшить рабочие условия. Промышленные устройства, оснащенные датчиками и программным обеспечением, могут собирать данные и передавать их в централизованную систему для удаленного мониторинга и управления. Такие инновации открывают новые перспективы для улучшения эффективности оборудования, сокращения расходов на материалы и энергию, а также для повышения качества и оптимизации производственных процессов. Одним из способов оптимизации

производства является внедрение в систему компьютерного зрения для автоматизированной работы. В таком случае создается соответствующий алгоритм для расчета обратной кинематики манипулятора.

Целью работы является создание алгоритма для расчета обратной кинематики и проверка алгоритма с помощью программных средств CoppeliaSim.

Объектом, который будет рассмотрен в данной статье в качестве примера является четырехзвенный робот манипулятор Katana компании Neuronics AG (Швейцария). Данный робот имеет 4 звена, которые позволяют перемещаться в трех плоскостях и производить захват предметов. Исполнительный орган – зажимы, которые дают возможность держать груз на весу.

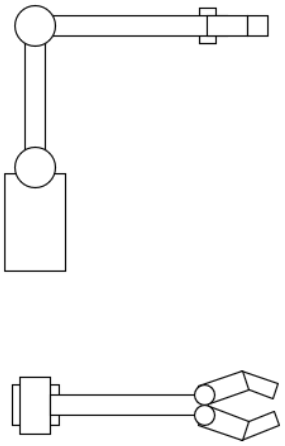


Рисунок 1 – Упрощенная схема установки (вид спереди, вид сверху)

В системах с компьютерным зрением задаются системой координат. Движения манипулятора будут отслеживаться в двух плоскостях. Для удобства расположим центр основания установки на пересечении осей Ox и Oy.

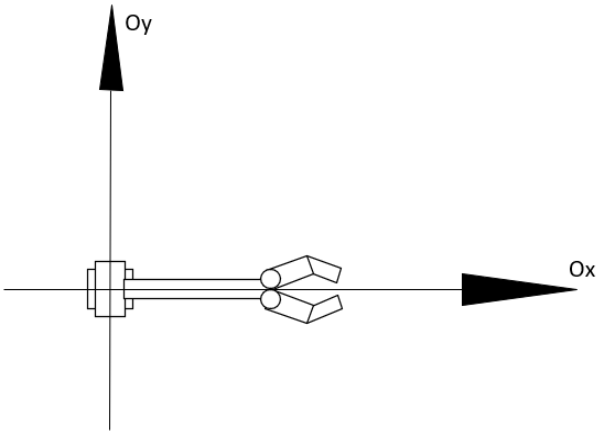


Рисунок 2 – Вид сверху относительно плоскости XY

Подобное расположение робота упростит расчеты в дальнейшем. Пересечение с Oz других осей также расположим в основании робота.

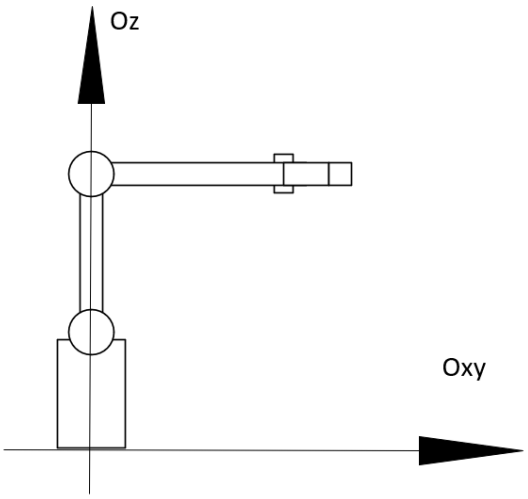


Рисунок 3 – Вид в вертикальной плоскости

В случае, когда необходимо вычислить угол поворота основания, мы задаемся «x» и «y» координатами объекта. Эти координаты будут являться проекциями линии, соединяющей объект и начало координат, на оси горизонтальной плоскости. Графическая часть выглядит так, как показано на рисунке 4. Зададимся точками на плоскостях. В дальнейшем точка C1 будет обозначать положение объекта в пространстве, а т. O – точку начала отсчета.

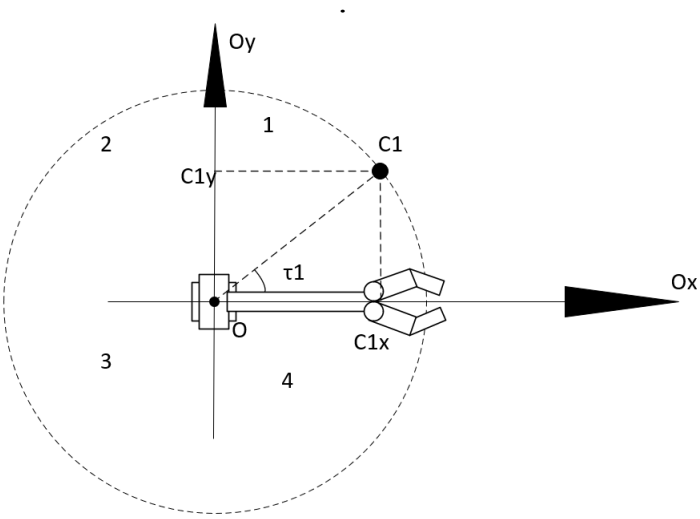


Рисунок 4 – Схема для вычисления угла поворота

Предположим, что манипулятор может поворачиваться на 270º против часовой стрелки. Если разделить схему на четыре координатные плоскости, то в четвертой окажется слепая зона. Расчет угла будет проводиться по следующей формуле:

$$\tau_1 = atan\left(\frac{C1y}{C1x}\right) \quad (1)$$

Где C1y – координата объекта по Oy, C1x – координата объекта по Ox, τ_1 – искомый угол поворота.

Для различных случаев по формуле 1 получим:

$$\begin{cases} C1_y \geq 0 \\ C1_x > 0 \\ \tau_1 = \mathrm{atan}\left(\frac{C_y}{C_x}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} C1_y > 0 \\ C1_x \leq 0 \\ \tau_1 = \mathrm{atan}\left(\frac{C_x}{C_y}\right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} C1_y \leq 0 \\ C1_x < 0 \\ \tau_1 = \mathrm{atan}\left(\frac{C_y}{C_x}\right) \end{cases} \quad (4)$$

Для слепой зоны, где $C_y < 0$ и $C_x > 0$ расчеты обратной кинематики проводиться не будут. Это поможет исключить ошибки в будущей работе программы и не повредить робота.

Для полного решения задачи необходимо вычислить углы поворота для рабочих суставов. Для этого нужно задаться точками на плоскости. Пусть середина первого сустава – т. A, второго – т. B, желаемое положение объекта в клешнях – точка C, точка начала отсчета – т. O. реальное положение предмета – т. C1.

Нам заранее известны отрезки OA, AB, а также BC, так как все они представляют собой звенья робота манипулятора. После отработки задания точка C должна совпасть с точкой C1. Имеем два треугольника: ΔABC (ΔABC1) и ΔAOC1. Чтобы решить задачу, нужно вычислить длину отрезков AC1 и OC1, а для последующих расчетов должны быть известны координаты объекта в пространстве.

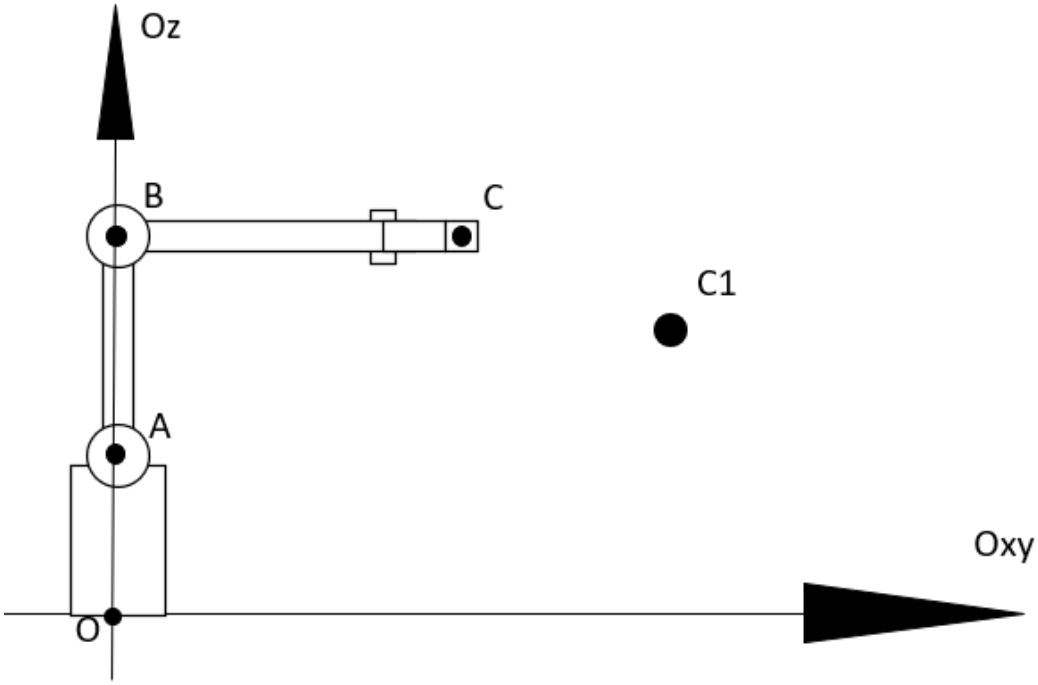


Рисунок 5 – Схема стенда перед отработкой задания

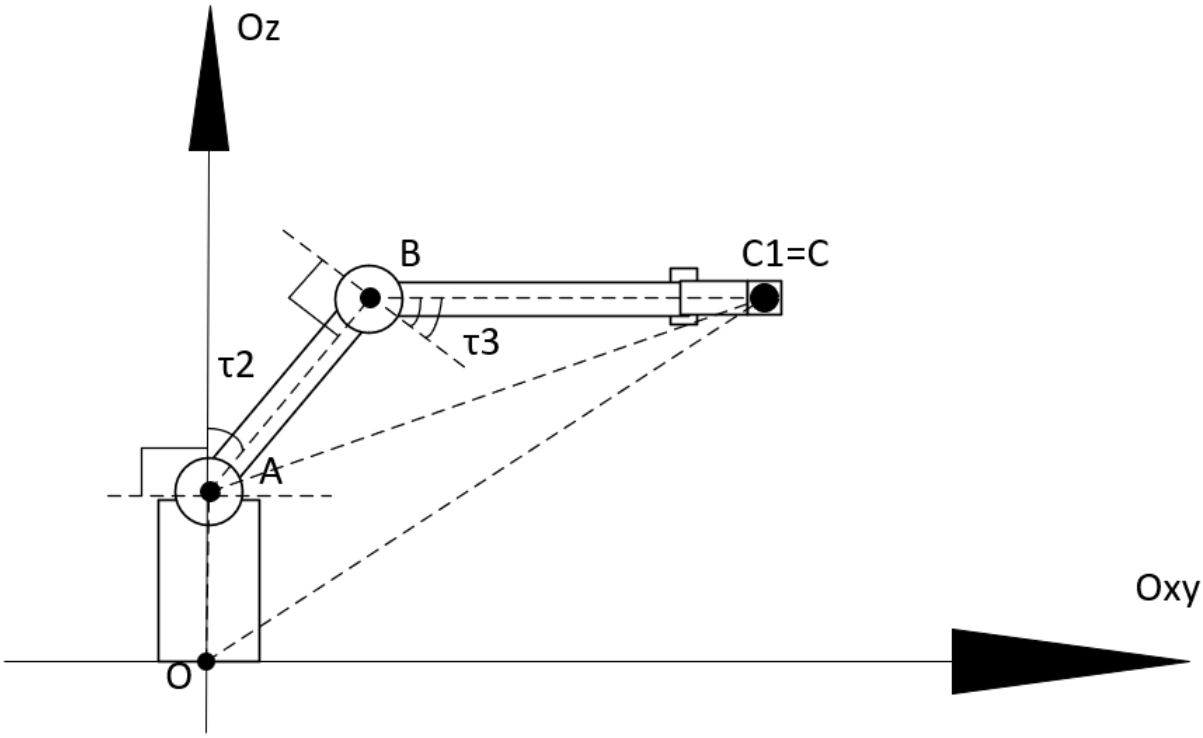


Рисунок 6 – Схема стенда после отработки задания (будет использована для расчета углов суставов)

Неизвестные отрезки вычисляем по следующим формулам:

$$xy = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}\,, \tag{5}$$

$$l = \sqrt{(z_1 - z_2)^2 + (xy)^2}\,. \tag{6}$$

В формулах обозначены:

- x_1 и x_2 – координаты первой и второй точки по оси Ox
- y_1 и y_2 – координаты первой и второй точки по оси Oy
- z_1 и z_2 – координаты первой и второй точки по оси Oz
- xy – длина проекции на плоскость XY
- l – длина отрезка

Проведем расчет по формулам 5, 6:

$$xy_{\mathrm{AC1}} = \sqrt{(\mathrm{x_A} - \mathrm{x_{C1}})^2 + (\mathrm{y_A} - \mathrm{y_{C1}})^2}\,, \tag{7}$$

$$l_{\mathrm{AC1}} = \sqrt{(z_{\mathrm{A}} - z_{\mathrm{C1}})^2 + (xy_{\mathrm{AC1}})^2}\,, \tag{8}$$

$$xy_{\mathrm{OC1}} = \sqrt{(\mathrm{x_O} - \mathrm{x_{C1}})^2 + (\mathrm{y_O} - \mathrm{y_{C1}})^2}, \tag{9}$$

$$l_{\mathrm{OC1}} = \sqrt{(z_{\mathrm{O}} - z_{\mathrm{C1}})^2 + (xy_{\mathrm{OC1}})^2}\,. \tag{10}$$

Зная все стороны треугольников Δ ABC1 и Δ AOC1 можем рассчитать их углы с помощью теоремы косинусов.

Для расчета угла первого сустава понадобится найти углы $\angle$OAC1 и $\angle$BAC1, так как:

$$\pi = \tau_2 + \angle\mathrm{OAC1} + \angle\mathrm{BAC1}, \tag{11}$$

Где τ_2 – искомый угол наклона.

По теореме косинусов:

$$\cos\alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}, \tag{12}$$

Следовательно:

$$\alpha = \mathrm{acos}\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}\right). \tag{13}$$

Где α – искомый угол треугольника, *a,b,c* – его стороны, и сторона *a является* противолежащей.

Исходя из формулы 13, расчет будет выглядеть следующим образом:

$$\angle \mathrm{OAC1} = \mathrm{acos}\left(\frac{\mathrm{OA}^2 + \mathrm{AC1}^2 - \mathrm{OC1}^2}{2 * \mathrm{OA} * \mathrm{AC1}}\right), \tag{14}$$

$$\angle \mathrm{BAC1} = \mathrm{acos}\left(\frac{\mathrm{BA}^2 + \mathrm{AC1}^2 - \mathrm{BC1}^2}{2 * \mathrm{BA} * \mathrm{AC1}}\right). \tag{15}$$

Тогда искомый угол наклона будет равен:

$$\tau_2 = \pi - \angle \mathrm{OAC1} - \angle \mathrm{BAC1}. \tag{16}$$

Для расчета угла сгиба третьего сустава, его обозначим τ_3, понадобится знать только угол $\angle ABC1$. Мы знаем, что в начальном положении наш локоть находится под углом 90 градусов к плечу. Учтём, что для нашей установки сгибание осуществляется на положительный угол, а разгибание на отрицательный. Тогда:

$$\tau_3 = \frac{\pi}{2} - \angle AB\mathrm{C1}, \tag{17}$$

Где по формуле 13:

$$\angle AB\mathrm{C1} = \mathrm{acos}\left(\frac{\mathrm{A}B^2 + BC1^2 - A\mathrm{C1}^2}{2 * AB * BC1}\right). \tag{18}$$

В случаях, если $\Delta\mathrm{ABC1}$ тупоугольный, как на рисунке 6, будем иметь отрицательный τ_3.

При написании алгоритма необходимо проводить расчеты по формуле 13 только для тех случаев, в которых выполняется условие существования треугольника $\Delta AB\mathrm{C1}$ и два дополнительных неравенства.

$$\begin{cases} AC1 \leq AB + BC \\ BC < AC1 + AB \\ AC1 \neq 0 \end{cases}. \tag{19}$$

Теперь необходимо составить программный алгоритм и

проверить его с помощью симуляции в CoppeliaSim[1].

CoppeliaSim, ранее известный как V-REP, – это симулятор роботов, используемый в промышленности, образовании и исследованиях[1]. CoppeliaSim имеет достаточно гибкий интерфейс программирования, что позволяет смоделировать в данной программе множество реальных задач. Данный программный пакет крайне необходим в случаях, когда требуется решить какие-либо проблемы автоматизации в робототехнике. Для моделирования обратной кинематики создадим сцену, в которой разместим заранее подготовленную модель нашего робота.

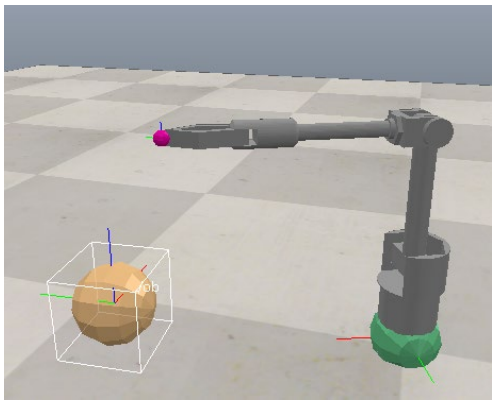


Рисунок 7 – Сцена и модель стенда в CoppeliaSim

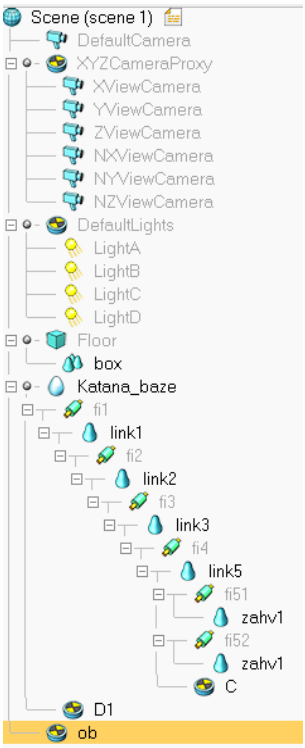


Рисунок 8 – Иерархия объектов сцены

Главное внимание уделим следующим элементам:

- Katana_baze – общий фрейм модели установки;
- fi1 – привод отвечающий за угол поворота основания;
- fi2 – привод отвечающий за наклон плеча;
- fi3 – привод отвечающий за сгиб локтя;
- fi4 – привод отвечающий за вращение клешни;
- fi51, fi52 – приводы сжимающие и разжимающие кисть;
- link1 – неподвижное основание;
- link2 – плечо;
- link3 – соединение локтя с плечом;
- link4 – локоть;
- link5 – кисть;
- zahv1 – клешня.

В данном случае пурпурно-розовый шар обозначает желаемое положение объекта в захвате, в иерархии он указан, как манекен «C». Зеленый шар в основании манипулятора, обозначает точку начала отсчета, в дереве он указан, как «D1». Шар телесного цвета обозначает сам объект, а в общей иерархии носит имя «ob».

CoppeliaSim поддерживает пользовательский интерфейс Python, на этом языке будет написана программа. Работа со средой осуществляется, через создаваемый «клиент». Подключение к клиенту возможно через «сокет», как к отдельному серверу[1].Для корректной работы необходимо переместить в директорию скрипт-файла с кодом следующие файлы:

- *sim*;
- *simConst*;
- *simpleTest*.

Они находятся по пути:
~\CoppeliaRobotics\CoppeliaSimEdu\programming\remoteApiBindings\python\python
Также требуется файл *remoteApi*, который находится по пути:
~\CoppeliaRobotics\CoppeliaSimEdu\programming\remoteApiBindings\lib\lib\Windows
Блок-схема будущей программы представлена ниже.

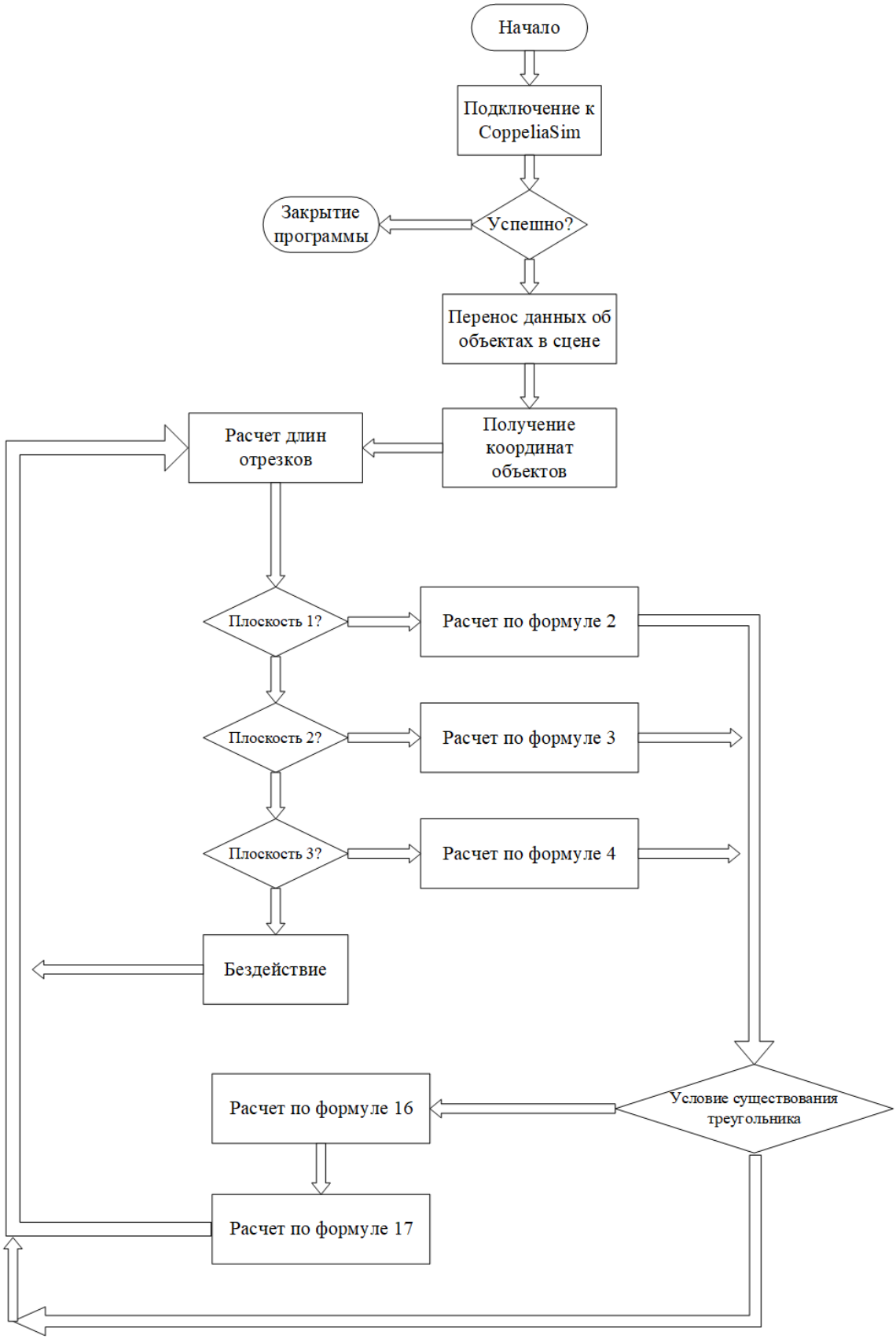


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма

Для подключения к серверу CoppeliaSim в коде присутствуют строки[1]:

#Connecting to server

vrep.simxFinish(-1) #закрывает все текущие соединения

clientID = vrep.simxStart('127.0.0.1', 19999, True, True, 5000, 5)

#Связь с sim сервером на вашем компьютере

Внести объекты в реестр можно с помощью следующей команды[2]:

errorCode, tip = vrep.simxGetObjectHandle(clientID,
'ob',vrep.simx_opmode_oneshot_wait)

Также возможно получить координаты объектов в системе следующим образом[2]:

errorCode, C1 = vrep.simxGetObjectPosition(clientID, tip,
O, vrep.simx_opmode_streaming)

Результатом функции будет массив из трех элементов, каждый из которых это координаты в пространстве (x,y,z).

С помощью кода, написанного на Python мы можем получать данные из симуляции, а также есть возможность задавать сигналы управления. Для удобства работы с симуляцией разработано окно интерфейса управления. Для оформления окна был использован модуль TKinter[3].

window = Tk()

window.title("ИНТЕРФЕЙС УПРАВЛЕНИЯ")

window.geometry('480x630')

window.config(bg='#31403C')

window.protocol("WM_DELETE_WINDOW", finish)

Для изучения возможностей взаимодействия был разработан алгоритм работы не только в режиме расчета обратной кинематики – «AUTO», но и в ручном – «HAND». Ползунки отвечают за задание на поворот сервоприводов, при этом все они ограничены так же, как в реальной установке. Разработанная программа послужит ориентиром для написания программы управления реальным проектом робота-манипулятора.

В ручном режиме установка выполняет команды пользователя вне зависимости от положения объекта, ограничиваясь лишь физически. Физические ограничения установлены в настройках самой модели робота. При желании можно задать их программно, ограничив возможности интерфейса управления.

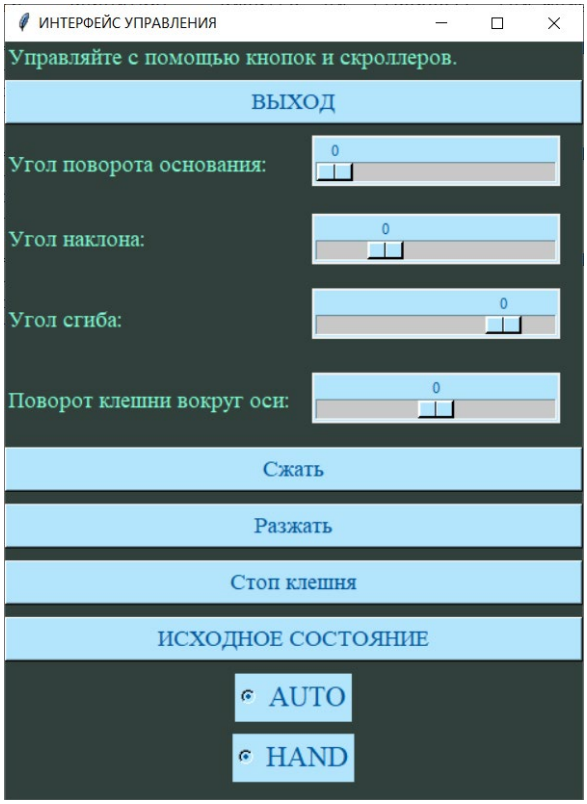


Рисунок 10 – Интерфейс управления

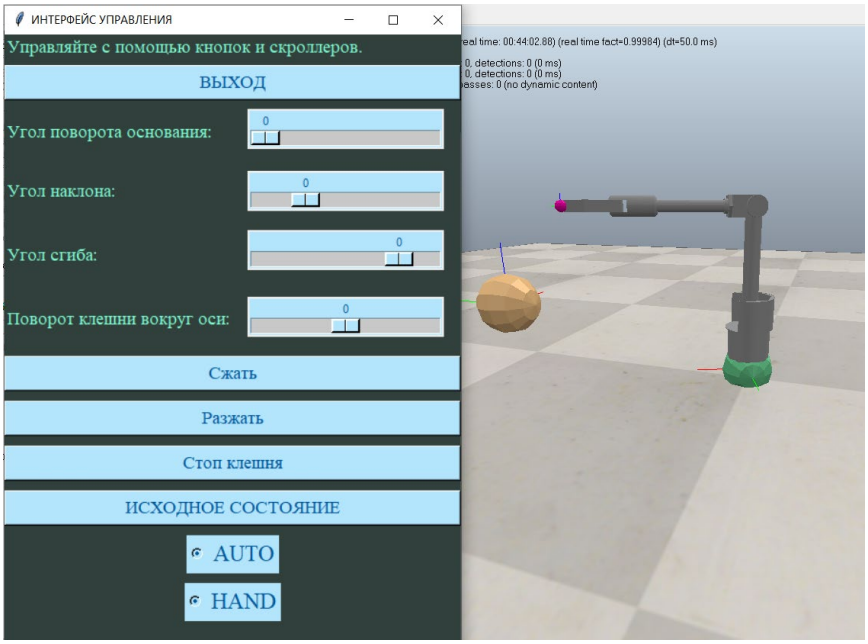


Рисунок 11 – Система в исходном состоянии

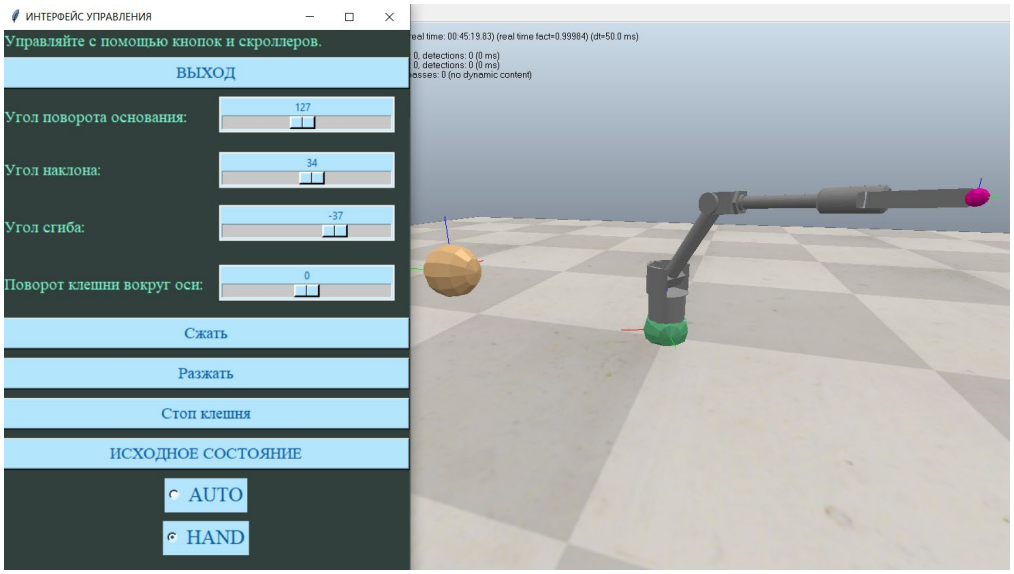


Рисунок 12 – Состояние системы, измененное вручную

В автоматическом режиме робот самостоятельно примет требуемое положение, необходимое для захвата объекта.

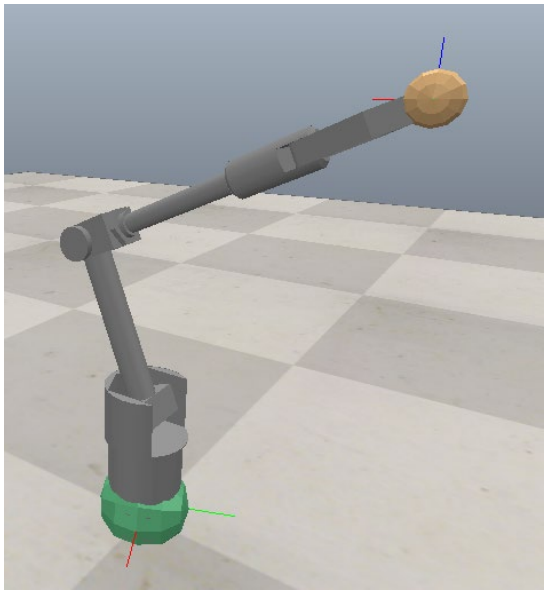


Рисунок 13 – Автоматическая отработка задания обратной кинематики

Как можно увидеть на рисунке 13, желаемое положение объекта в захвате полностью совпало с его фактическим в системе координат.

Выводы

В ходе работы были описаны преимущества использования программного пакета CoppeliaSim, а также метод работы с ним через отдельный Python клиент. Приведены схемы установки в координатах, изображения созданного интерфейса и работы программы в реальном времени. Описан метод решения обратной кинематики для четырехзвенного робота Katana с его дальнейшей проверкой в среде моделирования.

Перечень ссылок

1. Методические рекомендации по использованию CoppeliaSim, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://научим.рф/practices/view/22.

2. Руководство по использованию команд в Python API с CoppeliaSim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.coppeliarobotics-.com/helpFiles/en/remoteApiFunctionsPython.htm.

3. Обучение Python GUI (уроки по Tkinter) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pythonru.com/uroki/obuchenie-python-gui-uroki-po-tkinter.

УДК 621.311

АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ ПОДХОДОВ РАСЧЕТА НАГРУЗОЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

С.А. Гришанов, В.Ю. Лисовский
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В статье выполнен анализ различных подходов к расчету нагрузочных потерь электроэнергии в сети. Реализованы различные подходы с использованием суточных графиков нагрузки. Выполнено моделирование установившихся режимов электрической сети за сутки. Рассчитаны потери электроэнергии с использованием суточных графиков нагрузки и с использованием усредненных показателей. Проанализированы полученные результаты.

The article analyzes various approaches to calculating load losses of electricity in the network. Various approaches have been implemented using daily load schedules. Modeling electrical network of steady-state conditions in per day was performed. Electricity losses were calculated using daily load schedules and using average indicators. Analyzed the results.

***Ключевые слова**: расчет нагрузочных потерь электроэнергии, суточные графики нагрузки, усредненные показатели, моделирование, установившийся режим.*

***Keywords**: calculation of load power losses, average indicators, daily load schedules, modeling, steady-state modes.*

Постановка проблемы. В настоящее время растет внимание к проблеме энергосбережения и повышения энергоэффективности. Анализ зарубежного опыта показывает [1], что рост потерь электроэнергии в электрических сетях – это объективный процесс для стран с кризисной экономикой и реформируемой энергетикой, признак имеющихся разрывов между платежеспособностью потребителей и тарифами на электроэнергию [2]. Также к росту потерь можно отнести еще такие факторы как, показатель недостаточности инвестиций в сетевую инфраструктуру и систему учета электроэнергии, отсутствие полномасштабных автоматизированных информационных систем по сбору и передаче данных о полезном отпуске электроэнергии [2], к примеру, АСКУЭ, и

др. факторы. При возрастающей напряжённости топливно-энергетического баланса снижение потерь электроэнергии становится одним из главных аспектов энергосберегающей политики. Важнейшим количественным показателем технического состояния электрических сетей и уровня их эксплуатации является величина потерь электроэнергии и тенденции её изменения. Успешное решение задачи поддержания их на оптимальном уровне – залог повышения энергоэффективности электрических сетей. Поэтому проблема исследования и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях не только не утратила актуальности, но и стала одной из важных задач обеспечения финансовой стабильности сетевых распределительных компаний [3].

Стоимость потерь – это часть затрат на передачу и распределение электроэнергии по электрическим сетям. Чем больше потери, тем выше эти затраты и соответственно тарифы на электроэнергию для конечных потребителей [2]. Известно, что часть потерь является технологическим расходом электроэнергии, необходимым для преодоления сопротивления сети и доставки потребителям выработанной на электростанциях электроэнергии [4]. Этот технологически необходимый расход электроэнергии должен оплачиваться потребителем. Он, по существу, и является нормативом потерь.

Общая величина потерь зависит от многих факторов, определяемых на стадии проектирования сети и во время эксплуатации [5]. Считается, что объем потерянной электрической энергии при ее передаче должен быть на порядок ниже передаваемой энергии. В этом случае передача электрической энергии целесообразна.

Как известно по структуре электрические сети в нашем регионе подразделяются на два электросетевых комплекса: магистральные электрические сети и распределительные сети. Магистральные электрические сети включают в себя основные системообразующие сети и межсистемные линии электропередачи 220 кВ и выше. Некоторая часть ЛЭП 220 кВ и электрические сети напряжением 110 кВ и ниже относятся к распределительному комплексу и включаются в распределительные сети. Около 78% всех потерь электрической энергии в сетях нашего региона приходится на распределительные сети, примерно 20% приходится потерь на магистральные сети.

В настоящее время для упрощения расчета в первую очередь нагрузочных потерь в электрических сетях используются различные методы, которые основываются на реальных графиках нагрузки. Зна-

чения в данных графиках фиксируется с определенным интервалом, а сами графики имеют разнообразный вид: от резко переменных до практически неизменных. На это влияет характер потребителя, если сеть имеет преимущественно потребителей тяжелой промышленности, то для нее характерны легко прогнозируемые пики и провалы на графике, в тоже время для бытовых потребителей характерны резко переменные пики нагрузки в сетях. Так же часто при расчете потерь пренебрегают летним сезоном, учитывая его как процент от зимнего сезона, что увеличивает погрешность в расчете потерь электроэнергии. Использование таких допущений позволяет сэкономить время вычислений и мощности аппаратного расчета.

Целью данной работы является оценка корректности предложенных методов расчета потерь электроэнергии по отношению к качеству получаемого результата.

Основной материал исследования. В качестве исследуемого объекта была выбрана сеть с двумя источниками питания, образованная четырьмя участками и тремя подстанциями (рис. 1). Подстанции имеют потребителей с различным характером нагрузки, что даёт возможность использование в расчетах различных графиков.

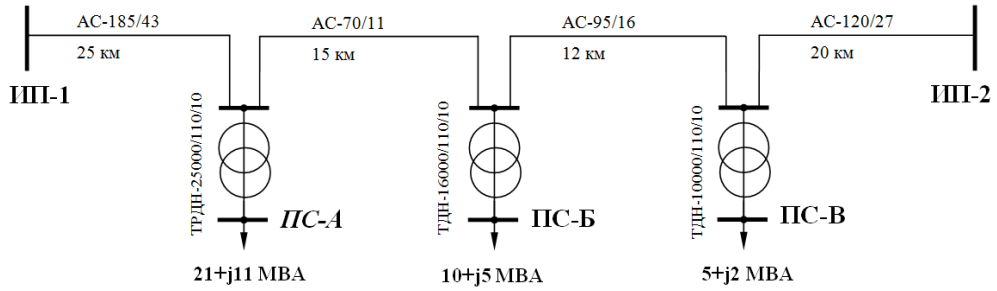


Рисунок 1 – Схема исследуемой электрической сети

Исследования проводились для двух случаев. Первый случай характеризуется значительным изменением нагрузки в течении суток, а второй наоборот со слабым изменением нагрузки в течении суток. Графики потребителей в течении суток для первого случая приведены в табл. 1, а для второго в табл. 2. Также на рис.2-3 показан характер изменения суммарной нагрузки в течение суток для этих двух вариантов исследования.

Для данных графиков потребления активной и реактивной электроэнергии найдем важнейшие характеристики – средние значения нагрузок, суточные и годовые, а также коэффициент неравномерности графика, коэффициент заполнения графика нагрузки и коэффициент участия в максимуме. Результаты расчета сведем в табл. 3.

Таблица 1 – Суточные графики потребителей для первого случая

Время, час	узел А		узел Б		узел В	
	P, МВт	Q, МВАр	P, МВт	Q, МВАр	P, МВт	Q, МВАр
1	7,98	2,2	3	1,25	3,3	1
2	7,56	1,76	2,7	1,25	3,5	1
3	7,56	1,76	2,7	1,25	3,3	1
4	7,56	1,32	2,7	1,25	3,2	0,88
5	7,14	1,1	9	1,5	3,3	0,96
6	7,56	1,1	9	2	3,5	1
7	10,5	1,76	10	2,75	3,3	0,88
8	18,48	7,92	9,7	3	4	1,44
9	21	10,34	7	3,5	4,6	1,92
10	21	9,9	4	4,5	5	2
11	19,74	9,46	4	5	4,9	1,92
12	18,9	8,8	6	4	4,8	1,8
13	19,74	11	8	3	4,7	1,92
14	19,74	10,56	9,5	3,5	4,8	2
15	18,9	8,8	9	3,75	4,6	1,92
16	19,11	10,12	5	3,75	4,3	1,8
17	19,74	10,12	4	3,5	4,4	1,76
18	19,74	9,46	4	3	4,5	1,68
19	18,48	8,36	4	2,75	4,3	1,6
20	19,74	8,8	4,6	2,5	4,2	1,44
21	18,9	9,46	4,6	2,25	4,3	1,52
22	15,75	8,36	3,4	2	4,2	1,44
23	9,24	4,4	3	1,75	3,5	1,2
24	8,82	2,2	3	1,5	3,4	1

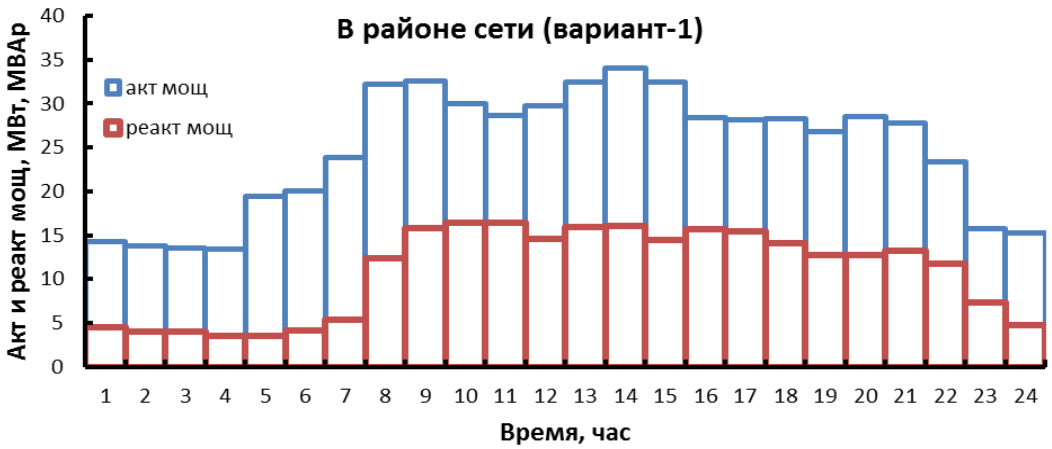


Рисунок 2 – Суммарный суточный график активной и реактивной нагрузки района сети для 1-вар. исследования

Таблица 2 – Суточные графики потребителей для второго случая

Время, час	узел А		узел Б		узел В	
	P, МВт	Q, МВАр	P, МВт	Q, МВАр	P, МВт	Q, МВАр
1	18,9	7,92	8,2	4,65	4	1,66
2	18,06	7,48	8,2	4,65	4	1,66
3	20,16	7,15	8,2	4,65	4	1,66
4	19,53	3,96	8,2	4,65	4	1,66
5	18,9	7,04	8,2	4,65	4	1,66
6	19,53	10,56	8,2	4,65	4,15	1,72
7	18,06	7,7	10	4,65	4,15	1,72
8	19,74	7,26	10	5	4,15	1,72
9	20,58	6,6	10	5	4,15	1,72
10	19,74	3,63	10	5	4,65	1,92
11	19,74	2,97	10	5	4,65	1,92
12	17,22	5,06	9	5	4,65	1,92
13	18,06	9,9	9	5	4,65	1,92
14	18,9	7,7	9	5	4,65	1,92
15	18,06	8,8	9	5	4,65	1,92
16	18,9	9,9	9,6	5	4,65	1,92
17	19,95	11	9,6	5	4,15	1,8
18	19,53	8,8	9,6	5	4,15	1,8
19	21	9,02	9,3	5	5	2
20	19,74	2,86	9,3	4,5	5	2
21	19,95	1,21	8,2	4,5	5	2
22	21	1,87	8,2	4,5	4,5	1,86
23	18,9	3,3	8,2	4,5	4,5	1,86
24	15,54	3,3	8,2	4,5	4	1,72

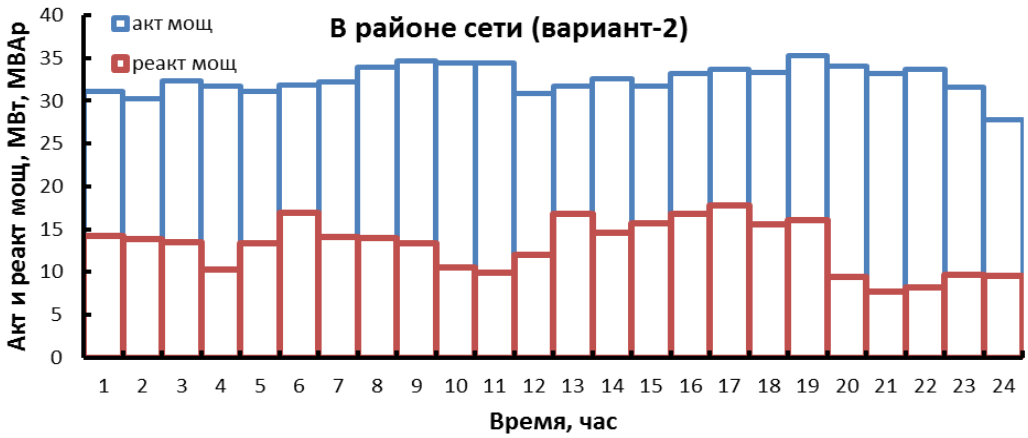


Рисунок 3 – Суммарный суточный график активной и реактивной нагрузки района сети для 2-вар. исследования

Таблица 3 – Характеристики графиков нагрузок

Показатель	Вариант 1		Вариант 2	
	по P	по Q	по P	по Q
Максимальные нагрузки (по графику)	34,04	16,06	35,3	16,02
Минимальные нагрузки (по графику)	13,46	3,45	31,1	13,35
среднесуточное зимнее значение	24,7	10,78	32,52	13,07
среднесуточное летнее значение	14,82	6,466	19,51	7,843
среднегодовое значение	20,58	8,982	27,11	10,89
Коэффициент неравномерности графика	-	-	-	-
- в суточном разрезе	0,395	0,215	0,881	0,833
Коэффициент заполнения графика нагрузки	0,605	-	0,768	-
Коэффициент участия в максимуме	0,946	0,892	0,981	0,89
Число часов использования макс. нагрузки $T_М$	5297	4899	6726	5957
Число часов максимальных потерь τ	3743	-	5559	-
Потребляемая электроэнергия $W_{год}$, МВтч	180293		237440	

Из анализа табл. 3 видно, что случай 1 характеризуется значительно более неравномерным графиком, чем случай 2, но в то же время коэффициент участия в максимуме для обоих случаев по активной мощности больше 0,9, а по реактивной вообще равны. Коэффициент заполнения графика для обоих случаев более 50%, хотя для второго случая этот показатель больше, как и предполагалось изначально. Поэтому вероятно использование усредненных показателей в расчетах потерь электроэнергии должны дать для обоих случаев предельно допустимые погрешности расчета.

Для расчетов потерь электроэнергии в сети было применено программное обеспечение PowerFactory и Excel. Итогом исследования стал сопоставительный анализ расчетов, выполненный по различным методикам учета характера нагрузки (графика нагрузки).

На рис. 4 приведены результаты расчета суммарных потерь мощности за сутки для двух вариантов исследования. Максимальные нагрузки для первого варианта составляют 34,04+j16,06 МВА в 14 час, а для второго варианта 35,3+j16,02 МВА в 19 час. Для этих двух случаев возьмем потери активной мощности в сети (см. табл. 4).

Таблица 4 – Потери для максимальных нагрузок

Показатель	ΔP, МВт	
	Вариант 1	Вариант 2
Суммарные потери	0,52	0,68
- нагрузочные (в линиях и меди трансформаторов)	0,42	0,58
- не нагрузочные (в стали трансформаторов)	0,1	0,1

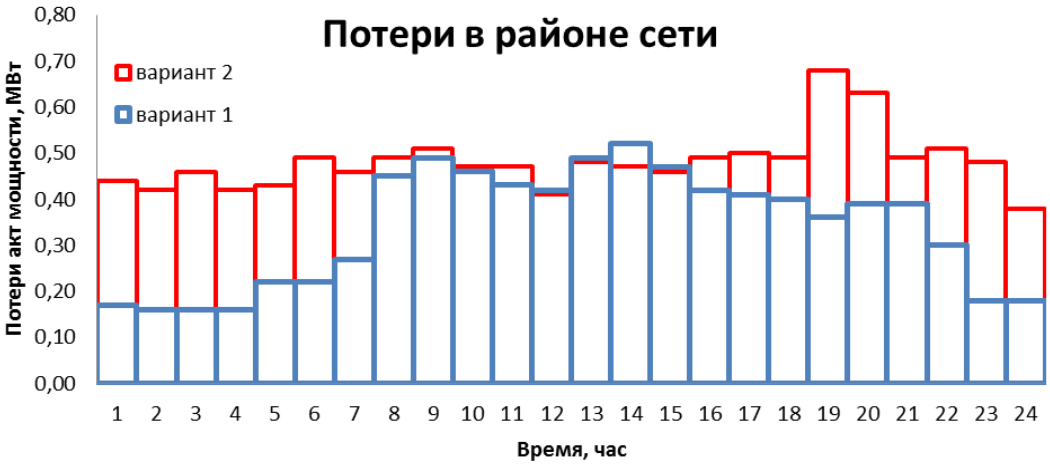


Рисунок 4 – Суммарный суточные потери активной мощности района сети для обоих вариантов исследования

Используя суточный график нагрузки и полученные по этим нагрузкам суточные потери активной мощности в сети определим годовые потери электроэнергии по двух методикам, а именно по графику и по усредненным показателям данного графика и режиму максимальных нагрузок (использование числа часов максимальных потерь τ). Результаты расчета сведем в табл. 5.

Таблица 5 – Расчет потерь электроэнергии

Показатель	ΔWгод, МВтч	
	Вариант 1	Вариант 2
Использование суточного графика (ΔWсут)	2470,1	3507,4
Использование макс. нагрузок и τ	2441,97	2926,96
Погрешность, %	1,14	16,55

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для первого варианта, использование усредненных показателей допустимо для расчета потерь электроэнергии, а для второго варианта нет, т.к. погрешность более 5%, при сопоставлении с расчетом по суточному графику нагрузки. Эти результаты не совсем соответствуют изначальной постановке вопроса, т.к. предполагалось, что для более равномерного графика погрешность расчета будет меньше, а таковым фактически является вариант 2. Поэтому проведем анализ косвенных характеристик данных графиков нагрузок. Получим для каждого потребителя в варианте исследования $tg\phi_i = \frac{Q_i}{P_i}$. Эти расчеты показаны на рис. 5-7.

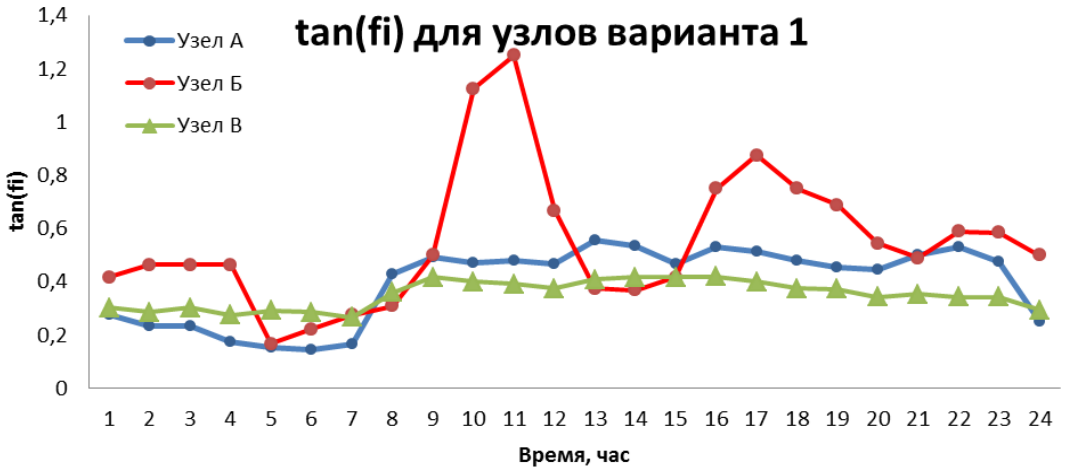


Рисунок 5 – Характер изменения $tg\phi_i$ для узлов 1-вар. исследования

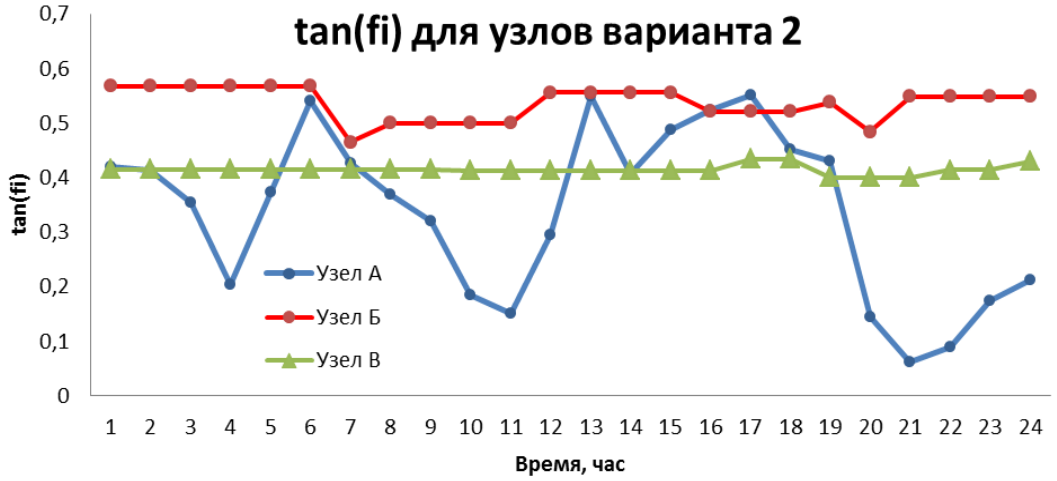


Рисунок 6 – Характер изменения $tg\phi_i$ для узлов 2-вар. исследования

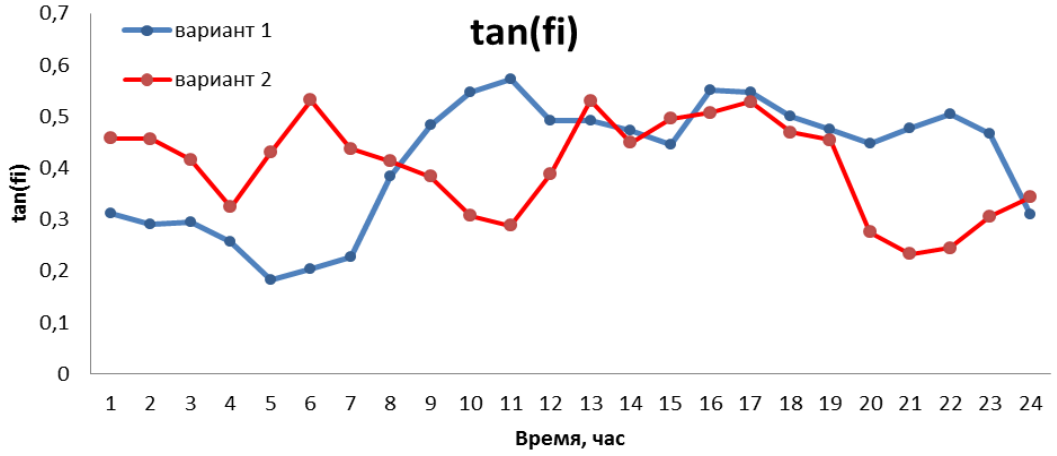


Рисунок 7 – Характер изменения $tg\phi_i$ для района сети

Полученные результаты позволяют оценить как тот или иной узел влияет на потери в сети. Наибольшая мощность в обоих вариантах исследования для узла «А», но график узла «А» в большей степени по $tg\phi_i$ влияет на потери в сети для второго варианта, т.к. $tg\phi_i$ для др. узлов почти постоянны. В первом варианте исследования $tg\phi_i$ переменен для всех трех узлов нагрузки, но наиболее вариативный для узла «Б», а это не максимальная нагрузка в системе. К тому же из анализа потерь мощности и значений $tg\phi_i$ в течении суток видно, что для второго случая имеется ярко выраженный пик в 19 час (максимальная нагрузка), а в др. часы суток потери почти постоянны, T_M для графика нагрузок меньше 8000 ч. А т.к. расчет потерь по усредненным показателям ведется только для режима максимальных нагрузок, мы имеем такое отличие в расчетах потерь электроэнергии за год. В первом варианте исследования $tg\phi_i$ для максимальных нагрузок у трех узлов почти одинаков. Время T_M для графика нагрузок чуть более 5000 ч., а $tg\phi_i$ для наиболее загруженного узла нагрузки меняется слабо по сравнению с др. узлами, это и может быть причиной малой погрешности в расчетах потерь электроэнергии.

Выводы

В результате сравнения полученные данные наглядно демонстрируют рациональность использования допущений для определенного типа потребителей, где график нагрузки учитывает производственную загруженность. Это позволит улучшить использование методов расчета потерь электроэнергии, как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации электрических сетей.

Перечень ссылок

1. Бохмат И.С. Снижение коммерческих потерь электроэнергии в электроэнергетических системах / И.С. Бохмат, В.Э. Воротницкий, Е.П. Татаринов // Электрические станции. –1998. – N 9. – С.53-59.

2. Воротницкий В.Э. Норматив потерь электроэнергии в электрических сетях. Как его определить и выполнить? // Новости электротехники. – 2003. – N 6 (24). Электронный ресурс [http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/11.php]

3. Савина Н.В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях: монография / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2008 228 с.

4. Железко Ю.С. Нормирование технологических потерь электроэнергии в сетях. Новая методология расчета / Ю.С. Железко // Новости электротехники. – 2003. – N 5 (23). – С. 23-27.

5. Лыкин А.В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электрических сетях: учеб. пособие / А.В. Лыкин – Новосибирск: Изд-во НПУ,2013. - 115 с.

УДК 621.313.32.317

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ МАШИН С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ ЦЕПИ ОСНОВНОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА

А.М. Ларин, С.В. Ковальская
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Рассматривается метод определения частотных характеристик синхронных машин с учетом насыщения пути главного магнитного потока по переходным функциям, получаемым в опытах отключения от сети с номинальным напряжением. Приводятся методика регистрации и обработки экспериментальных данных. Анализируются результаты для модельного генератора типа МТ-30 и промышленного турбогенератора типа ТВВ-800-2.

A method for determining frequency responses is considered, taking into account the saturation of the path of the main magnetic flux of synchronous machines by transient functions obtained in experiments of disconnection from the network with rated voltage. The method of registration and processing of experimental data is given. The results are analyzed for a model generator of the MT-30 type and an industrial turbo generator of the TVV-800-2 type.

Keywords: *method, frequency response, synchronous machine, disconnection, voltage source, saturation.*

Ключевые слова: *методика, частотная характеристика, синхронная машина, отключение, источник напряжения, насыщение.*

Национальный стандарт Российской федерации ГОСТ 10169-77 [1], международный стандарт МЭК IEC 60034-4-1 [2], а также стандарт США [3] по методам испытаний синхронных машин (СМ) регламентируют определение ненасыщенных электромагнитных параметров (ЭМП) по данным опытов отключения от источника пониженного трехфазного напряжения невозбужденной машины, вращающейся с малым скольжением.

В выполненные в [4] исследования позволили установить, что максимально допустимое скольжения в опытах не должно превышать 0,22% для гидрогенераторов и 0,08% для турбогенераторов. Обеспечить такие скольжения практически невозможно. Поэтому опыты отключения машины, вращающейся с малым скольжением,

можно рекомендовать для определения сверхпереходных значений сопротивлений и частотных характеристик только для гидрогенераторов при разомкнутом состоянии обмотки возбуждения (ОВГ). ЭМП по продольной оси при замкнутом состоянии ОВГ следует определять при отключении машины, синхронно вращающейся в сети в режиме холостого хода. Для определения ненасыщенных значений ЭМП напряжение не должно превышать величины, соответствующей линейной части характеристики холостого хода. Получить такое напряжение в условиях действующих электростанций без переделки рабочих схем достаточно сложно.

Целью настоящей работы является анализ возможности и разработка методики определения частотных характеристик (ЧХ) проводимости со стороны обмотки статора по данным опытов отключения возбужденной СМ от сети с номинальным напряжением.

Преимущество такого подхода обусловлено возможностью определения параметров в реальных условиях работы генераторов с учетом насыщения при относительно малых затратах времени на постановку экспериментов, не связанных с изменением рабочих схем. Следует также отметить, что предлагаемый способ оказывается пригодным и при определении ЧХ синхронных генераторов, работающих по блочной схеме без выключателя на стороне генераторного напряжения.

Теоретические положения такого подхода полностью аналогичны методу отключения генератора от источника пониженного трехфазного напряжения, необходимые математические соотношения для которого, получены в [5].

Для определения ЭМП, соответствующих определенному уровню насыщения, изменение напряжения в опытах отключения возбужденного генератора от сети не должно превышать 2 - 3% от номинального значения. Качественная осциллограмма для такого случая приведена на рис. 1.

При таких малых изменениях напряжения возникают трудности в точной их регистрации путем осциллографирования, как это предусмотрено упомянутыми выше стандартами.

На ленте стандартной ширины в 120 мм такое изменение напряжения будет соответствовать отклонению светового луча гальванометра в несколько миллиметров (3 - 4 мм). Поскольку погрешность замеров составляет 0,1 – 0,2 мм, то результат может быть получен с ошибкой в несколько десятков процентов.

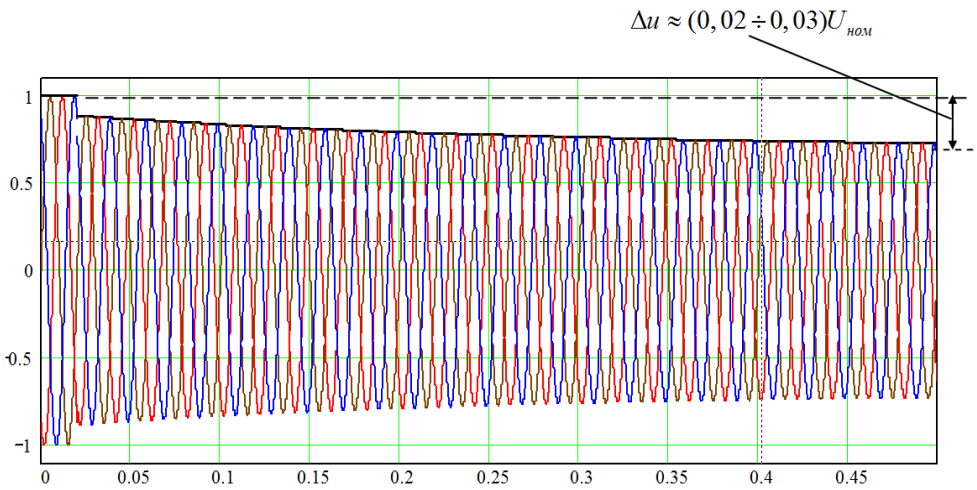


Рисунок 1 – Осциллограмма изменения напряжения на выводах недовозбужденного генератора при отключении его от сети

Для повышения точности регистрацию переходной функции изменения напряжения предлагается производить с помощью специального устройства, позволяющего регистрировать практически на всю ширину осциллографической ленты только изменение напряжения в опыте. Принципиальная схема такого устройства показана на рис. 2.

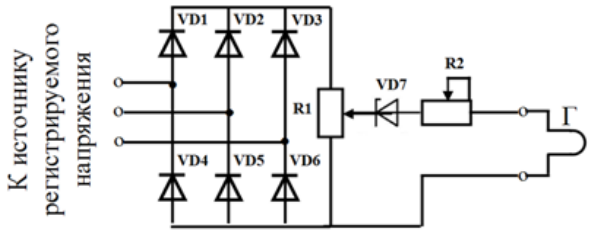


Рисунок 2 – Принципиальная схема устройства для осциллографирования малых изменений напряжения

Напряжение, измеряемое на вторичной обмотке трансформатора напряжения исследуемого генератора, подается на вход трехфазного полупроводникового выпрямителя на диодах VD1 – VD6. С выхода выпрямителя снимается пульсирующее напряжение, амплитудные значения которого соответствуют модульной величине изображающего вектора напряжения.

Это напряжение подается на активный делитель R1, понижающий выпрямленное напряжение со $100 \cdot \sqrt{2}$ В до 8 - 10 В. Напряжение с делителя подается на последовательную цепочку, состоящую из кремниевого стабилитрона VD7, регулируемого добавочного сопротивления R2 и осциллографического гальванометра, которая и производит при соответствующей настройке

выделение изменения напряжения.

Кремниевый стабилитрон VD7 обладает способностью резко увеличивать в тысячи раз свое внутренне сопротивление при достижении приложенного к нему обратного напряжения определенной величины ($U_{опорн}$), постоянной для данного диода.

Вольт-амперная характеристика реостата и осциллографического гальванометра, которые имеют постоянные активные сопротивления, представляет собой линейную зависимость.

Таким образом, подавая на вход устройства напряжение больше, чем опорное, и работая на прямолинейном участке результирующей вольт-амперной характеристики, через гальванометр будет протекать ток, пропорциональный изменению напряжения в опыте. Компенсация постоянной составляющей установившегося после отключения генератора от сети напряжения достигается путем соответствующей регулировки потенциометра R1 таким образом, чтобы к стабилитрону VD7 было приложено напряжение близкое к опорному, оставаясь при этом несколько больше последнего.

Полученную таким образом кривую, огибающую изменение напряжения на выводах обмотки статора СГ после отключения его от сети с дискретностью $\Delta t = 0,00333$ с, можно аппроксимировать функцией вида

$$\Delta u(t) = \Delta u(0) + \sum_{k=1}^{n} \Delta u_{k(0)} (1 - e^{-\alpha_k t}) . \qquad (1)$$

После перехода в частотную область получим выражение для ЧХ проводимости со стороны обмотки статора по продольной оси:

$$y_d(js) = \frac{\Delta i(0)}{\Delta u(0) + \sum_{k=1}^{n} \Delta u_{k(0)} \dfrac{\alpha_k}{js + \alpha_k}} , \qquad (2)$$

где $\Delta i(0)$ - значение тока в момент отключения; $\Delta u(0)$ - напряжение на выводах генератора в момент отключения; $\Delta u_{k(0)}; \alpha_k$ - начальное значение и коэффициент затухания k-той экспоненты, аппроксимирующей изменение напряжения. Для учета многоконтурности ротора СГ необходимо выделять три – четыре экспоненты.

Значения параметров экспоненциальных составляющих $\Delta u_{k(0)}; \alpha_k$, определялись путем аппроксимации зависимости изменения модульного значения изображающего вектора напряжения статора во времени следующим соотношением:

$$u(t) = \sum_{k=1}^{n} \Delta u_{k(0)} (1 - e^{-\alpha_k t}) . \qquad (3)$$

При аппроксимации решалась переопределенная задача оптимизационным методом, позволившим получить неизвестные параметры из условия минимума суммы квадратов отклонений измеренных значений переходной функции $Mod[u_{из}(t_i)]$ от математического ожидания $Mod[u_{расч}(t_i)]$. Критерий качества можно представить в следующем виде:

$$J(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^{m} \left(Mod[u_{расч}(\bar{\alpha}, t_i)] - Mod[u_{изм}(t_i)] \right)^2 , \qquad (4)$$

где $i = 1, 2, ..., m$ - количество исходных значений напряжения; $u_{расч}(\bar{\alpha}, t)$ – расчетное значение по (3); $u_{изм}(t)$ – значения, полученные в результате измерений экспериментальных данных; $\bar{\alpha}$ – вектор синтезируемых параметров переходного напряжения: $\Delta u_{k(0)}$; α_k.

Расчет осуществлялся с использованием стандартной процедуры минимизации, в среде математического пакета MathCAD. Погрешность аппроксимации во всех рассматриваемых случаях не превысила 0,7%.

На рис. 2 приведены частотные характеристики модельного турбогенератора МТ-30, полученные различным способом: по предлагаемой методике и из опыта отключения установившегося трехфазного короткого замыкания [5].

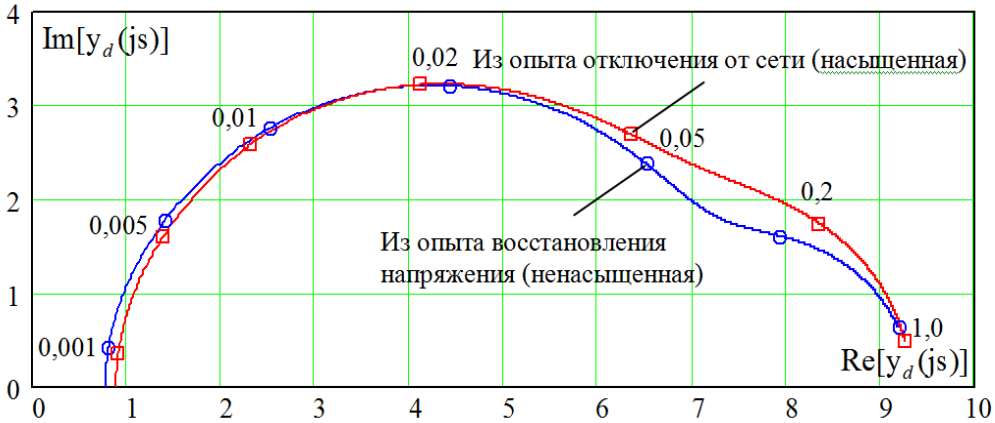


Рисунок 2 – Частотные характеристики синхронного генератора МТ-30

Насыщение проявляется в том, что медленно затухающие составляющие переходного напряжения имеют меньшую постоянную времени и большую величину (при номинальном напряжении уменьшается сопротивление взаимоиндукции) из-за нелинейности

характеристики холостого хода.

Поскольку модельный турбогенератор, не имеет мощной демпферной системы, как реальный турбогенератор, то ошибка в определении быстрозатухающей составляющей, определяющей характеристику в области скольжений более 0,05 о.е., не превысила 20%.

На рис. 3 показаны ЧХ, полученные таким же образом для промышленного турбогенератора типа ТВВ-800-2.

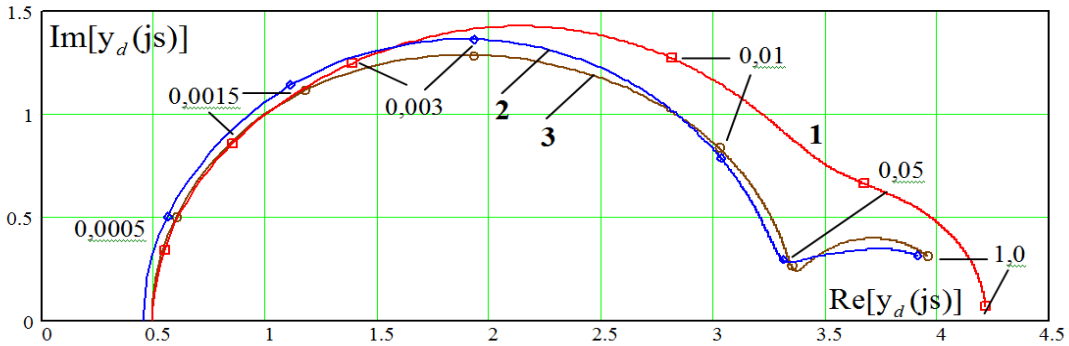


Рисунок 3 – Частотные характеристики промышленного турбогенератора типа ТВВ-800-2

Опыт проводился при изменении напряжения на 8%. Вследствие этого и мощной демпферной системы ТГ не удалось точно выделить быстрозатухающую составляющую переходного напряжения. Ошибка в области скольжений более 0,05 о.е. достигала 80%. Для уточнения ЧХ в области больших скольжений была выполнена коррекция быстрозатухающей составляющей по значению комплекса проводимости при s=1, полученному в опыте восстановления напряжения (соответствует ненасыщенному состоянию). При этом погрешности существенно снизились.

Для повышения точности регистрацию всех параметров переходного режима необходимо осуществлять с помощью специализированных цифровых регистраторов. Частота дискретизации измерений в начальной стадии переходного процесса ($0 < t < 0{,}1$с) должна соответствовать 5 кГц.

По данным измерений мгновенных значений напряжения в трех фазах обмотки статора определяются значения модуля обобщенного вектора переходного напряжения статора для различных моментов времени:

$$U_{\text{пер опыт}}(t_l) = \sqrt{\frac{2}{3}(u_a^2(t_l) + u_b^2(t_l) + u_c^2(t_l))}\,, \quad l = 1,2,\ldots,n\,. \qquad (5)$$

Для выделения только изменения напряжения необходимо из

каждого значения модуля изображающего вектора напряжения $U_{пер\ опыт}$ вычесть модульное значение изображающего вектора установившегося напряжения U_{∞}, наступающего после отключения возбужденного генератора от сети

$$\Delta U(t) = U_{пер\ опыт} - U_{\infty}. \quad (6)$$

Полученная таким образом переходная функция, представляется экспоненциальными составляющими аналогично тому, как это показано выше.

Выводы

1. Предложен способ и разработана методика регистрации и обработки экспериментальных данных при определении ЧХ синхронных машин по продольной оси с учетом влияния насыщения цепи главного магнитного потока из опытов отключения от сети номинального напряжения ненагруженного генератора.

2. Экспериментальное определение ЭМП по переходным функциям процесса затухания или нарастания напряжения на вращающихся синхронных генераторах отличаются малыми затратами времени на постановку экспериментов, поскольку не требуется изменение рабочих схем машины. При этом возможно определение ЧХ крупных генераторов, работающих по блочной схеме без выключателя на стороне генераторного напряжения.

Перечень ссылок

1. ГОСТ 10169-77 Государственный стандарт Союза ССР машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. Введ. 2012-23-11. – М.: Стандартинформ, 2014. – 83 с.

2. ГОСТ Р МЭК 60034-4-2012 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин. Введ. 1977-28-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 77 с.

3. IEEE Std 115™-2019 - IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Including Acceptance and Performance Testing and Parameter Determination for Dynamic Analysis The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. – 232 p. - ISBN:978-1-5044-5928-0.

4. Ларин, А. М. Обоснование максимально допустимого значения скольжения при экспериментальном определении электромагнитных параметров синхронных машин / А.М. Ларин, С.В. Ковальская // Материалы 8-й международной научно-практической конференции. Инновационные перспективы Донбасса. Т.2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – Донецк: ДонНТУ. – 2022. – С. 106 – 114.

5. Рогозин, Г. Г. Инженерные методы определения частотных характеристик синхронных машин / Г.Г. Рогозин, А.М. Ларин // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. - №1. – С.88 - 97.

УДК: 621.3.064.1

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

И.А. Бершадский[1], А.Д. Мых[1], А.Ю. Гладков[2], Н.М. Халявинская[1],
[1]ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация
[2]ГУ«Макеевский научно-исследовательский институт по
безопасности работ в горной промышленности (МАКНИИ)
г. Макеевка, ДНР, Российская Федерация

Проведен поиск новых и рассмотрены комбинации уже существующих методов обработки входящих на микроконтроллер данных, которые могут значительно отличаться в зависимости от вида подключаемой в сеть нагрузки.

The search for new and considered combinations of existing methods of processing incoming data to the microcontroller, which may differ significantly from the type of load connected to the network.

Ключевые слова: *дуговой пробой, электрическая сеть, потребитель электроэнергии, вейвлет-преобразование, переходной процесс, частота дискретизации, микроконтроллер.*

Keywords: *arc breakdown, electrical network, electric power consumer, wavelet transform, transient, sampling rate, microcontroller.*

В распределительных сетях низкого напряжения существует высокий риск возникновения пожаров, вызванных неисправностями электропроводки.

Отметим, что последние 5 лет в Российской Федерации пожары от электроустановок составляют более 34% от их общего числа [1]. Около 90% этого объема приходится на жилой сектор, где основной причиной пожаров являются неисправности кабельных изделий, электроустановочных устройств (электрические розетки, вилки, выключатели, разветвители и т.п.) и осветительных приборов.

Одной из распространенных причин пожаров являются дуговые пробои, которые в основном возникают из-за электрических проблем, таких как старение кабелей и ослабление контактных соединений. Создавая высокую температуру и распыляя расплавленный металл,

дуговые пробои в конечном итоге приводят к пожарам по электротехническим причинам [2].

Обычные защитные устройства, такие как автоматические выключатели, предохранители или прерыватели тока утечки не способны обнаружить эту неисправность, так как ток дуги остается ниже уровней отключения теплового или мгновенного расцепителей.

Известны два типа дуговых замыканий: последовательные и параллельные. Первый тип, показанный на **рис. 1, а**, является наиболее распространенным и возникает при обрыве одного силового проводника. Максимальный ток дуги ограничивается током нагрузки из-за последовательного соединения и, в зависимости от этого тока, может выделяться или не выделяться значительное количество тепла, вызывающего пожароопасное состояние ослабленных контактов.

Параллельное дуговое замыкание, показанное на **рис. 1, б**, возникает между нейтральным и фазным проводником, когда изоляция повреждена из-за механического, температурного напряжения или старения. В этом случае высокоомная дуга сначала расплавляет и карбонизирует изоляцию, а затем образуется токовый тракт, который может повлечь возгорание.

Устройства защиты от образования дугового пробоя (УЗДП) уже существуют и представляют собой микропроцессорный модульный релейный аппарат, предназначенный для электрической цепи напряжением до 0,4 кВ. Но эксперименты показывают, что они часто не устраняют такие неисправности [3].

При проектировании и эксплуатации УЗДП также остались нерешенными полностью проблемы, вызванные ложными срабатываниями из-за электромагнитных помех, не связанных с аварийным искрением. Поэтому разработка метода идентификации последовательного дугового пробоя на основе дискретного вайвлет-алгоритма является актуальной.

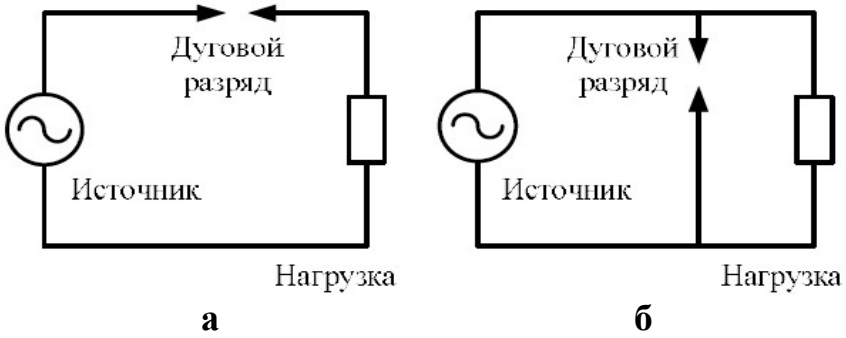


Рисунок 1 – Дуговое замыкание: последовательное (а) и параллельное (б)

Многие из существующих подходов к обнаружению дуговых замыканий используют форму сигнала тока и его первую и вторую производные, чтобы идентифицировать пики, нулевые “площадки” или быстрое нарастание фронта после нулевой “площадки” [4]. Другим способом распознать возникновение дуги является анализ широкополосного высокочастотного (ВЧ) шума в диапазоне от 5 до 50 МГц. Например, в [5] высокочастотный компонент анализируется путем построения срезов трехмерной поверхности на основе биспектра. В других источниках непериодичность сигнала рассматривается как критерий обнаружения дуги [6]. Для методов обнаружения ВЧ принятые методы цифровой обработки сигналов приводят к необходимости точно измерения ВЧ-составляющих и, следовательно, высокой частоты дискретизации [7], что требует высокозатратных микроконтроллеров и АЦП.

Функция “нулевой паузы” сама по себе не подходит для линейных нагрузок в качестве метода обнаружения и требуется её дальнейшая обработка.

В то же время наиболее перспективным с точки зрения диагностических характеристик можно признать развиваемые в последнее время для извлечения признаков неисправности (дугового пробоя) Вейвлет-преобразования [8]. Они позволяют учитывать нестационарность токовых сигналов дугового пробоя и адаптировать к сигналу выбор параметров окна по времени.

Вейвлет-преобразования можно разделить на непрерывные (CWT) и дискретные (DWT).

Вейвлеты – это математические функции, похожие на синусоидальные волны, с той разницей, что они имеют “конечную колебательную природу”. Дискретное вейвлет-преобразование оказалось полезным при анализе переходных процессов, таких как те, которые связаны с дуговыми пробоями в электропроводке жилых зданий.

В данной работе предложен новый метод обнаружения последовательного дугового пробоя в электрической сети жилых помещений.

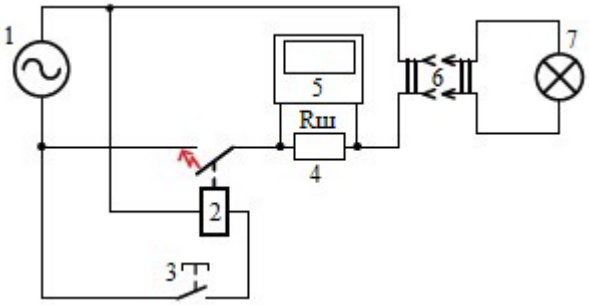
Для применения алгоритма обнаружения неисправностей, первоначально собраны и обобщены данные экспериментальных исследований, которые проводились на платформе (рис. 2).

Исследуемая нагрузка 7 подключена через штепсельное соединение 6 (вилка-розетка) к сети 1 через контактор 2 и резистивный шунт 4. Формирование переходных процессов с искрениями при включении и отключении нагрузки происходит за

счет контактов однофазного контактора, управляемого кнопкой 3 включения его катушкой. Принудительная генерация искрений при работе нагрузки достигается за счет обеспечения дребезга в месте присоединения неизолированного проводника к зажиму контактора.

Также искрения создавались путем вибрации проводника в стандартном контактном зажиме бытовой розетки.

Измерение переходных процессов силы тока в нагрузке от времени (рис. 3) обеспечивается за счет резистивного шунта 4 с коэффициентом преобразования 1В/1А, подключенного к осциллографу 5. Данные зависимости нормализовались путем приведения к безразмерному виду $i(t)/i_{max}$.



1 – сеть 220 В, 50 Гц;
2– контактор однофазный (формирователь дуги);
3 – кнопка включения катушки контактора;
4 – резистивный шунт 1 Ом (для измерения силы тока);
5 – осциллограф запоминающий типа TDS 2022;
6 – розетка и вилка для подключения бытовой нагрузки;
7 – бытовая нагрузка (LED лампа, пылесос, дрель)

Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда для получения кривой тока дугового пробоя

Для моделирования и обработки сигналов токов дуговых пробоев использовался математический пакет Matlab. Вейвлет-анализ токовых диаграмм нагрузок электросетей офисной и бытовой нагрузки 0,4 кВ выполнялся в пакете «WaveletToolbox» Matlab [9].

Дискретно-временной анализ осуществлялся функцией *wavedec*, которая возвращает векторы одномерного многоуровневого вейвлет-преобразования.

Её синтаксис:

$$[c,\ l] = \text{wavedec}\ (I_d,\ level_\max,\ \text{‘}filter\text{’}), \qquad (1)$$

где I_d – одномерный сигнал;
level_max – максимальный уровень преобразования;
‘filter’ – тип вейвлета, например, ‘*db4*’;

[c, l] – выходные векторы разложения.

Для извлечения коэффициентов детализации *cd* на уровнях *levels=1, 2…level_max* использована функция *detcoef* с синтаксисом:

$$cd = \text{detcoef}(c,\ l,\ levels). \tag{2}$$

cd при *level_max*=7 представляет собой структуру в виде {(512x1) (256x1) … (14x1)} с векторами *cd1, cd2…cd7* на соответствующих номеру вектора вейвлет-преобразования.

Ниже на рис. 3, 4 показаны результаты идентификации дугового пробоя на примере пылесоса. Основываясь на уровни вейвлетов (рис. 4) можно судить о возникновении искрения.

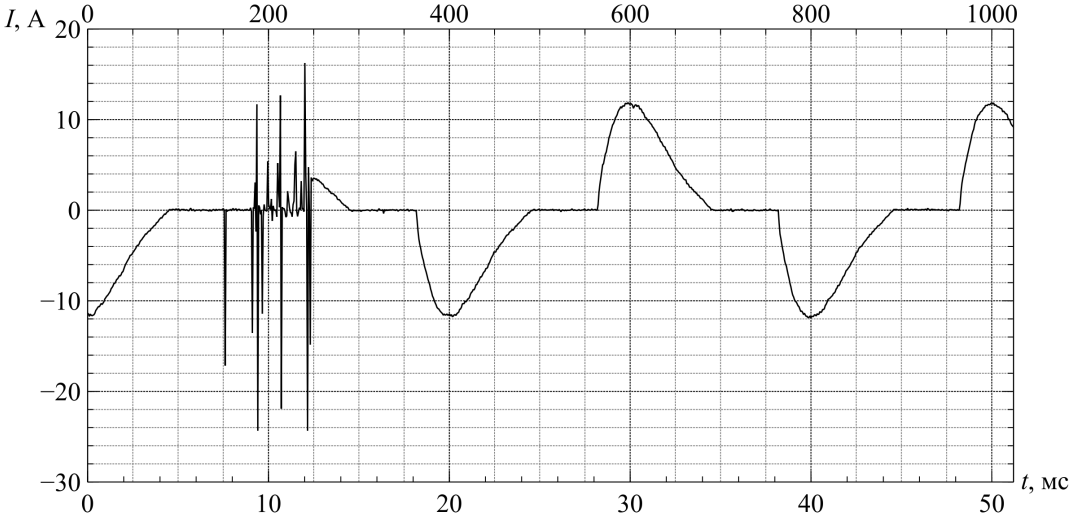


Рисунок 3 – Кривая тока пылесоса в режиме последовательного дугового пробоя при ослабленном контакте

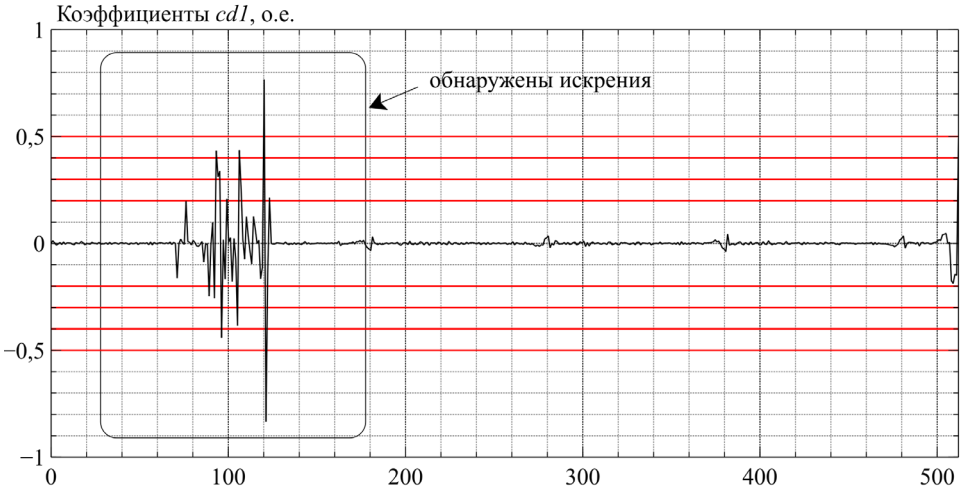


Рисунок 4 – Диаграмма тока и коэффициентов детализации DWT во временной области (нагрузка – пылесос)

Данный алгоритм необходимо проверить на «маскирующих»

нагрузках, таких как дрель, регулятор мощности, отключение нагрузки переключателями и штепселями, пусковое реле холодильника.

Выводы

Проведенный анализ результатов научных исследований и литературных источников показал, что небходимо создание метода идентификации последовательных дуговых замыканий в электрической сети, который исключает ложные срабатывания. Наиболее перспективно применение метода диагностирования дугового пробоя на основе дискретного вейвлет преобразования, при этом создана математическая основа указанного метода.

Перечень ссылок

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году. Статистический сборник / под общ. Ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2020. 80 с.

2. Монаков В.К. Разработка устройства защиты от дуговых замыканий // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23, №8. С. 27-31.

3. Защита от дугового замыкания для дома: AFDD или УЗМ 50/УЗИС. URL: https://electrikblog.ru/zashchita -ot-dugovogo-zamykaniya-dlya-doma/ (дата обращения 11.11.2023).

4. A. Method for Residential Series Arc Fault Detection and Identification, Electrical Contacts / D. Li, Z. Song, J. Wang, Y. Geng, H. Chen, L. Yu, B. Liu // Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts. IEEE, 2009. Pp. 7-13. doi: 10.1109 / HOLM.2009. 5284428.

5. Series Arc Fault Detection Algorithms Based on Autoregressive Bispectrum Analysis / K. Yang, R. Zhang, S. Chen, F. Zhang, J. Yang, X. Zhang // Algorithms. 2015. No. 8(4). Pp 929-950. doi: 10.3390/a8040929.

6. Wang S.C., Wu C.J., Wang Y.J. Detection of Arc Fault on Low Voltage Power Circuits in Time and Frequency Domain Approach // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. 2012. No. 6(5). Pp. 324-331.

7. Arc Faults in Low-Voltage Distribution Networks / M. Rashevskaya, A. Kulikov, M. Tibrayev, A. Gudoghnikov // Proceedings of the 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). IEEE, 2021. Pp. 1-5/ doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503046.

8. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 400 с.

9. MathWorks Help Center. Wavedec. URL: https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wavedec.html. (дата обращения 11.11.2023)

УДК 669.02.09

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РУДНИЧНЫХ ПЕРЕНОСНЫХ ПРИБОРОВ

М.В. Сечина, И.А Бершадский
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Приведены экспериментальные исследования переходных процессов разрядов, возникающих при размыкании индуктивно-резистивных цепей постоянного тока напряжением питания ниже 8 В. Практическое использование результатов позволит повысить технико-экономические характеристики искробезопасного электрооборудования с аккумуляторным питанием.

Experimental investigations of switching discharges arising at breaking of inductive-resistive DC circuits with supply voltage below 8 V are given. Practical use of the results will allow to increase technical and economic characteristics of intrinsically safe battery-powered electrical equipment.

Ключевые слова: *искробезопасность, электрическая цепь, дуговой разряд, аккумуляторное питание.*

Keywords: *intrinsic safety, electrical circuit, arc discharge, battery power.*

Искробезопасная цепь является единственной концепцией взрывозащиты, приборы с которой можно использовать в Зоне 0 [1]. Являясь самой безопасной формой защиты (категория "*ia*"), данная концепция предлагает более высокий уровень обеспечения безопасности.

Искробезопасное исполнение электрооборудования является наиболее безопасным видом взрывозащиты систем управления, автоматики, сигнализации и связи, которыми всё в большей мере оснащается современное производство, и позволяет выполнить эти системы совершенно безопасными по отношению к взрывоопасной атмосфере.

Значительный вклад в области исследований по искробезопасности внес А.Т. Ерыгин, который занимался вопросами расчетной и электроизмерительной оценки искробезопасности

электрических цепей, разработкой приборов и средств повышения искробезопасной мощности.

А.Л. Трембицким изучалось влияние длительности электрического разряда на величину минимальной воспламеняющей энергии, мощности и тока как для неподвижных, так и для расходящихся электродов при различной скорости их движения для разработки методов оценки опасности электрического искрения в воспламеняющихся средах горных предприятий.

Расчетная оценка А.Т. Ерыгина и А.Л. Трембицкого основана на том, что цепь может быть разомкнута контактами с любой скоростью в возможном диапазоне их разведения, при этом сопоставление энергий разряда и воспламеняющей энергии взрывоопасной смеси осуществляется при одинаковых скоростях размыкания контактов и длительностях разрядов.

Однако данный метод оценки имеет свои ограничения, связанные с тем, что в расчет принимается только электрический разряд и не учитывается влияние контактного перегрева [2].

Исследования Р.Ю. Толчёнкина посвящены определению минимального напряжения зажигания дуги для ряда материалов контактов и разработкой метода оценки и способов обеспечения искробезопасности рудничных переносных приборов и электрооборудования.

Одним из самых распространенных форм электрического разряда, встречающихся при коммутации электрических цепей, является дуговой разряд. Для возбуждения и поддержания дугового разряда между двумя металлическими электродами требуется выполнение определенного комплекса условий.

В малой области разряда у поверхности катода всегда должен существовать резкий перепад напряжения, называемый катодным падением. Однако выполнение одного этого условия является недостаточным. Дуговой разряд может иметь место при условии, что ток в разряде будет превосходить некоторое пороговое значение, зависящего от материала электродов.

Для определения минимального напряжения зажигания дуги для ряда материалов контактов был использован метод определения начального напряжения зажигания дуги в момент размыкания контактов (рис. 1).

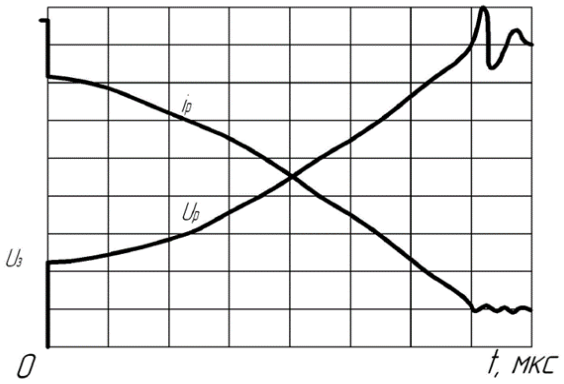


Рисунок 1 – Типовая осциллограмма напряжения на разрядном промежутке при размыкании электрической цепи

Сущность метода заключается в том, что определяется разность потенциалов на контактах в момент образования дуги при их размыкании, т.к. дуга должна возникать ещё при таких расстояниях между контактами, которые не превосходят протяженности катодного падения. Следовательно, определяемое начальное напряжение дуги не может включать в себя ничего, кроме исследуемого катодного падения [3].

Минимальное напряжение зажигания дуги не зависит от параметров электрической цепи, вида её коммутации и диаметра контактов, а зависит от материала контактов (табл.1).

Таблица 1 – Минимальные напряжения дуги для ряда материалов контактов и параметров электрической цепи

Материал контактов	Параметры размыкаемой электрической цепи		Минимальное напряжение зажигания дуги, В
	E, В	*I*, А	
Сталь-сталь	30	7,5	12
		4,5	
		2,0	
		1,0	
		0,5	
Медь-медь	30	7,5	13,5
		2,0	
Припой-припой	30	2,5	11,0
Сталь оцинкованная – сталь оцинкованная; Кадмий – вольфрам	30	7,5	8,0
		4,0	
		2,5	

Основным методом испытаний на искробезопасность электрических цепей является экспериментальный, основанный на коммутации их искрообразующими механизмами во взрывной камере,

заполненной испытательной взрывоопасной смесью. Кроме этого, действующий стандарт разрешает бескамерный метод оценки, основанный на использовании характеристик искробезопасности.

Бескамерные методы оценки искробезопасности электрических цепей в сравнении с испытаниями во взрывной камере имеют значительные преимущества:

– более высокая достоверность;

– более широкая область применения в сравнении с камерными испытаниями;

– более высокая информативность оценки за счет получения ее результатов в количественной форме в виде значений коэффициентов искробезопасности;

– меньшее время проведения испытаний;

– возможность в процессе оценки выбирать оптимальные параметры электрооборудование;

– бескамерная оценка искробезопасности электрических цепей доступна не только испытателям Сертификационных центров, но и разработчикам искробезопасного электрооборудования.

При коммутации (замыкание и размыкание контактов) электрических цепей возникают электрические разряды. Разряды замыкания в основном возникают в емкостных цепях, а разряды размыкания – в омических и индуктивных [4].

И.А. Бершадским, А.Ю. Гладковым, В.В. Иваниловым проведены экспериментальные исследования переходных процессов разрядов, возникающих при размыкании индутивно-резистивных цепей постоянного тока напряжением питания ниже 8 В.

Для исследований переходных процессов тока и напряжения разряда размыкания разработан и изготовлен искрообразующий механизм (ИМ) регулированием скорости размыкания (рис. 2, 3):

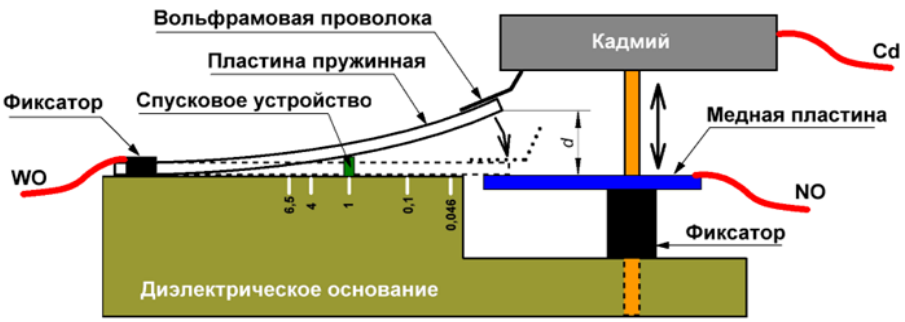


Рисунок 2 – Искрообразующий механизм

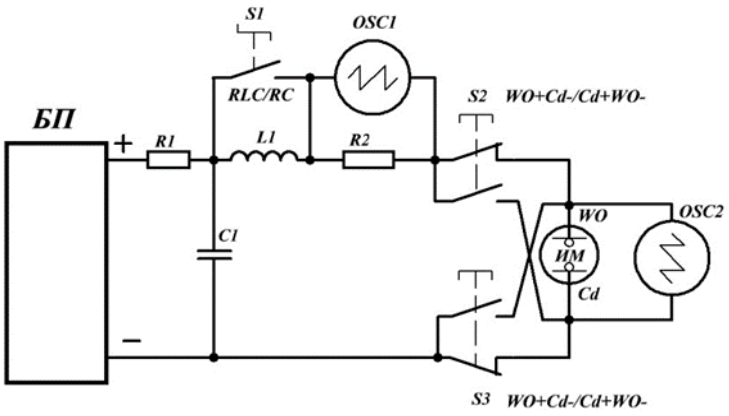


Рисунок 3 – Схема регистрации экспериментальных зависимостей

С помощью ИМ (рис. 2), подключенного по схеме (рис. 3) записаны переходные процессы разрядов размыкания омической цепи при напряжениях: 12 В и 5 В с чередованием полярности на контактах при неизменных значениях $R2$ = 24 Ом и 10 Ом соответственно. При этом $L1$ = 0 мкГн, $C1$ = 0 мкФ.

Для оценки искробезопасности электрических цепей напряжением менее 8 В может использоваться расчетный метод, однако осциллограммы напряжения и тока показывают, что необходима модификация статической ВАХ разряда.

В начальный момент разряда размыкания наблюдается анодно-катодный скачек напряжения величиной 9-11 В в зависимости от полярности пары контактов кадмий-вольфрам. При полярности вольфрам – анод, напряжение выше, но длительность разряда меньше на 20 %.

В фазе продолжительности разряда при ЭДС источника 5 В наблюдаются высокочастотные колебания, свидетельствующие о его неустойчивом, незаконченном характере, т.е. происходит восстановление напряжения на нем. Колебательный характер затухания тока характерен для цепи без индуктивной нагрузки и практически пренебрежим с увеличением индуктивной нагрузки [5].

Выводы

Благодаря проведенным научно-исследовательским работам многих исследований, приведенных выше, были решены основные задачи в области оценки и обеспечения искробезопасности электрической цепи.

Однако проведенные научно-исследовательские работы не решили задачу оценки и обеспечения искробезопасности химических источников тока без ограничительных сопротивлений и вместе с реактивными нагрузками. До настоящего времени не изучена область параметров электрических цепей при низких э.д.с., индуктивностях и больших размыкаемых токах.

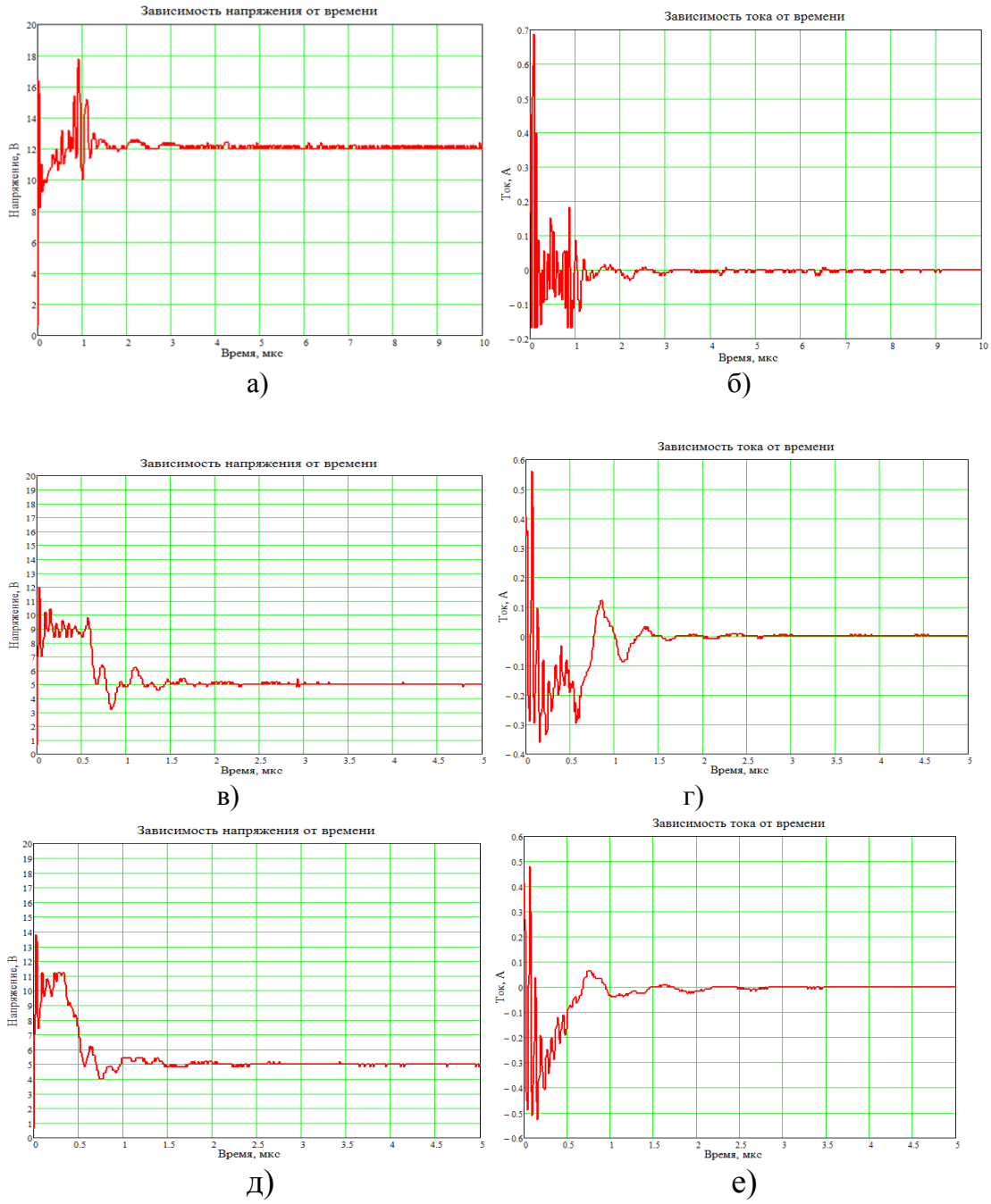


Рисунок 4 — Осциллограммы напряжения и тока разряда размыкания в цепи без индуктивной нагрузки (ток нагрузки 0,5А):
а, б – ЭДС источника 12 В, полярность +Кадмий и –Вольфрам;
в, г – ЭДС источника 5 В, полярность +Кадмий и –Вольфрам;
д, е – ЭДС источника 5 В, полярность -Кадмий и +Вольфрам;

Изучение воспламеняющей способности электрических разрядов в этой области параметров электрических цепей и практическое использование ее результатов позволит разработчикам искробезопасной аппаратуры создать

переносные приборы и электрооборудование с более высокими технико-экономическими показателями.

Современные тенденции развития устройств автоматизации технологических процессов направлены на всё большее внедрение в них цифровых технологий в измерительных узлах, модулях обработки, хранения и передачи данных, включая визуализацию с помощью ЖК дисплеев, что приводит к необходимости использования для их питания низкое напряжение постоянного тока, например, 5 В, 3.3 В и т.д.

Для диапазона напряжений источников питания ниже 8 В (переносные приборы, химические источники, микропроцессорные устройства и др.) недостаточное внимание уделялась изучению воспламеняющей способности разряда при больших размыкаемых токах в условиях сложных соединений элементов цепи и перегрева контактов.

В настоящее время существует острая необходимость в установлении исходных данных для бескамерной оценки искробезопасности наиболее распространенных в мировой практике источников питания со стабильной защитой и различными индуктивными нагрузками.

Рассмотренный на рис.3 искрообразующий механизм имеет ряд недостатков, которые препятствуют проведению серии опытов с повторяющимися результатами по определению ВАХ электрического разряда с источниками питания напряжением ниже 8 В.

В частности, через несколько искрений нужно подключить блок питания к контактам и по времени импульса, зная расстояния между контактами, проверять скорость коммутации.

Кроме того, вольфрамовая проволочка нуждается в частой замене из-за её деформации при коммутациях.

Дуговой разряд активной цепи в данном случае устойчиво можно получить при токах порядка 10-15 А. Необходимо предложить метод эквивалентирования, который позволял бы приводить цепь содержащую индуктивность, к эквивалентной активной цепи с тем, чтобы проводить эксперименты при малых токах.

Дальнейшая работа по расширению области применения бескамерной оценки искробезопасности электрических цепей по разрядам размыкания должна быть направлена на выявление типовых наиболее часто встречающихся при испытаниях искробезопасного электрооборудования электрических цепей и установление для них необходимых зависимостей, позволяющих оценивать их искробезопасность.

Перечень ссылок

1. ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99) Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь i. – Введ. 01.01.2001. — М. : ИПК Издательство стандартов, 2000. — 122 с.

2. Толчёнкин Р.Ю. Разработка метода оценки и способов обеспечения искробезопасности рудничных переносных приборов и электрооборудования: дис. … конд.техн.наук: 05.26.01 – «Охрана труда (горная промышленность)», УРАН ИПКОН РАН, М.:2009. – 213 с.

3. Толченкин Р. Ю. Экспериментальное определение минимального напряжения зажигания дуги для ряда материалов контактов / Толченкин Р. Ю. //

Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – №12. – С. 106-110.

4. Ерыгин А. Т. О расширении области применения бескамерной оценки искробезопасности электрических цепей/ Ерыгин А. Т., Шатило А. Н., Трембицкий А. Л. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – №12.– С. 202-206.

5. Бершадский И.А. О переходных процессах электрического разряда в цепи напряжением питания ниже 8 В / Бершадский И.А, Гладков А. Ю., Иванилов В.В. // ДОНБАСС БУДУЩЕГО ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ. Сборник материалов научно-технической конференции. Донецк. — 2021. — С. 183-187.

УДК 62-833.6

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В СОСТАВЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

И.О. Журов, П.И. Розкаряка
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В статье предложена универсальная методика оптимизации работы асинхронной машины в составе тягового электропривода с полеориентированным векторным управлением с применением стратегий минимизации потерь электрической энергии и минимизации тока статора при заданном крутящем моменте.

The article proposes multipurpose optimizing method for operation of an induction motor as part of a traction electric drive with field-oriented vector control using minimizing power losses and minimizing stator current strategies for given torque.

Ключевые слова: *тяговый электропривод, асинхронный двигатель, магнитное насыщение, потери в стали, оптимальное управление, векторное управление.*

Keywords: *induction motor, traction electric drive, magnetic saturation, core losses, optimal control, vector control.*

Для оптимизации работы АМ с векторным управлением (ВУ) в тяговом электроприводе чаще всего используются стратегии оптимального управления (СОУ) “Максимальный момент на Ампер” (ММА) и “Минимальные потери энергии” (МПЭ). В сущности стратегия ММА используется в пусковом режиме работы и подразумевает максимально возможное снижение тока статора. Стратегия МПЭ обеспечивает минимизацию суммарных потерь электрическиой энергии при заданном моменте и применяется в штатном режиме работы без ослабления магнитного потока, обеспечивая максимизацию КПД АМ. При ослаблении поля СОУ не оказывает должного эффекта на работу системы, поскольку поток ротора ограничивается для поддержания заданного уровня ЭДС [1].

Примеры применения стратегии ММА рассмотрены в работах [2], [3], стратегии МПЭ – в работе [4]. При этом предлагаемые способы оптимизации часто отличаются повышенной сложностью, что в результате создает дополнительную вычислительную нагрузку на контроллер, ресурсы которого могут быть ограничены.

В данной статье описывается универсальная методика оптимизации работы АМ, отличающаяся простотой и позволяющая быстро выполнять синтез оптимального ВУ с учетом магнитного насыщения и потерь в стали.

С этой целью используются уравнения электрического равновесия АМ с учетом потерь в стали, записанные для статического режима работы [5]:

$$\begin{cases} U_d = \left(R_s + K_r^2 R_r + \overline{K}_r R_m\right) I_d - \left(\omega_s + \omega_r\right)\sigma L_s I_q - K_r\left(K_r R_r - R_m\right) I_d \\ U_q = \left(R_s + K_r^2 R_r + \overline{K}_r R_m\right) I_q + \left(\omega_s + \omega_r\right)\sigma L_s I_d + K_r L_m \omega I_d \end{cases} \quad (1)$$

где $R_\Sigma = R_s + K_r^2 R_r + \overline{K}_r R_m$, $\omega_r = z_p \omega$.

При учете насыщения магнитной цепи АМ задача синтеза стратегий оптимального управления в аналитической форме является затруднительной, поскольку в уравнениях электрического равновесия цепей статора и ротора параметр L_m является переменным, зависящим от магнитного потока. Кроме того, зависимость $L_m(\psi)$ для каждого двигателя является индивидуальной. Таки образом, возникает задача поиска экстремума целевой функции при варьировании не только составляющих тока статора, но и взаимной индуктивности.

По этой причине предлагается использовать методику синтеза СОУ, основанную на предварительном расчете характеристик двигателя в некотором заранее известном диапазоне изменения регулируемых величин, а именно – крутящего момента, частоты вращения и потокосцепления ротора (потокообразующей составляющей тока статора). Для этого выполняется следующая последовательность действий:

1. Задается требуемый диапазон изменения угловой скорости (частоты) вращения и соответствующие ему по механической характеристике двигателя значения момента, после чего рассчитывается механическая мощность на валу $P_{мех} = M \cdot \omega$;

2. В выбранном диапазоне варьирования тока $I_d = [I_{d,min} \ldots I_{d,max}]$, рассчитываются переменные параметры машины;

3. Для каждого тока I_d рассчитываются, соответственно, из формулы момента рассчитывается ток $I_q = M/\left(1{,}5 z_p L_m^2 / L_r I_d\right)$, а также частота скольжения по формуле $\omega_s = I_q / I_d / T_r$, из уравнений (1) напряжения статора U_d, U_q, а также оптимизируемая величина, в роли котрой выступают потери мощности $\Delta P_{эл}$ и модуль тока статора I_s;

4. Для заданного момента выбирается точка, в которой достигается искомый оптимум, далее строятся зависимости выбранных оптимизируемых величин в функции потокообразующего тока статора I_d;

5. Для всех значений заданного момента строится зависимость $I_{d,ref}(M_{ref})$, закладываемая в алгоритм управления.

Чтобы полученные зависимости использовать в алгоритме управления электроприводом, их следует предварительно обработать следующим образом:

1. Для каждой кривой $I_{d,ref}(M_{ref})$, например по методу наименьших квадратов, выполняется аппроксимация полученной табличной зависимости степенным полиномом:

$$I_{d,ref}^{opt}\left(M_{ref}\right) = a_n M_{ref}^{(n)} + a_{n-1} M_{ref}^{(n-1)} + \ldots + a_1 M_{ref} + a_0 \quad (4)$$

где n, a_n – порядок и коэффициенты аппроксимирующего полинома.

2. На следующем этапе выполняется уточнение значения заданного тока I_d по угловой скорости в соответствие с выражением:

$$I_{d,ref,\Sigma}^{opt} = k_{prox,h} I_{d,ref,h}^{opt} + k_{prox,l} I_{d,ref,l}^{opt} \quad (5)$$

Здесь коэффициент $k_{prox,l(h)}=|n_{cur}-n_{h(l)}|/(n_h-n_l)$ определяет степень приближенности текущей скорости вращения n_{cur} к двум соседним (большей n_h и меньшей n_l) скоростям, для которых определены зависимости $I_{d,ref}(M_{ref})$.

Если текущая скорость n_{cur} находится вне пределов минимума и максимума, для которых были получены оптимальные кривые, заданный потокообразующий ток принимается равным таковому для ближайшей минимальной или максимальной частоты соответственно.

На графике (рис. 1) приведено семейство кривых, построенных для тягового двигателя ТАД-320-12-У2 при значениях угловой скорости вращения 50, 100, 150, 204 об/мин со следующими характеристиками: номинальная мощность $P_{ном}$ = 320 кВт, пусковой момент $M_{пуск}$ = 22,8 кНм, номинальный момент (в точке перегиба тяговой характкеристики) $M_{ном}$ = 15 кНм, номинальная угловая скорость $n_{ном}$ = 204 об/мин, макисмальная угловая скорость n_{max} = 876 об/мин. Данный двигатель входит в состав комплекта тягового электрооборудования маневрового тепловоза ТГМ-6, который был спроектирован в рамках проекта его модернизации в концерне Русэлпром (РФ, г. Москва).

Алгоритм векторного управления с применением приведенной методики оптимизации запрограммирован в DSP-контроллере TMS320F28335 модуля управления силовым преобразователем. С учетом того, что период ШИМ составляет $T_{PWM}=1/f_{PWM}$=250 μс (f_{PWM}=4кГц), алгоритмические вычисления выполняются дважды за один период ШИМ, т.е. цикл вычислений составляет $T_{выч}$=125 μс. При этом вычислительные затраты на оптимизацию по приведенной методике составляют 2,5 μс. Оценка времени вычислительных ресурсов была выполнена посредсвом ПО Code Composer Studio.

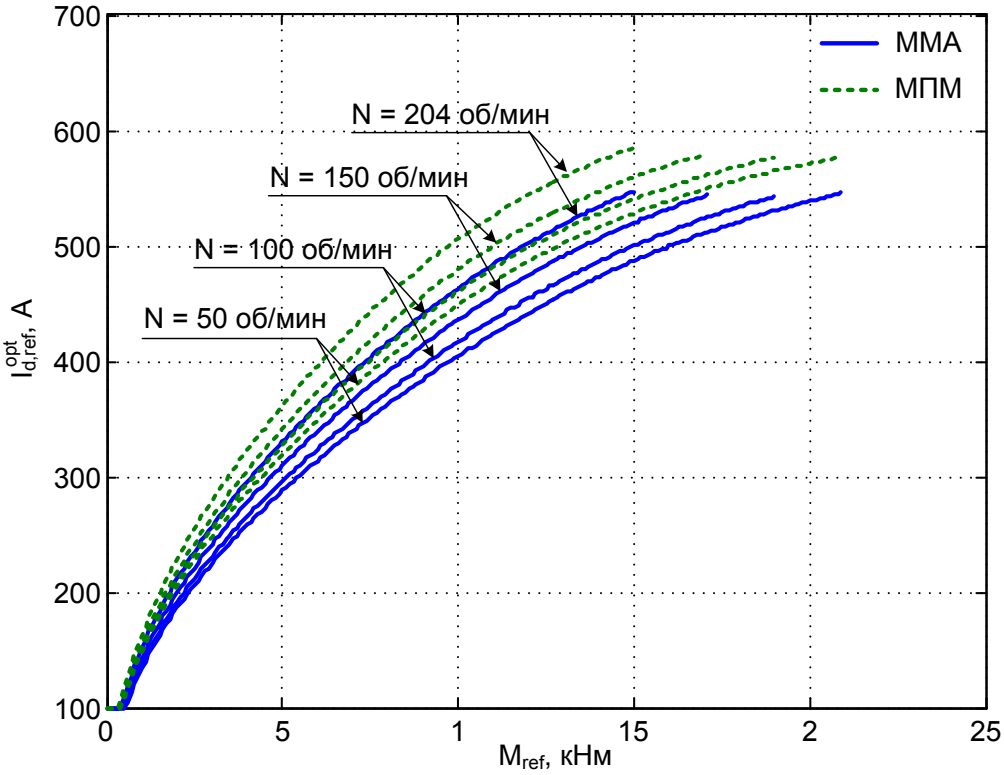


Рис. 1. Семейство оптимальных кривых $I_{d,ref}(M_{ref})$ для стратегий управления МПЭ и ММА двигателя ТАД-320-12-У2 при варьировании частот вращения

Выводы

Описанная методика оптимизации работы асинхронной машины может быть применена как в тяговых электроприводах, так и в других электромеханических установках с повышенными требованиями к энергетическим показателям качества работы системы. Исходными данными для расчета выступают обмоточные параметры машины, включая кривую намагничивания, а также сопротивления обмоток статора и ротора и сопротивление цепи потерь в стали.

Вычислительные затраты контроллера при расчете оптимального по выбранному критерию значения потокообразующего тока статора составляют 2% от суммарного времени вычислений алгоритма полеориентированного векторного управления.

Перечень ссылок

1. I. Zhurov, S. Bayda and S. Florentsev, "Modeling of a Diesel Locomotive Induction Motor Drive with the Field-oriented Control when Operating in a Limited Voltage and High Rotation Frequency Mode," 2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED), 2021, pp. 1-5.

2. S. Peresada, S. Kovbasa, S. Dymko and S. Bozhko, "Dynamic output feedback linearizing control of saturated induction motors with torque per Ampere ratio maximization," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2016, pp. 1-6.

3. A. Popov, V. Popova, I. Gulyaev and F. Briz, "Dynamic Response of FOC Induction Motors Using MTPA Considering Voltage Constraints," 2019 26th

International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1-5.

4. O. Tolochko, D. Kaluhin and O. Burmelov, "Speed Vector Control of Induction Motor With Copper and Iron Losses Minimization," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 408-413.

5. I. Zhurov, S. Bayda and S. Florentsev, "Field-Oriented Control of the Induction Motor as Part of the Shunting Locomotive Powertrain Considering Core Losses and Magnetic Saturation," 2022 29th International Workshop on Electric Drives: Advances in Power Electronics for Electric Drives (IWED), 2022, pp. 1-6.

УДК 62-519:62-83

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ДАТЧИКОМ LIDAR В СРЕДЕ ROS

Я.С. Ходаковский, Д.В. Бажутин
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В работе представлена методика моделирования процессов перемещения мобильных роботов и их ориентации в замкнутом пространстве в среде ROS. На примере мобильного робота с меканум-колесами описана процедура разработки виртуальной модели и приведена структура обмена данными в ней.

The article presents a simulation technique for the mobile robot motion and its orientation in a closed space using ROS environment. Assuming a mobile robot with mecanum wheels as an examplean approach to develop a virtual model and data exchange structure in it are described.

Ключевые слова: *мобильный робот, ROS, ориентация, моделирование, LiDAR.*

Keywords: *mobile robot, ROS, orientation, simulation, LiDAR.*

Robot Operating System (ROS) объединяет в себе множество инструментов, необходимых для комфортной и эффективной разработки робототехнических систем. ROS основан на архитектуре графов (создаются так называемые узлы, которые могут обмениваться сообщениями друг с другом) и обеспечивает такие функции, как аппаратная абстракция, управление пакетами и низкоуровневый контроль устройств.

Стоит отметить, что существует две версии ROS – более старая ROS1, и современная ROS2. С 2020 года выпуск новых версий ROS1 был прекращен. К основным преимуществам ROS2 относятся [1]:

1. Возможность устанавливать безопасные соединения между компонентами системы.
2. Взаимодействие осуществляется в режиме «real time».
3. Значительно упрощено соединение нескольких роботов в одну сеть.
4. Улучшено качество взаимодействия между нодами.
5. Возможность работы на операционных системах Windows и MacOS (стабильная работа ROS1 была возможна только на операционной системе Ubuntu).

Обе версии данной среды предоставляют широкие возможности разработки и моделирования процессов движения робототехнических устройств всех типов.

Целью данной работы является разработка виртуальной модели мобильного робота с системой автоматического управления движением и ориентации в пространстве посредством датчика LiDAR.

Рассмотрим процедуру разработки виртуальной модели мобильного робота с меканум-колесами. Основное преимущество подобного робота – возможность движения в любом направлении: вперед-назад, вправо-влево, по диагонали. Это достигается путем изменения направления и скорости вращения отдельных колес (рисунок 1).

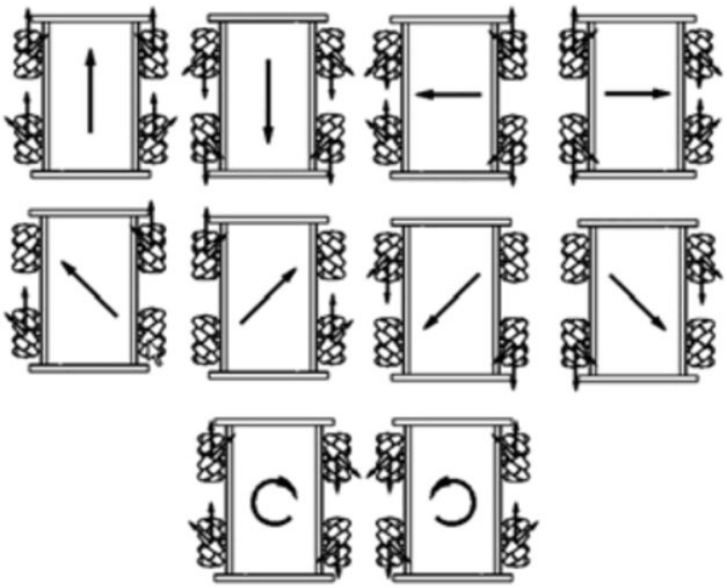


Рисунок 1 – Принцип работы колес Илона

Обычно, для упрощения моделирования в среде Gazebo, колеса робота представляются в виде простого цилиндра с инерцией и трением. Однако, такой подход отменяет возможность корректного моделирования принципов перемещения робота, использующего Mecanum колеса.

В первую очередь, необходимо создать 3-D модель роликов и диска для колеса. Затем, создаются файлы rollers.xacro и wheel.xacro для описания взаимодействия и положения каждого из роликов, а также инерции элементов. После этого, ролики и диски объединяются в один файл mecanum_wheel_macro.xacro.

Так как большинство сред визуализации и моделирования работают с описанием робота в формате URDF, необходимо создать

общий файл mecanum.urdf.xacro, в который, затем, будет добавляться графическое описание робота, а также макросы для работы с камерой, датчиком LiDAR, и библиотекой контроллеров управления колесами в среде Gazebo.

Для упрощения модели корпус робота представляется в виде параллелепипеда со сторонами 0.4, 0.24, 0.1. Для дальнейшего упрощения корректирования модели робота, рекомендуется записать каждый размер в виде констант в начале документа, в виде тэга <xacro:property />. К корпусу через узел типа «continuous» добавляются Mecanum колеса. Для того, чтобы датчик LiDAR находился выше колес робота и камера располагалась на нужной высоте, добавляется подставка. Финальный вид робота представлен на рисунке 2.

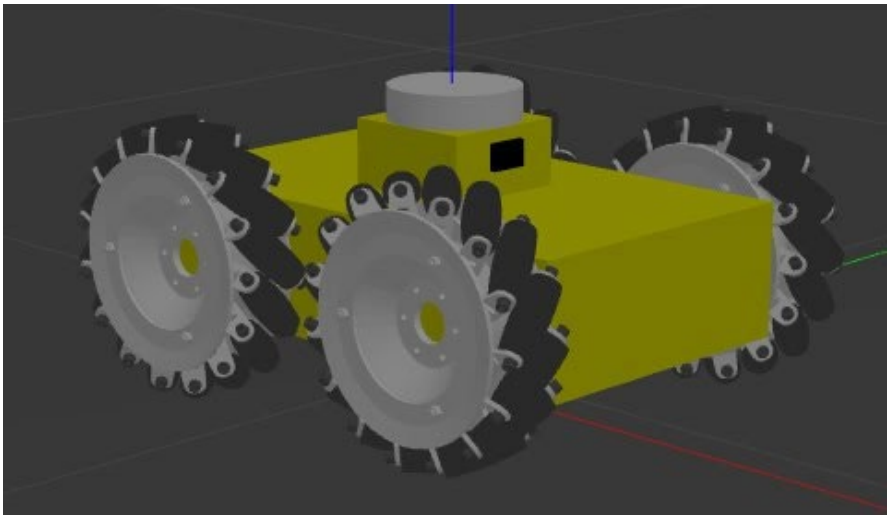


Рисунок 2 – Модель робота с колесами Mecanum

Для того, чтобы реализовать движение робота с использованием Mecanum колесах, необходимо подключить и настроить плагин gazebo_ros2_control [2]. В рассматриваемой системе необходимо прописать контроллер скорости для всех четырех колес, чтобы в дальнейшем, на основании расчетов, отправлять задание на скорость каждому по-отдельности.

Следующим шагом является создание файла параметров controller_ros2.yaml и указание типа контроллера – velocity_controller/JointGroupVelocityController (контроллер скорости) [3], а также узлов, через которые будет вестись управление. Для того, чтобы считывать положение каждого из узлов в текущий момент времени, дополнительно подключается контроллер joint_state_broadcaster.

Для добавления камеры и датчика LiDAR можно воспользоваться готовыми плагинами, предоставленными средой моделирования Gazebo. Для этого необходимо создать файлы camera.xacro [4], lidar.xacro [5], прописатьтег <gazebo reference />, тип сенсора в теге <sensor type />, а также тип плагина. Теперь робот оснащен камерой и датчиком, данные с которых можно отобразить с помощью пакета Rviz. Работа готовой модели, а также визуализация данных, полученных с сенсоров, показана на рисунке 3.

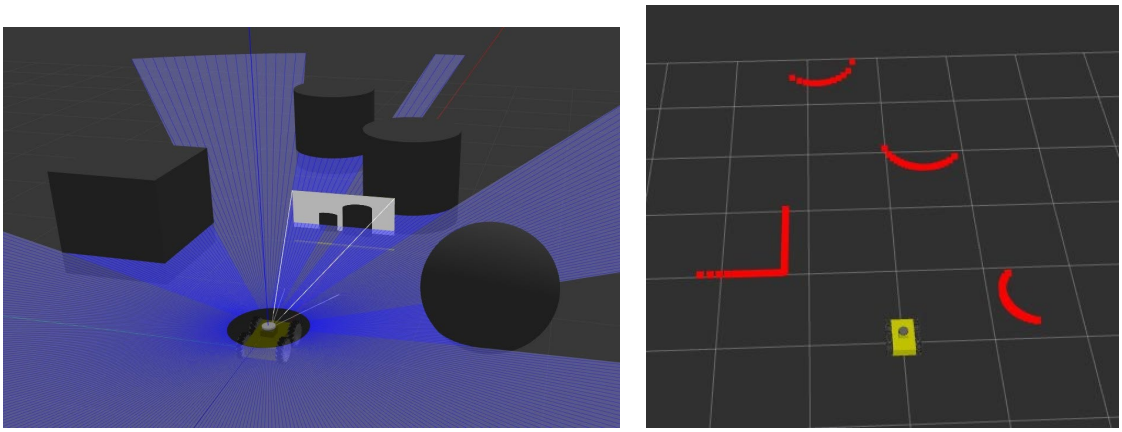


Рисунок 3 – Демонстрация работы датчиков

Для отработки движения роботом на Mecanum колесах необходимо создать узел, который будет принимать задание на движение и преобразовывать его в скорость каждого из колес [6].

Для этого создается python-файл, cont_mecanum.py, состоящий из одного подписчика, считывающего задание на движение из топика /cmd_vel, и четырех издателей – по одному на каждое колесо. Расчет скоростей производится по формуле (1) [7].

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(L_1+L_2) \\ 1 & -1 & (L_1+L_2) \\ 1 & -1 & -(L_1+L_2) \\ 1 & 1 & (L_1+L_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Задание же на движение будет отправляться в топик /cmd_vel через узел teleop_twist_keyboard, предоставляемый обучающим пакетом, входящим в состав ROS. В результате всех операций получим информационную структуру, схематическое изображение которой показано на рис.4.

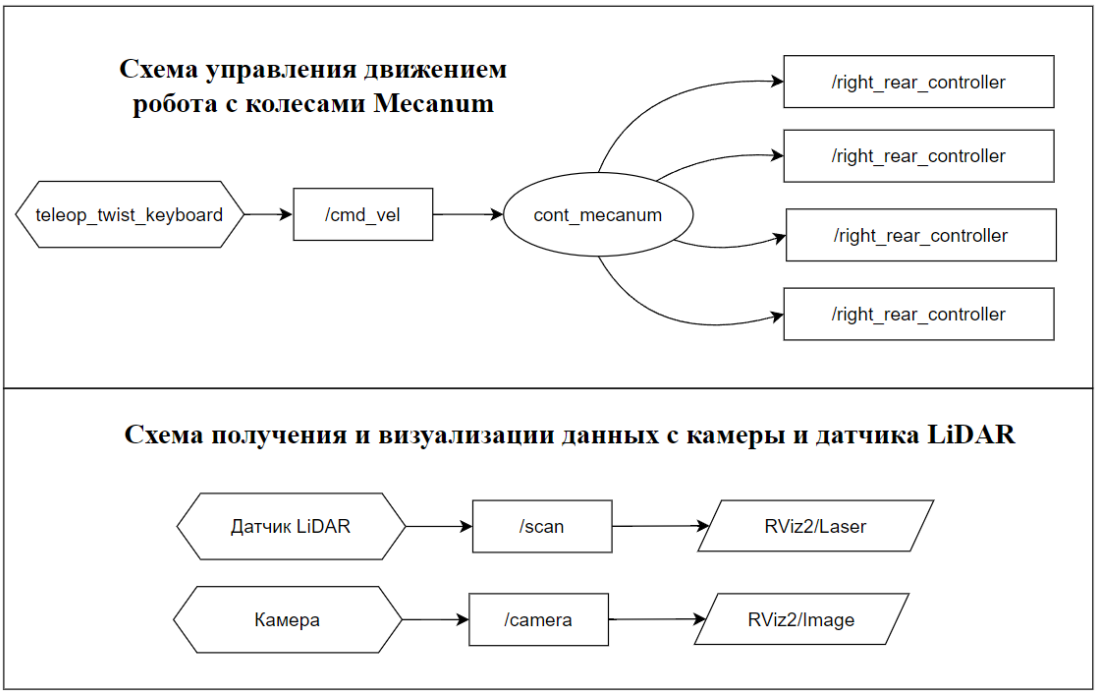


Рисунок 4 – Общая схема взаимодействия элементов системы

Данная структура позволяет проводить подробный анализ процесса перемещения робота и его ориентации в пространстве, предоставляя информацию о состоянии всех компонентов, данным датчика LiDAR и одометрии

Перечень ссылок

1. The Robotics Back-End [Электронный ресурс]: ROS1 vs ROS2, Practical Overview for ROS Developers. URL: https://roboticsbackend.com/ros1-vs-ros2-practical-overview/.
2. ros2_controll Documentation [Электронный ресурс]: gazebo_ros2_controll. URL: https://control.ros.org/master/doc/gazebo_ros2_control/doc/index.html.
3. Robots inside [Электронный ресурс]: Control joint using velocity command. URL: https://robobe.github.io/blog/ROS2/control2/tutorial/velocity/.
4. Articulated Robotics [Электронный ресурс]: Adding a Camera. URL: https://articulatedrobotics.xyz/tutorials/mobilerobot/hardware/camera/.
5. Articulated Robotics [Электронный ресурс]: Adding a LiDAR. URL: https://articulatedrobotics.xyz/tutorials/mobile-robot/hardware/lidar/.
6. The Robotics Back-End [Электронный ресурс]: Build a ROS2 Data Pipeline with ROS2 Topics. URL: https://roboticsbackend.com/build-a-ros2-data-pipeline-with-ros2-topics/.
7. Ван Юй. Исследование навигационной системы на базе колесного мобильного робота Mecanum [Текст] // Москва: Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet», №3/2022.

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ВЕНТИЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

А.А. Булгаков, А.С. Трегубенко, К.В. Молчанов
ФГБОУВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы расчета и нормирования показателей качества электроэнергии по несинусоидальности напряжения в сетях с вентильными преобразователями, отмечен основной нормативный документ в этой области. Показано воздействие несинусоидальности напряжения на различное оборудование в электрических системах. Разработан расчетный файл для исследования влияния несинусоидальности напряжения на дополнительные потери мощности и сокращение срока службы асинхронных двигателей и силовых трансформаторов в электрической системе.

The article considers the issues of calculation and standardization of power quality indices on voltage non-sinusoidality in networks with valve converters, the main normative document in this field is noted. The impact of voltage non-sinusoidality on various equipment in electrical systems is shown. A calculation file has been developed to study the effect of non-sinusoidal voltage on additional power losses and shortening the service life of asynchronous motors and power transformers in an electrical system.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, несинусоидальость, вентильные преобразователи, потери мощности.*

Keywords: *power quality, non-sinusoidality, valve converters, power losses.*

Постановка задачи. На сегодняшний день в электрических системах получили широкое распространение вентильные преобразователи, к преимуществам которых относят меньшие потерь энергии, меньшие габариты, простоту обслуживания. Применение вентильных преобразователей может существенно ухудшать качество напряжения сети, поэтому актуальной задачей является оценка воздействия несинусоидальности напряжения в электрических сетях с вентильными преобразователями.

Целью статьи является автоматизация расчетов для количественной оценки воздействия гармонических составляющих напряжения,

вызванных работой вентильных преобразователей, на отдельные элементы электрической сети: асинхронные двигатели (АД) и силовые трансформаторы.

Нормирование несинусоидальности напряжения. Несинусоидальность напряжения – это искажение синусоиды сетевого напряжения. Основной нормативный документ**,** регламентирующий нормы высших гармоник – это ГОСТ 32144-2013 [1]. Показателями качества электроэнергии [1], относящимися к гармоническим составляющим напряжения, являются: а) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$, %; б) суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U, %. Нормы K_U для сетей различных классов напряжения по вероятности времени 95% приведены в табл.1. Интервал изменения равен одной неделе, значения усредняются 10 минутном интервале. Согласно [1] норма для вероятности 100% времени в 1,5 раза превышает соответствующие нормируемые значения для вероятности 95%, а для сети номинальным напряжением 6-25 кВ она составляет 8%.

Таблица 1 – Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения

Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6-25	35	110-220
8,0	5,0	4,0	2,0

Порядок исследования. Воздействие несинусоидальности питающего напряжения на АД и силовые трансформаторы вызывают дополнительные потери активной мощности, дополнительный нагрев, что обуславливает сокращение срока службы этого оборудования [2-4]. На рис. 1 приведена структурная схема сети.

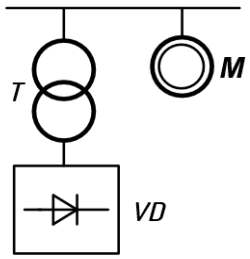


Рисунок 1 – Структурная схема

Расчеты и исследование проводится в несколько этапов:

– задание исходных параметров,

– расчёт коэффициентов гармонических составляющих напряжения для сети с вентильными преобразователями различной мощности,

– оценка соблюдения требований стандарта [1] по несинусоидальности напряжения,

– анализ влияния на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения мощности питающего трансформатора, мощности и типа вентильного преобразователя,

– оценка воздействия гармонических составляющих напряжения на отдельные элементы электрической системы (АД и силовые трансформаторы).

Автоматизацию расчетов удобно выполнять при помощи пакетов программ, например, Mathcad. Для количественной оценки воздействия несинусоидальности напряжения на АД и силовые трансформаторы был разработан и автоматизирован расчетный файл (программа). Математический аппарат, использованный для выполнения расчетов, приведен в [3-5]. В действующих электроустановках высоковольтные двигатели и силовые трансформаторы не всегда работают с номинальной загрузкой, что учтено в расчетах возможностью задания коэффициента загрузки.

Для выполнения расчета в качестве исходных данных задаются:

- Параметры системы (рис.2),
- Параметры вентильного преобразователя,
- Параметры силового трансформатора и АД.

Система

$S_{кзб} := 40$ МВА – мощность КЗ на шинах 6 кВ

Вентильный выпрямитель

$k_p := 0$ – коэффициент расщепления обмоток (для двухобмоточного трансформатора равен 0)

$\cos\phi := 0.9$ $\sin\phi := \sqrt{1 - \cos\phi^2} = 0.436$

$m := 6$ – число фаз преобразователя

$S_{пр} := 2$ МВА – мощность вентильного выпрямителя

Трансформатор ТМН 6300/10

$SномТ := 6.3$ МВА – мощность трансформатора

$U_{ном} := 6$ кВ – номинальное напряжение

$U_k := 6.5$ % – напряжение КЗ

Рисунок 2 – Задание исходных данных

Далее выполняем расчет гармонических составляющих напряжения в кВ и в %. Вначале определяем K_U (рис.3).

Сопротивление преобразователя

$$x_{пр} := \frac{U_k}{100} \cdot \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \cdot \frac{S_{пр}}{SномТ} = 0.02063$$

Сопротивление системы

$$x_c := \frac{S_{пр}}{S_{кзб}} = 0.05$$

Общий коэффициент несинусоидальности питающей сети при работе вентильных преобразователей

$$K_U := 100 \cdot x_c \cdot \sqrt{\left(\frac{0.955 \cdot \sin\phi}{x_c + x_{пр}}\right) - 0.91} = 11.162 \quad \%$$

Рисунок 3 – Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U.

При работе 6-фазного преобразователя в сети возникают 5я, 7я, 11я и 13я гармоники напряжения. Разработанный расчетный файл позволяет указать требуемые гармоники вручную, а также может выполнить расчет автоматически (рис.4).

Для заданных параметров схемы были рассчитаны значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40 го порядка $K_{U(n)}$ (рис.5). Величина K_U = 11,162% существенно превышает нормируемое значение в 5%. Коэффициенты по отдельным гармоническим составляющий напряжения также превышают нормируемые значения (рис.6). Таким образом, делаем вывод, что нормы [1] на несинусоидальность напряжения в данной сети не выполняются.

```
prog(m) := | for i ∈ 1..40
           |   | pr ← 0
           |   | for n ∈ 1..6
           |   |   | pr ← 1 if m·n − 1 = i
           |   |   | pr ← 1 if m·n + 1 = i
           |   | if pr = 1
           |   |   | Koef_i ← (m/(π·i))·U_ном·(x_c/(x_c + x_пр))·sinφ·sin(i·γ) if (m/(π·i))·U_ном·(x_c/(x_c + x_пр))·sinφ·sin(i·γ) > 0
           |   |   | Koef_i ← 0 otherwise
           |   | Koef_i ← 0 otherwise
           | Koef
```

Рисунок 4 – Фрагмент подпрограммы для автоматизации расчета коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$

После задания параметров АД и силового трансформатора можно оценить воздействие на них несинусоидальности напряжения, вызванной работой вентильного преобразователя. Дополнительные потери мощности рассчитаны при коэффициенте загрузки $K_з$ = 0,5. Для рассматриваемого примера они составили 0,44 кВт, что дает повышение температуры АД на 4,726 °С и обуславливает сокращение срока службы на 7 лет при номинальном сроке 15 лет.

Согласно расчетам, при той же несинусоидальности напряжения в сети дополнительные потери мощности трансформатора составили 0,213 кВт, прирост температуры 0,611 °С, что соответствует незначительному сокращению срока службы в 0,8 лет (рис.5).

Прирост температуры от токов высших гармоник

$$\Delta\tau := \tau_{норм} \cdot \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{ном}} = 4.726 \quad °C$$

Коэффициент снижения срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник

$$\Delta t_t := 0.086 \cdot \Delta\tau + \frac{(0.086 \cdot \Delta\tau)^2}{2} = 0.489$$

Снижение срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник

$$\Delta t := t_{норм} \cdot \Delta t_t = 7.336 \quad лет$$

а)

Прирост температуры от токов высших гармоник

$$\Delta\tau := \tau_{норм} \cdot \frac{\Delta P_{Tn}}{\Delta P_T} = 0.611 \quad °C$$

Коэффициент снижения срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник:

$$\Delta t_t := 0.086 \cdot \Delta\tau + \frac{(0.086 \cdot \Delta\tau)^2}{2} = 0.054$$

Снижение срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник:

$$\Delta t := t_{норм} \cdot \Delta t_t = 0.809 \quad года$$

б)

Рисунок 5 – Прирост температуры и сокращение срока службы от воздействия несинусоидальности: асинхронный двигатель (а) и силовой трансформатор (б).

Koef =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0.279
6	0
7	0.271
8	0
9	0
10	0
11	0.25
12	0
13	...

$n1 := 1..40$

$$Koef\% := \frac{Koef}{U_{ном}} \cdot 100$$

Koef% =

	0
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	4.645
6	0
7	4.523
8	0
9	0
10	0
11	4.167
12	0
13	...

Рисунок 6 – Фрагмент расчета коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$

Выводы

Разработан расчетный файл для исследования несинусоидальности напряжения, вызванной работой вентильного преобразователя в электрической сети. Программа позволяет автоматизировать расчет воздействия несинусоидальности напряжения и количественно оценить дополнительные потери активной мощности, превышение температуры нагрева и сокращение срока службы асинхронных двигателей и силовых трансформаторов различной мощности при заданном коэффициенте загрузки.

Перечень ссылок

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. с 01.07.2014.

2. Аррилага Д. Гармоники в электрических системах / Д. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 215 с.

3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 160 с.

4. Карташев, Илья Ильич. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения : Учеб. пособие по курсу "Упр. качеством электроэнергии" для студентов, обучающихся по специальности "Электроэнерг. системы и сети" / И.И. Карташев; М-во образования Рос. Федерации. Моск. энерг. ин-т (техн. ун-т). - Москва : Изд-во МЭИ, 2001. - 119, [1] с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 5-7046-0625-3.

5. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов; М. Энергоатомиздат, 1987. - 336 с. ил.

УДК 621.311

АНАЛИЗ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Д.В. Полковниченко, Д.В. Яковенко
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В работе проведен анализ цифровой подстанции. Обоснована целесообразность применения цифровых подстанций, выявлены основные преимущества и недостатки, рассмотрена архитектура построения.

The paper analyzes the digital substation. The expediency of using digital substations is substantiated, the main advantages and disadvantages are identified, and the architecture of construction is considered.

Ключевые слова: *цифровая подстанция, интеллектуальная электроэнергетическая система, релейная защита и автоматика, управление, автоматизация.*

Keywords: *digital substation, intelligent electric power system, relay protection and automation, control, automation.*

Цифровая подстанция (ЦПС) – «подстанция, оборудованная комплексом цифровых устройств (терминалов) для решения задач релейной защиты и автоматики (РЗА) и автоматизированной системы управления технологическими процессами – регистрации аварийных событий, учёта и контроля качества электроэнергии, телемеханики» [1].

ЦПС является важным элементом интеллектуальной электроэнергетической системы (ЭЭС) с высоким уровнем автоматизации и наличием информационных и управляющих систем, объединенных в одну сеть. Все процессы обмена информацией и управления работой отдельных элементов ЦПС производятся в цифровом виде на основе универсального стандарта МЭК-61850 «Сети и системы связи на подстанциях» [2], регламентирующий представление данных о подстанции (ПС), как объекте автоматизации, а также протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами (ИЭУ) ПС, включая устройства контроля и управления, РЗА, противоаварийной автоматики, счётчики электроэнергии и т.д.

Внедрение ЦПС началось с запуска в 2008 г. ПС TVA Bradley 500 кВ в США. Этот проект рассматривался как проверка на практике ре-

шений и совместимости компонентов от различных производителей с учетом требований стандарта МЭК 61850.

По результатам работы ЦПС были сделаны выводы о необходимости усовершенствования системы тестирования совместимости отдельных устройств. Оказалось, что хотя формально оборудование соответствовало стандарту МЭК 61850, на практике каждый производитель интерпретировал требования по-своему.

В 2009 г. была запущена ЦПС Alcalade Henares в Испании, при строительстве которой был учтен американский опыт. Особенностью этой ЦПС стало применение устройств сопряжения с коммутационными аппаратами, данные от которых передавались при помощи волоконно-оптической связи на коммутатор.

Далее на лидирующие позиции в мире вышел Китай, где в 2009 г. было введено в эксплуатацию 70 ЦПС, а к концу 2013 г. их количество достигло 893. Очень важным фактором при этом является то, что на введенных в эксплуатацию ЦПС применялась только продукция местных производителей [3].

В последние десятилетия в мире произошло существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления для применения на электрических ПС. Появились высоковольтные цифровые трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН); разрабатывается первичное и вторичное электросетевое оборудование со встроенными коммуникационными портами; производятся микропроцессорные контроллеры, оснащённые инструментальными средствами разработки, на базе которых возможно создание надёжного программно-аппаратного комплекса ПС.

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления ПС позволяет создать технологическую инфраструктуру для внедрения информационно-аналитических систем, снизить ошибки недоучёта электроэнергии, уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на обслуживание ПС, а также повысить электромагнитную безопасность и надёжность работы микропроцессорных устройств. Внедрение систем, удовлетворяющих стандарту МЭК 61850, обеспечивает более высокую скорость и безопасность передачи информации, взаимозаменяемость отдельных компонентов системы, повышение надёжности системы.

На рис. 1 приведена схема традиционной ПС с аналоговыми измерениями и передачей данных последовательными протоколами.

На рис. 2 приведена схема ЦПС с цифровизацией измерения 3-х фазных токов и напряжений, а также других источников данных от систем, датчиков и устройств на ПС.

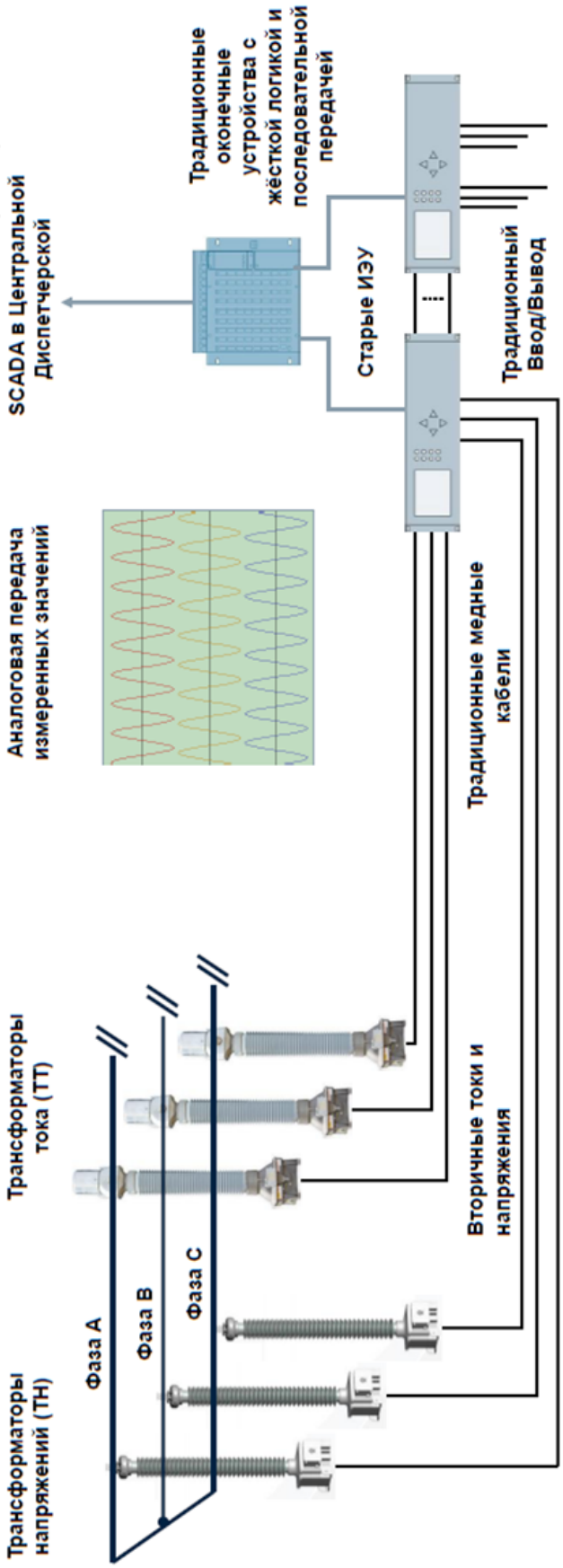


Рисунок 1 – Традиционная подстанция с аналоговыми измерениями и передачей данных последовательными протоколами

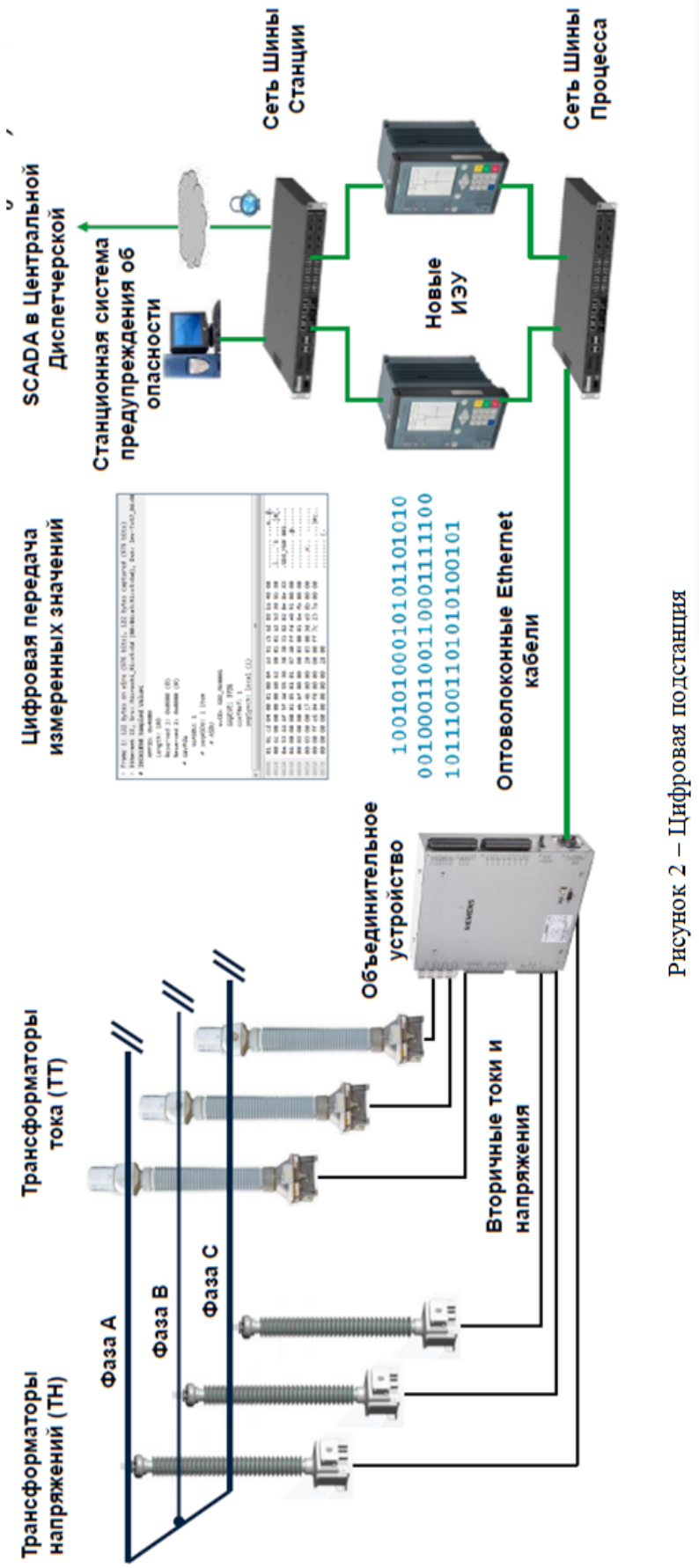


Рисунок 2 – Цифровая подстанция

Основными недостатками традиционной ПС являются использование старых технологий, аналоговых сигналов, медных кабелей, а также ограниченные возможности мониторинга.

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления ПС позволит получить целый ряд преимуществ, в том числе [4]:

1. Снижение капитальных затрат за счёт:

– уменьшения затрат на кабельную продукцию и кабельные сооружения;

– уменьшения стоимости терминалов (унификация аппаратной части, замена модулей ввода на цифровые интерфейсы);

– уменьшения площади земельных участков, необходимых для обустройства ПС (применение оптических цифровых ТТ и ТН, современного микропроцессорного вторичного оборудования);

– увеличения срока службы силового электрооборудования (расширенная диагностика);

– уменьшения затрат на проектирование, монтаж и пусконаладочные работы (уменьшение количества кабелей и оборудования, расширение возможностей по типизации проектных решений в части шкафного оборудования и цифровых связей).

2. Уменьшение эксплуатационных затрат (на техническое обслуживание) за счёт:

– упрощения эксплуатации и обслуживания (постоянная расширенная диагностика в режиме реального времени, в т.ч. метрологических характеристик; сбор и отображение исчерпывающей информации о состоянии и функционировании ПС);

– перехода к «необслуживаемым» ПС, т.е. к ПС без постоянного дежурства на них оперативного персонала, управляемым из удалённых центров управления (с помощью команд телеуправления);

– увеличения точности измерений (особенно при токах менее 10-15% от $I_{ном}$) и увеличения, благодаря этому, точности учёта электроэнергии и точности определения мест повреждений;

– сокращения возможности появления дефектов типа «земля в сети постоянного тока» (сокращение размерности систем оперативного постоянного тока, ввиду использования цифровых оптических связей);

– сокращения количества внезапных отказов основного электрооборудования и, связанных с ними, штрафов за недоотпуск электроэнергии и нарушений производственного цикла (расширенная диагностика всего комплекса технических средств ЦПС);

– уменьшения количества сбоев, неправильной работы, отказов

РЗА (применение оптических кабелей, вместо медных, повысит электромагнитную совместимость современного вторичного оборудования, микропроцессорных устройств РЗ и автоматики);

– повышения алгоритмической надёжности функционирования РЗА (отсутствие насыщения и возможность измерения апериодической составляющей у оптических цифровых ТТ позволит упростить и усовершенствовать алгоритмы РЗА);

– уменьшения потребления по цепям переменного тока и напряжения (в результате применения оптических ТТ и ТН).

В то же время, при реализации проектов ЦПС имеется ряд недостатков.

В настоящее время до конца не решены вопросы стандартизации таких ПС, ведь каждая крупная сетевая организация (не говоря о странах) имеет свое понимание подобных систем и свои особенности, касающиеся технологий, местных стандартов и систем распределения электроэнергии. А это накладывает ограничения на разработку и внедрение новых ЦПС, т.к. каждую из необходимо проектировать фактически с нуля.

Отмечается также повышенная сложность и новизна стандарта МЭК 61850. У разработчиков, интеграторов и обслуживающего персонала на ПС мало опыта построение подобных систем. Но очевидно, что этот недостаток исчезнет с течением времени.

В третьих, остаются нерешенными следующие вопросы:

– надежность ЦПС (в первую очередь, необходимость обеспечения кибербезопасности);

– конфигурирование устройств, как на уровне ПС, так и на уровне предприятия в целом;

– создание общедоступных инструментальных средств проектирования ЦПС на базе МЭК 61850, ориентированных на разных производителей первичного и вторичного оборудования.

ЦПС затрагивает все соответствующие компоненты и аспекты ПС:

– систему автоматизации ПС для контроля, защиты и наблюдения;

– связи внутри ПС и от ПС до удалённых центров управления сетью;

– первичное распределительное устройство (РУ) высокого напряжения в технологии с воздушной, газовой или гибридной изоляцией;

– ТТ, ТН: нестандартные измерительные трансформаторы, когда они интегрированы в основное оборудование, предлагают упрощение

проектирования. В качестве альтернативы, для модернизации существующие ТТ могут быть подключены к автономным сопрягающим устройствам, устройствам, которые соединяют аналоговые измерительные сигналы с технологической шиной;

– силовые трансформаторы;
– РУ среднего напряжения;
– инструменты для инженерии ПС;
– проверку и ввод в эксплуатацию;
– здание и участок ПС.

Структура ЦПС приведена на рис. 3.

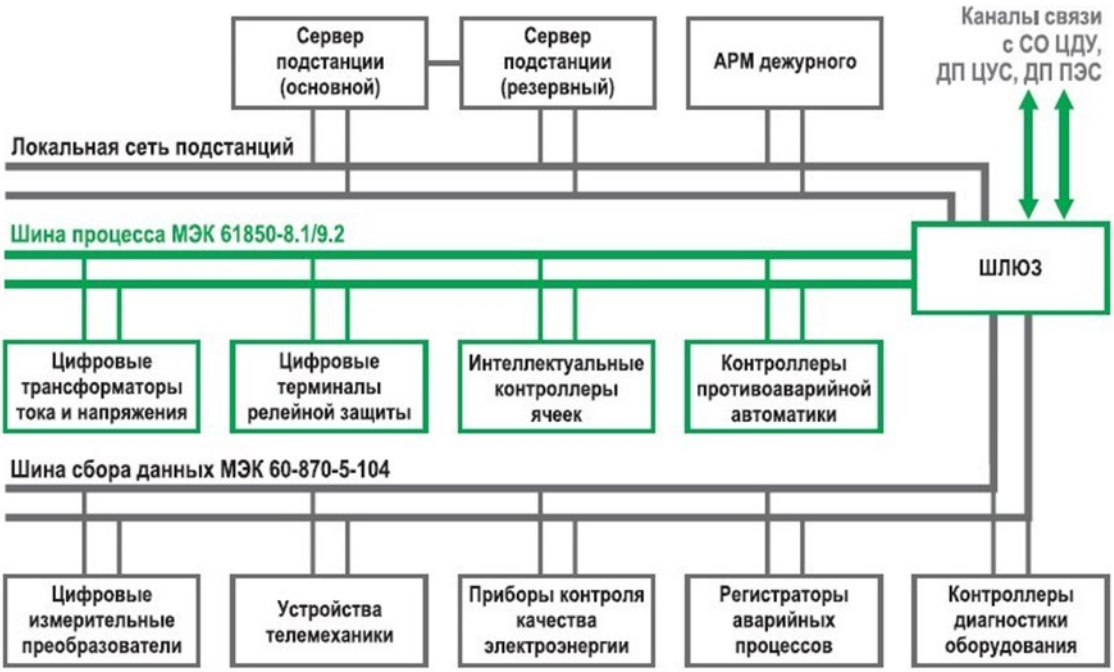


Рисунок 3 – Структура цифровой подстанции

Существует 3 иерархических уровня ЦПС [5].

1. *Уровень процесса.* Находится в нижней части иерархии. Он включает в себя все первичные устройства, такие как РУ высокого или среднего напряжения и трансформаторы. Он также содержит устройства интерфейса процесса, такие как модули объединения и блокирующие устройства (ИЭУ).

2. *Уровень присоединения.* Включает все контрольные и защитные средства управления. Электронное оборудование для контроля, защиты, связи и других функций, таких как мониторинг и диагностика, часто упоминается, как вторичное оборудование.

3. *Станционный уровень.* Включает в себя главным образом оборудование для управления и защиты станции, автоматизированные

рабочие места, регистраторы помех и способы передачи данных, например, в центр управления сетью. Другие важные функции, такие как питание вспомогательной станции, не упоминаются в явном виде.

В настоящее время существует система двухэтапной реализации ЦПС.

На первом этапе к имеющемуся на ПС оборудованию добавляется интерфейсный цифровой интеллектуальный модуль.

На втором этапе производится модернизация основного электрооборудования с интеграцией в него специализированных цифровых необслуживаемых датчиков, полевых контроллеров, твёрдотельных исполнительных модулей. Также выполняется расширение объёма задач, выполняемых интерфейсным модулем и доработка всех компонентов ЦПС с учётом опыта эксплуатации.

Выводы

Проведенный анализ показал, что широкое внедрение цифровых подстанций позволит повысить надежность электроснабжения потребителей и управляемость электрической сети, а также снизить затраты на производство и передачу электроэнергии.

Перечень ссылок

1. Лобур, И. А. К вопросу об автоматизации цифровой подстанции / И. А. Лобур, К. А. Назаров // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2022. – № 3. – С.16-22.

2. МЭК 61850-5:2003 «Сети и системы связи на подстанциях. Часть 5. Требования к связи для функций и моделей устройств (IEC 61850-5:2003 «Communication networks and systems in substations – Part 5: Communication requirements for functions and device models».

3. Ярошенко, А. Цифровые подстанции: выгоды и риски [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/7675/.

4. Жукова, Е. Цифровая подстанция – важный элемент интеллектуальной энергосистемы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ruscable.ru/article/Tsifrovaya_podstantsiya__vazhnyj_element_intellektualynoj_energosiste/.

5. Моржин, Ю. И. «Цифровая подстанция» – концепция, технология внедрения. Создание опытного полигона «Цифровая подстанция ЕНЭС» / Ю. И. Моржин, С. Г. Попов // Энергия единой сети. – 2012. – № 5(5) . – С. 4-19.

УДК 621.311

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТЯХ ГЕНЕРАЦИИ, ПЕРЕДАЧИ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Д.В. Полковниченко, В.И. Дробот
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В работе проведен анализ современных технологий в электроэнергетике в областях генерации, передачи, распределения и накопления электроэнергии. Эти технологии позволяют повысить надежность, эффективность, компактность и экологичность электрических сетей в рамках интеллектуальной электроэнергетической системы.

The paper analyzes modern technologies in the electric power industry in the fields of generation, transmission, distribution and accumulation of electricity. These technologies make it possible to increase the reliability, efficiency, compactness, and environmental friendliness of electric networks within the framework of an intelligent electric power system.

Ключевые слова: *интеллектуальная электроэнергетика, возобновляемые источники энергии, распределительное устройство, воздушная линия электропередачи, элегаз, накопитель энергии.*

Keywords: *intelligent electric power industry, renewable energy sources, switchgear, overhead power line, elegas, energy storage.*

В настоящее время сложно предсказать технический уровень электроэнергетики в конце XXI века, но уже сейчас известен ряд ключевых технологий в областях генерирования, передачи, распределения и накопления электроэнергии, которые будут оказывать заметное влияние на формирование будущего облика электроэнергетики.

Целью работы является анализ возможных направлений развития электроэнергетики в направлении генерации, передачи, распределения и накопления электроэнергии.

Генерация электроэнергии.

Одной из главных технологических задач для теплоэлектростанций является широкое внедрение экологически чистых угольных технологий и парогазовых комбинированных циклов. Возможности дальнейшего развития атомных электростанций зависят от успеха их эксплуатационной безопасности и обращения с отходами, а также от их

конкурентоспособности.

Реструктуризация и дерегулирование электроэнергетического сектора будут способствовать размещению генерации на региональном уровне (распределенная генерация, виртуальные электростанции). Распределенная генерация гарантирует производство электроэнергии в местах потребления, облегчает работу электрических сетей и снижает потери электроэнергии при транспортировке.

Существуют различные энерговозобновляемые технологии производства электроэнергии в коммерческих масштабах, мощностью от нескольких сотен кВт до нескольких МВт по цене 4-40 центов за кВт·ч. Европейский Союз ускоряет разработку возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Намечается, что их доля в выработке электроэнергии каждые последующие 10 лет будет увеличиваться примерно на 20%.

В настоящее время наиболее интенсивно развивается ветроэнергетика и солнечная энергетика.

По суммарной установленной мощности на конец 2020 г. пятёрка крупнейших рынков не изменилась: Китай, США, Германия, Индия и Испания. На эти государства в совокупности приходится 73% всех ветроэнергетических мощностей в мире. Всего в мире установлено почти 773,0 ГВт (95,5% из них на суше). В Китае показатель достиг 278,0 ГВт, в США – 122 ГВт [1].

В 2021 г. годовая выработка ВЭС выросла на 162,4%, до 3619,8 млн. кВт·ч; в декабре результат ВЭС оказался на 123,6% выше, чем годом ранее, увеличившись до 481,3 млн. кВт·ч [2].

Как удобный и надёжный источник электроэнергии для малых потребителей, разбросанных далеко от промышленных центров, зарекомендовала себя фотоэлектрическая технология. Преимуществом фотоэлектрических установок является то, что они модульного типа, бесшумные, простые в обслуживании и экологически чистые.

В течение 2021 г. в эксплуатацию введено 232,9 МВт (+13,5%) солнечной генерации (СЭС), суммарная мощность ЭС этого типа достигла 1960,6 МВт.

Выработка СЭС в 2021 г. составила 2254,5 млн. кВт·ч, что на 13,7% больше, чем в 2020 г. Прирост производства на СЭС фактически соответствует приросту их мощности (+13,5%).

По итогам 2021 г. доля ВИЭ в производстве энергии составила только 0,5%. Суммарная выработка «зелёной» генерации в ЕЭС за год выросла на 74,8% и достигла 5873 млн. кВт·ч [3].

Топливные элементы являются наиболее эффективным способом производства электроэнергии, особенно в транспортных средствах и

распределенной генерации, и рассматриваются как будущий источник чистой энергии. Топливные элементы используются для производства электроэнергии в основном посредством широкого спектра химических реакций, не требующих преобразования в механическую энергию. Электричество, вырабатываемое этими элементами, является более экологичным и эффективным средством производства электроэнергии. Топливные элементы в настоящее время рассчитаны на природный газ в качестве основного источника энергии, но в будущем использование топливных элементов будет связано с использованием водорода. В современных условиях топливные элементы остаются дорогостоящей заменой традиционных источников энергии.

Для распределённой генерации всё большее применение находят газовые микротурбины мощностью от 25 кВт до 500 кВт. Микротурбина работает с очень высокой частотой (1600 Гц) и требует силовых электронных устройств, чтобы иметь на выходе переменный ток промышленной частоты. Установка имеет малые размеры и вес (компрессор, турбина и генератор монтируются на общем валу), что даёт возможность устанавливать её практически в любом месте [4].

Одним из основных вариантов производства электроэнергии в отдаленном будущем является использование термоядерной энергии. Термоядерный синтез – очень привлекательный источник энергии, использующий неисчерпаемые запасы водорода. Производство энергии на основе термоядерного синтеза не связано с выбросами парниковых газов.

На рис.1 рассмотрена одна из предлагаемых концепций работы термоядерной электростанции, принципиальная схема устройства и принцип работы (без соблюдения масштаба).

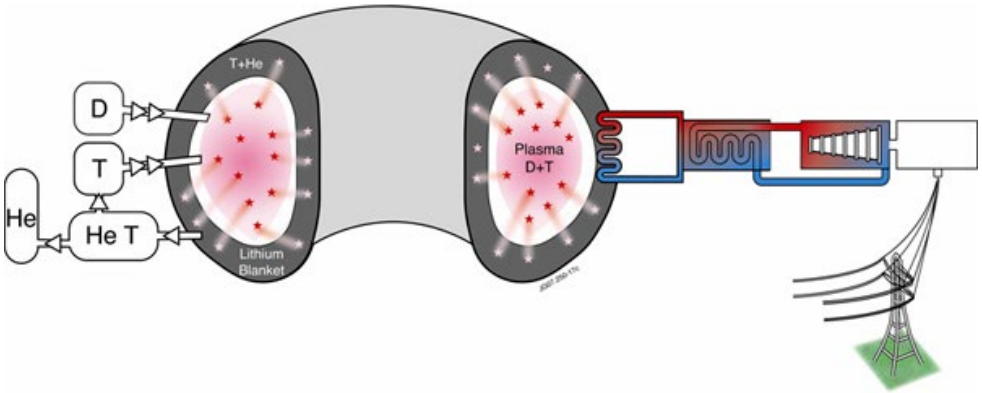


Рисунок 1 – Принципиальная схема устройства и принцип работы термоядерной электростанции

В центральной части располагается тороидальная (в форме буб-

лика) камера, объёмом ~2000 м^3, заполненная тритий-дейтериевой (T–D) плазмой, нагретой до температуры выше 100 М^{0}С. Образующиеся при реакции синтеза нейтроны, покидают «магнитную бутылку» и попадают, в показанную на рис.1 оболочку, с толщиной около 1 м.

Внутри оболочки нейтроны сталкиваются с атомами лития, в результате чего происходит реакция с образованием трития.

Кроме этого в системе происходят и конкурирующие реакции (без образования трития), а также много реакций с выделением дополнительных нейтронов, которые затем также приводят к образованию трития (при этом выделение дополнительных нейтронов может быть существенно усилено, например, за счёт введения в оболочку атомов бериллия и свинца). Общий вывод состоит в том, что в этой установке может (по крайней мере, теоретически) происходить реакция ядерного синтеза, при которой будет образовываться тритий. При этом количество образующегося трития должно не только обеспечивать потребности самой установки, но и быть даже несколько большим, что позволит обеспечивать тритием и новые установки.

Кроме этого нейтроны должны разогревать оболочку в, так называемых, пилотных установках (в которых будут использоваться относительно «обычные» конструкционные материалы) примерно до температуры 400^{0}С. В дальнейшем предполагается создать усовершенствованные установки с температурой нагрева оболочки выше 1000^{0}С, что может быть достигнуто за счёт использования новейших высокопрочных материалов (типа композитов из карбида кремния). Выделяющееся в оболочке тепло, как и в обычных станциях, отбирается первичным охлаждающим контуром с теплоносителем (содержащим, например, воду или гелий) и передаётся на вторичный контур, где и производится водяной пар, подающийся на турбины [5].

Передача и распределение электроэнергии.

Использование компактных элементов, распределительных устройств и подстанций, ЛЭП обеспечивает эффективное решение актуальной проблемы для территорий крупных городов, где стоимость земли возрастает многократно, возрастают требования к обеспечению надёжности, управляемости и автоматизации, а также более жёсткая экологическая политика. Компактность подстанционного оборудования можно обеспечить за счёт применения новых видов изоляции и оптимизации изоляционных промежутков, а также путём комбинации отдельных высоковольтных устройств в одном корпусе.

Наиболее известным техническим решением является применение комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ), поскольку электрическая прочность элегаза (S_6F) значи-

тельно превосходит электрическую прочность воздуха.

Современный уровень и технология изготовления КРУЭ позволяют с достаточной степенью надёжности производить КРУЭ в общем кожухе на три фазы, вплоть до напряжений 500 кВ, однако в настоящее время общепринято производство КРУЭ в общем кожухе до напряжений 170-220 кВ, что обеспечивает наиболее оптимальное построение подстанций.

Стремление к использованию КРУЭ объясняется следующими их достоинствами: компактностью (площадь, занимаемая КРУЭ, составляет несколько процентов от площади, требуемой для традиционных открытых распределительных устройств (ОРУ), а объём ячейки КРУЭ более чем в 100 раз меньше объёма ячейки ОРУ); высокой надёжностью и безопасностью в обслуживании; стойкостью к загрязнённой окружающей среде; возможностью установки в сейсмически активных и труднодоступных районах; простотой монтажа.

С целью дальнейшего увеличения компактности ОРУ, наблюдается тенденция к объединению в одном герметизированном отсеке разных аппаратов, например, выключателя с трансформаторами тока с разъединителями и заземлителями, так называемых комбинированных выключателей. Например, компания Siemens на напряжение 145-245 кВ предлагает гибридную концепцию 3AP1 DeadTankCompakt (DTC) – компактное устройство с применением компонентов с элегазовой изоляцией. DTC представляет собой конструкцию, объединяющую в себе баковый выключатель с одним или двумя трансформаторами тока, один или несколько разъединителей, заземлитель и вводы для присоединения к сборным шинам (рис.2).

Рисунок 2 – Устройство 3AP1 DeadTankCompakt (DTC)

Дальнейшее повышение компактности при одновременном ис-

ключении пожароопасности достигается путём применения силовых элегазовых трансформаторов, мощность которых достигла 300-400 МВ·А, а номинальное напряжение 330 кВ. В результате, в ряде стран в мегаполисах уже реализован ряд проектов полностью герметизированных и автоматизированных компактных подстанций 66-362 кВ с элегазовой изоляцией без обслуживания (рис.3). Поскольку эти ПС являются пожаробезопасными и располагаются под землёй, то обычно экономический эффект связан не только со значительным сокращением используемой земли, но и возможностью возведения над ПС многоэтажных зданий [6].

Рисунок 3 – Подстанция с элегазовыми трансформаторами

Воздушные линии (ВЛ) нового поколения (компактные линии и управляемые самокомпенсирующиеся (УСВЛ)), в сочетании с устройствами FACTS, по сравнению с ВЛ традиционной конструкции позволяют:

– увеличить пропускную способность;

– снизить суммарные затраты на 10-20% в расчёте на единицу передаваемой мощности;

– осуществлять принудительное перераспределение потоков активной и реактивной мощности;

– повысить эффективность использования устройств регулирования реактивной мощности;

– уменьшить суммарную мощность и стоимость устройств регулирования мощности и напряжения;

– снизить суммарные потери электроэнергии в электроэнергетической системе (ЭЭС);

– повысить механическую устойчивость ВЛ при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов;

– сократить в 1,5-2 раза площади земельных угодий, отчуждаемых под ВЛ при передаче одинаковой мощности;

– обеспечить управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях.

Для компактных ВЛ, в случае применения традиционной основной изоляции – воздуха, сокращение изоляционных расстояний и повышение компактности линий электропередачи достигается за счёт следующих технологий [7]:

– использования экранированных проводов и проводов с увеличенным диаметром;

– применения высокопрочных полимерных линейных изоляторов нового поколения;

– установки столбовых ограничителей перенапряжений;

– применения многогранных и конических металлических опор;

– использования изолированных проводов;

– оптимизации распределения электрического поля.

Использование экранированных проводов и проводов с увеличенным диаметром позволяет снизить рабочие напряжённости электрического поля, и, соответственно, уменьшить основные изоляционные промежутки. Типовое решение для компактной ВЛ представлено на рис.4.

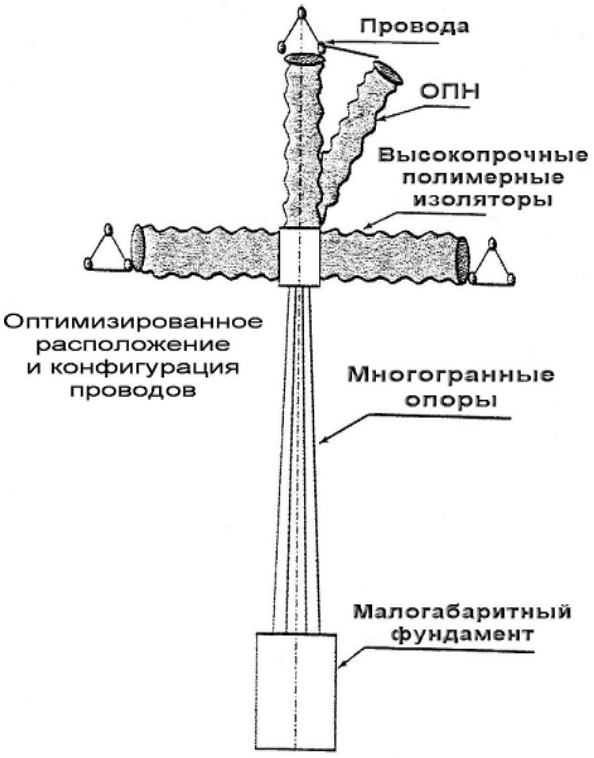


Рисунок 4 – Типовое решение для компактной ВЛ

Высокопрочные полимерные изоляторы дают возможность отказаться от традиционных траверс и значительно сократить габариты опор.

В районах с малой грозовой активностью или на участках с повышенной грозозащищённостью, эффективной является установка столбовых ограничителей перенапряжений и отказ от грозозащитных тросов.

Диаметр многогранных и конических опор значительно меньше, чем у традиционных решётчатых, что и обеспечивает дополнительный выигрыш в компактности опор.

Совокупность применения различных технологий позволяет почти вдвое сократить габариты опоры и, соответственно, полосы отчуждения.

Выбор расположения и конструкции фаз одноцепных и многоцепных ВЛ нового поколения обусловлен необходимостью улучшения электрических параметров линий, за счёт изменения параметров электромагнитного поля в междуфазном и окружающем линию пространстве. Усиление электромагнитного поля внутри линии за счёт сближения фаз позволяет увеличить пропускную способность и улучшить электрические и технические параметры ВЛ. Ослабление электромагнитного поля во внешнем пространстве приводит к улучшению экологических показателей ВЛ.

УСВЛ, кроме того, позволяют в процессе изменения величины передаваемой по линии мощности, осуществлять регулирование параметров электрического и магнитного поля фаз и цепей, благодаря чему обеспечивается управление эквивалентными параметрами ВЛ. Регулирование параметров ВЛ целесообразно осуществлять для обеспечения заданных режимов как линии, так и ЭЭС в целом. Применение фазоповоротных устройств на УСВЛ, совместно с другими устройствами FACTS, обеспечивает заданные параметры ВЛ, высокую управляемость электрических сетей, и позволяет достичь существенной экономии капитальных и эксплуатационных затрат по ЭЭС в целом, по сравнению с вариантами традиционных решений.

Повышение компактности электроэнергетических объектов возможно также путём замены ВЛ на кабели, вплоть до номинального напряжения 500 кВ в крупных городах, т.е. увеличения доли кабельных линий по отношению к ВЛ.

До последнего времени широко использовались кабели с бумажномасляной изоляцией, однако сейчас наиболее перспективными являются кабели с теплостойкой экструдированной изоляцией (сшитый

полиэтилен и этиленпропиленовая резина).

Переход от кабелей с бумажной пропитанной изоляцией к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена связан со следующими преимуществами последних: высокой пропускной способностью; низким весом, меньшим диаметром и радиусом изгиба; более высокой надёжностью; возможностью прокладки на сложных трассах; относительно низкой себестоимостью прокладки.

Применение данных кабелей, вместо других кабелей с полимерной изоляцией, позволяет увеличить длительно допустимую температуру нагрева жил кабелей при рабочем токе до 90^0С и до 250^0С – при токах КЗ.

В традиционных ЭЭС (электрическая часть ЭС, электрические сети, двигательная нагрузка) внедряются новые технологии, основанные на высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Эта технология используется при создании генераторов, трансформаторов, кабелей и проводов ВЛ, электродвигателей, накопителей энергии, токоограничивающих устройств. Это оборудование является высокоэкономичным, имеет меньшие габариты.

Так, например, концепция применения ВТСП-кабелей в электрических сетях исходит из того, что выполненные на основе ВТСП материалов кабели доказали свою техническую осуществимость на примерах их прототипов, опробованных в разных странах (США, Дания, Япония, Корея, Китай, Мексика). Эти прототипы имели длину от 30 до 600 метров, напряжение до 136 кВ, различную пропускную способность. Указанный выше опыт испытаний и использования ВТСП-кабелей, даёт основания для начала проведения широкомасштабных работ по применению сверхпроводящих кабелей в электрических сетях. Расчёты показывают, что использование сверхпроводящих кабелей переменного тока в электрических сетях целесообразно не только с технической, но и с экономической точки зрения.

Конструкция одной фазы ВТСП-кабеля переменного тока приведена на рис.5.

Использование ВТСП-кабелей позволяет примерно в 3-5 раз сократить площади земель, отчуждаемых для прокладки даже кабелей из сшитого полиэтилена. ВТСП-кабели – это ведущая технология создания компактных ЛЭП [6].

Другими многообещающими направлениями применения ВТСП-технологий являются сверхпроводящие ограничители тока и трансформаторы. Использование сверхпроводящих ограничителей тока в корне изменит подход к отключению токов КЗ, что особенно важно при создании электрических сетей нового типа. Одним из возможных

эффективных применений сверхпроводящих ограничителей тока является установка их между сборными шинами различных систем.

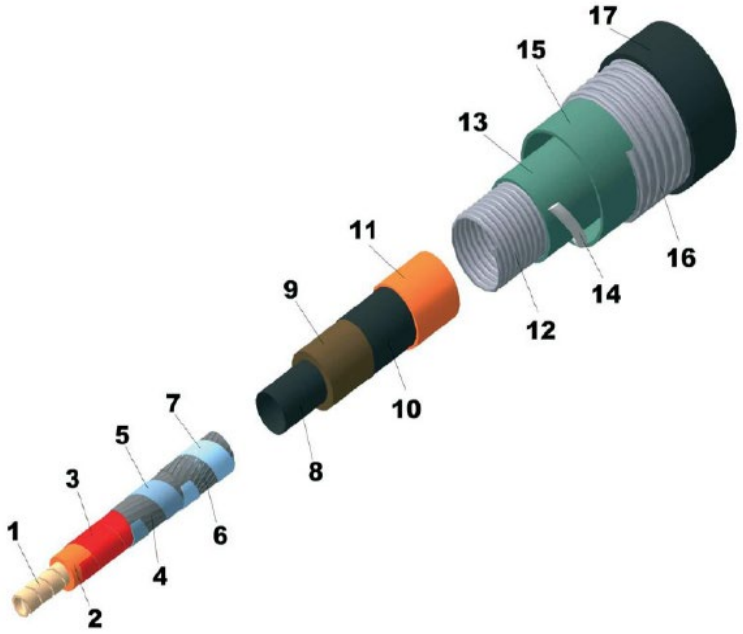


Рисунок 5 – Конструкция сверхпроводящего силового кабеля:
1, 2, 3 – центральный несущий элемент-формер; 4, 5, 6, 7 – сверхпроводящий токонесущий слой – два повива; 8, 9, 10 – изоляция; 11– экран; 12, 13, 14, 15, 16 – криостат: внутренняя гофрированная труба, тепловая изоляция, внешняя гофрированная труба; 17 – защитная оболочка

Возможный в будущем прорыв в области сверхпроводимости при комнатной температуре (в настоящее время сценарий маловероятен) позволит коренным образом изменить структуру энергосистемы.

К другим перспективным решениям можно отнести газоизолированные линии (ГИЛ), где воздух, элегаз или другой газообразный диэлектрик находится при избыточном давлении. Такие линии целесообразны в больших городах или на подходах к ним, а также для подстанционных связей. Относительная диэлектрическая проницаемость газа близка к единице – в результате погонная ёмкость примерно в 3-4 раза меньше, чем у обычных кабелей и, соответственно, значительно меньше и потери. Поэтому ГИЛ можно применять для передачи энергии на достаточно большие расстояния. ГИЛ, как правило, прокладываются в тоннелях. В настоящее время в мире реализовано более 500 проектов ГИЛ [8].

На рис.6 приведён проект туннеля общего назначения ЛЭП 1000 кВ с газовой изоляцией.

Рисунок 6 – Проект туннеля Suzhou-Nantong GIL utility tunnel (Китай)

Накопление электроэнергии.

Начавшиеся процессы реструктуризации и дерегуляции мировой электроэнергетики, в конечном итоге, приведут к рыночным отношениям в отрасли. Инфраструктура электроэнергетики зависит от решения ключевой проблемы электроэнергетики, каковой является накопление и длительное хранение энергии в требуемых для потребителей объёмах. Из-за необходимости одновременного производства и потребления электроэнергии, электроэнергетика будет оставаться в технологическом плане целостной структурой, требующей адекватной системы управления функционированием и развитием. С коммерческих позиций электроэнергетика будущего будет иметь горизонтально интегрированную структуру, которая в наибольшей степени отвечает рыночным отношениям.

Использование мощных ВЭС, подключённых к электрической сети, создаёт определённые проблемы в стабильном функционировании ЭЭС. Необходимо иметь достаточно значительные резервы мощности для замещения ВЭС, при снижении скоростного ветрового потока или при отсутствии ветра.

В случае решения проблемы консервации электроэнергии в значительных объёмах, с целью её дальнейшего использования, т.е. разделения во времени процессов генерации и потребления электроэнергии, это приведёт к существенному изменению структуры электроэнергетики.

Накопители электрической энергии являются важнейшим элементом Smart Grid, особенно при развитии малой и возобновляемой энергетики. Накопители энергии выполняют ряд функций: выравнивание графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной дешёвой энергии и выдача в сеть в периоды дефицита), обеспечение, в сочетании с устройствами FACTS,

повышения пределов устойчивости ЭЭС и нагрузки, обеспечение бесперебойного питания особо важных объектов, собственных нужд ЭС и ПС, демпфирование колебаний мощности, стабилизация работы малоинерционных децентрализованных источников электрической энергии [6].

Классификация систем накопления электроэнергии приведена на рис.7.

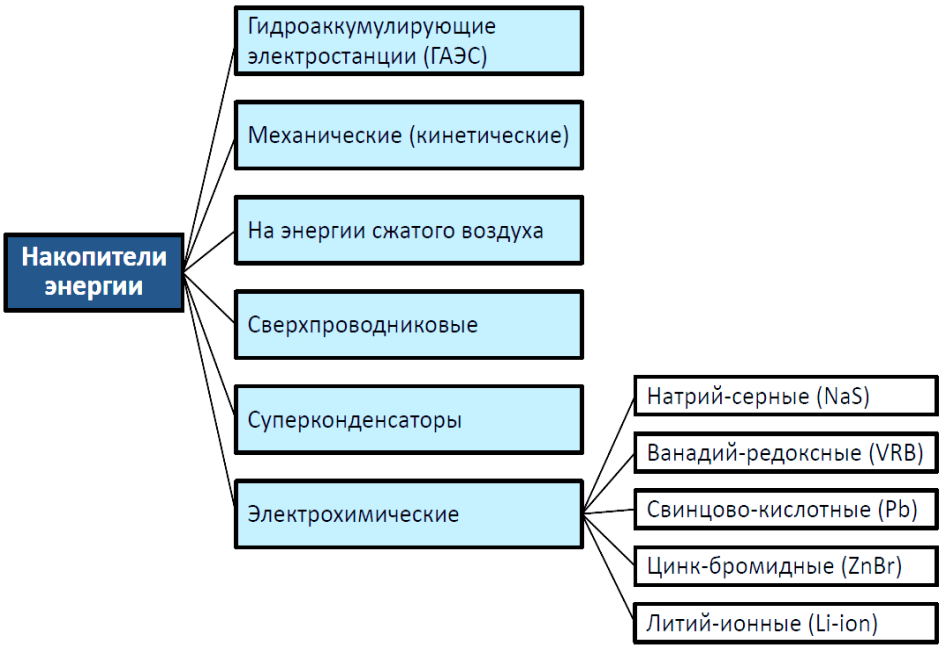


Рисунок 7 – Классификация систем накопления электроэнергии

Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИНЭ) – это одно из применений сверхпроводимости. Практическое применение в настоящее время нашли передвижные СПИНЭ, сравнительно небольшой энергоёмкости (до 10^6 Дж). Широкое применение СПИНЭ возможно после разработки и создания СПИНЭ на базе ВТСП.

В перспективе возможен сценарий, когда каждая электростанция, независимо от типа и мощности, превратится в предприятие по производству накопителей (носителей) электроэнергии. Потребители электроэнергии будут приобретать на рынке соответствующие их нуждам накопители и использовать их в автономном режиме. Переход к дезинтегрированной электроэнергетике даёт ряд неоспоримых преимуществ:

– системообразующие и распределительные сети, внутригородские сети становятся излишними;

– те потери, которые происходили в электрических сетях при пе-

редаче электроэнергии (примерно 15%), будут использоваться для производства накопителей;

– исчезнет проблема системных аварий;

– исчезнет потребность в использовании сложной и дорогостоящей системы управления функционированием и развитием на различных уровнях ЭЭС;

– упростится структура рынка электроэнергии из-за уменьшения субъектов (системный оператор, сетевые компании).

Выводы

Проведенный в работе анализ позволил выявить основные тенденции развития современной электроэнергетики:

– качественный и количественный рост ВИЭ;

– внедрение компактного оборудования подстанций;

– применение ЛЭП нового поколения;

– использование накопителей энергии;

– внедрение современных систем управления (например, устройства FACTS).

Перечень ссылок

1. Ветроэнергетическая отрасль мира: итоги 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.eprussia.ru/epr/412/8907416.htm.

2. Суммарная выработка ВИЭ в ЕЭС РФ в 2021г. выросла на 75% – до 5,9 млрд кВт·ч электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.bigpowernews.ru/markets/document101083.phtml.

3. Дегтярев, К. С. Проблемы и перспективы развития возобновляемой энергетики России в новых условиях / К. С. Дегтярев, Д. А. Соловьев // Энергетическая политика. – 2022. – № 6(172). – С. 68-69.

4. Климов, П. Л. Распределенная генерация на базе микротурбин. Определение термина, описание технологического процесса / П. Л. Климов, Е. А. Разумец // Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. В 2 ч. .Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2018. – С. 54-56.

5. Термоядерный реактор ITER [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://masterok.livejournal.com/207862.html.

6. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / Р. Н. Бердников, В. В. Бушуев, С. Н. Васильев и др.; под ред. акад. РАН В. Е. Фортова и А. А. Макарова. – М.: ФСК ЕЭС, 2012. – 236 с.

7. Холянов, В. С. Основы электроэнергетики : учеб. пособие / В. С. Холянов, О. М. Холянова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 113 с.

8. Вариводов В. Н. Особенности технической политики в электрических сетях мегаполисов / В. Н. Вариводов, А. М.Брянцев // Энергоэксперт. – 2007. – № 1. – С. 18-25.

УДК 621.313

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС ДОНБАССА

В.А. Павлюков, С.Н. Ткаченко
ФГБОУ ВО «Донецкий Национальный Технический Университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация
А.С. Хапченков
СП АО «Инфраструктурные проекты» - «Донецктеплоэлектропроект»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Работа посвящена анализу состояния и перспектив совершенствования релейной защиты собственных нужд энергоблоков тепловых электростанций Донбасса. В результате работы был выполнен анализ схемы электрических соединений и состава нагрузки системы собственных нужд энергоблока современной пылеугольной тепловой электростанции на примере Зуевской ТЭС. Выполнен поиск с учётом отечественного и мирового опыта и осуществлён анализ существующих решений в области релейной защиты и автоматики энергообъектов системы собственных нужд в результате которого установлено, что применяемые в настоящее время защитные алгоритмы способны некорректно функционировать в ряде анормальных и аварийных режимах работы, как например, несимметрия напряжения и др. Установлено, что для настройки параметров цифровой дистанционной защиты вводов собственных нужд требуется выполнять расчёты комплексных сопротивлений нагрузки секций в различных режимах работы электрических двигателей: коротких замыканий, пусков отдельных двигателей и самозапусков групп ответственных электродвигателей. Для решения такого рода задач была выполнена перестройка учебной САПР, разработанной на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ» в плане замены структуры расчётных схем систем собственных нужд. На основе выполненного анализа предложены пути модернизации алгоритмов резервных защит вводов собственных нужд, а также алгоритмов релейной защиты трансформаторов и электродвигателей собственных нужд.

The work is devoted to the analysis of the state and prospects for improving the relay protection of power unit's auxiliary of Donbass thermal power plants. As a result of the work, an analysis of the electrical

connection diagram and the composition of the power unit auxiliaries load of a modern pulverized coal thermal power plant was performed using the example of Zuyevskaya TPP. A search has been carrying out taking into account domestic and international experience and an analysis of existing solutions in the field of relay protection and automation of auxiliary's power facilities has been carrying out, as a result of which has been found that the currently used protective algorithms can function incorrectly in a number of abnormal and emergency conditions, such as voltage asymmetry, etc. It has been founding that in order to configure the parameters of digital distance protection of auxiliary's feeders, it has been necessary to perform calculations of the complex resistances of the section load in various electric motors conditions: short circuits, starts of individual motors and self-starts of critical electric motors groups. To solve such problems, the educational CAD-system has been developed at the Electric Power Plants Department of the DonNTU has been restructuring in terms of replacing the structure of calculation schemes for auxiliary systems. Based on the analysis performed, ways to modernize the algorithms for backup protection of auxiliary feeders, as well as the algorithms for relay protection of power transformers and electric motors of auxiliaries has been proposed.

Ключевые слова: *релейная защита, система собственных нужд, дистанционная защита, учебная САПР, электроэнергетические объекты, электродвигатель.*

Keywords: *relay protection, auxiliary system, distance protection, educational CAD, electric power facilities, electric motor.*

Постановка задачи. В настоящее время развитие энергетики неотрывно связано с развитием промышленности. В процессе роста мощности потребителей электроэнергии всегда существует смысл развивать электрогенерирующие комплексы, наиболее распространёнными в мире из которых являются тепловые электростанции, работающие на сжигании органического топлива – каменного и бурого угля, торфа, природного газа и мазута. Одним из путей развития систем генерации электрической и тепловой энергии является сооружение новых, а также реконструкция существующих и устаревших энергоблоков электрических станций (ЭС), в том числе ЭС Донбасса.

Основой непрерывной и надёжной работы любой тепловой электрической станции (ТЭС) является качественное функционирование системы собственных нужд (ССН),

представляющей собой сложную систему электроснабжения всех станционных потребителей, таких как высоковольтные и низковольтные асинхронные и синхронные электродвигатели переменного тока различного диапазона мощностей, понижающие силовые трансформаторы 6/0,4 кВ или 10/0,4 кВ [1-7].

Одним из способов повышения надёжности работы энергоблоков конденсационных ЭС является совершенствование, а также разработка новых алгоритмов микропроцессорных систем релейной защиты и противоаварийной автоматики энергообъектов ССН ТЭС. Поэтому задача выполнения анализа состояния и перспектив дальнейшего совершенствования релейной защиты собственных нужд энергоблоков ТЭС Донбасса является актуальной.

Изложение основного материала. В настоящее время в мире наряду с аналоговыми и микроэлектронными комплектами РЗиА применяются в основном цифровые терминалы, в которых запрограммирована стандартная защитная логика, рекомендуемая правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и международными стандартами института инженеров электротехники и электроники (ANSI/IEEE), без каких-либо существенных изменений [8]. В современных моделях терминалов РЗиА помимо стандартных защит существует возможность активации дополнительных, в основном резервных защит (тепловые защиты электродвигателей, основанные на различных псевдотепловых моделях, простейшие защиты от несимметричных режимов, как силовых трансформаторов, так и электродвигателей и др.).

Однако исходя из анализа статистики повреждений энергообъектов ССН и анализа научных публикаций [8] можно сделать вывод о том, что существующие системы РЗиА работают неэффективно или не работают вообще в ряде анормальных и аварийных режимах работы защищаемых объектов. Это касается как релейной защиты и автоматики присоединений с асинхронными и синхронными электродвигателями, резервной защиты вводов ССН, силовых трансформаторов собственных нужд 6/0,4 кВ и 10/0,4 кВ с сухой изоляцией или с изоляцией, выполненной с использованием негорючего жидкого диэлектрика, например, жидкого силикона и др. К таким режимам относятся: несимметрия питающего напряжения, появления обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных двигателей, появления обрыва стержней пусковой или демпферной обмотки явнополюсных синхронных двигателей, витковые замыкания между витками одной фазы, пожар в стали магнитопровода силовых трансформаторов с сухой изоляцией и

электродвигателей, появление однофазных и двойных замыканий на землю в сети собственных нужд энергоблоков ТЭС напряжением 6 или 10 кВ, работающих в режиме с изолированной нейтралью, и др. Также на чувствительность РЗиА энергообъектов ССН ЭС влияет точность расчёта уставок срабатывания.

В соответствии с противоаварийным циркуляром Ц-11-84(Э) [9] для повышения надёжности ССН ТЭС и АЭС необходимо было на всех электростанциях стран постсоветского пространства провести в течение одного квартала проверки чувствительности защит вводов питания распределительного устройства собственных нужд (РУСН) 6 кВ при КЗ на шинах и в конце кабельных линий 6 кВ, а также основных защит всех присоединений собственных нужд (с.н.) 0,4 кВ.

На Зуевской ТЭС или ЗуТЭС эта проверка была выполнена и менее чувствительные комбинированные максимальные токовые защиты (МТЗ) с пуском по напряжению вводов питания секций напряжением 6 кВ в конце 90-ых были заменены на более чувствительные дистанционные защиты. Их дистанционные реле в комплекте отечественных блок-реле полного минимального сопротивления КРС-2 в соответствии с [9] были использованы с характеристикой срабатывания в виде окружности с центром в начале координат комплексной плоскости сопротивлений.

Кроме того данная защита на ЗуТЭС была дополнена уникальной, не предусмотренной указанным циркуляром или каким либо другим директивным документом токовой блокировкой, включающей в работу рассматриваемую дистанционную защиту лишь при токах более 4680 А, соответствующих пусковому току самого мощного присоединения: пускорезервного питательного насоса (ПРПЭН) типа АВ-8000/6000 с номинальными мощностью 8000 кВт, током статора 875 А и кратностью его пускового значения 5,4. Блокировка, таким образом, отстраивала дистанционную защиту от излишних запусков её пусковых органов.

В настоящее время в связи с повсеместным применением для РЗиА микропроцессорных терминалов производства ООО «НПП «ЭКРА», например, разработаны более совершенные дистанционные защиты вводов питания секций собственных нужд электростанций с полигональными характеристиками срабатывания [10]. Как следует из [10] для настройки параметров этих характеристик требуется в отличие от ранее существующих защит выполнять расчеты комплексных сопротивлений нагрузки секций в различных режимах работы электрических двигателей: КЗ, пусков отдельных двигателей и

самозапусков групп ответственных электродвигателей приводов механизмов ССН.

Для решения такого рода задач потребовалась перестройка учебной САПР или УСАПР в плане замены структуры расчётных схем ССН. Ранее применяемые в [11] расчётные схемы со скрытой в дополнительном информационном сопровождении в символьном виде Excel-файлов информацией о присоединениях секций с.н. была заменена на более наглядную и доступную пользователю графическую её визуализацию. Это потребовало разделения применяемых ранее общих расчётных схем главных схем электрических соединений ТЭС на две отдельные группы: схемы выдачи мощности и схемы рабочего и резервного питания ССН. В качестве примера такого рода перехода на рисунках 1, 2 и 3 приведены соответственно ранее применяемая общая схема ЗуТЭС, и новые ее схемы выдачи мощности и системы с.н. напряжением 6 кВ.

На рисунке 1 приведена общая расчётная схема главных электрических соединений ССН ЗуТЭС, а на рисунке 2 – расчётная схема выдачи мощности Зуевской ТЭС, реализованная в УСАПР, разработанной на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

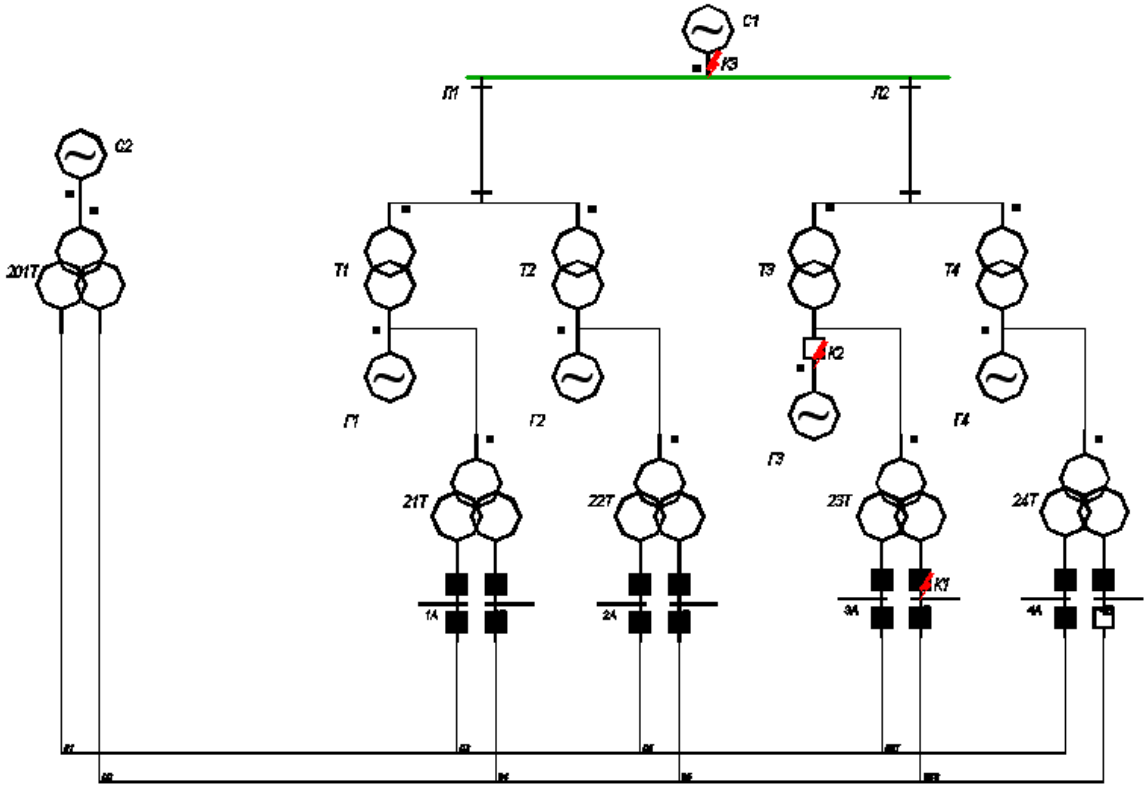


Рисунок 1 – Общая расчетная схема главных электрических соединений системы собственных нужд ЗуТЭС

Выполненные по расчётной схеме ССН (см. рис. 3) расчёты режимов КЗ, пусков и самозапусков электродвигателей секции 3А в качестве примера показаны на рисунке 4. Как видно из рисунка, при установленной уставке срабатывания дистанционной защиты 0,27 Ом она должна сработать при КЗ на секции, всех мощных присоединениях, а также на маломощных присоединениях с длиной кабельной линии сечением 95 мм^2 длиной менее 500 м. К числу таких присоединений относятся некоторые понижающие трансформаторы собственных нужд ТЭС напряжением 6/0,4 кВ для питания общестанционных нагрузок.

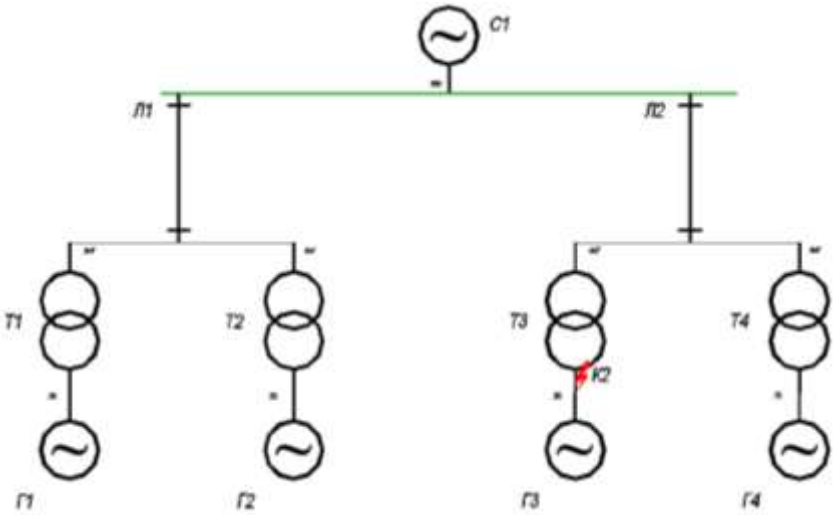


Рисунок 2 – Расчётная схема выдачи мощности ЗуТЭС

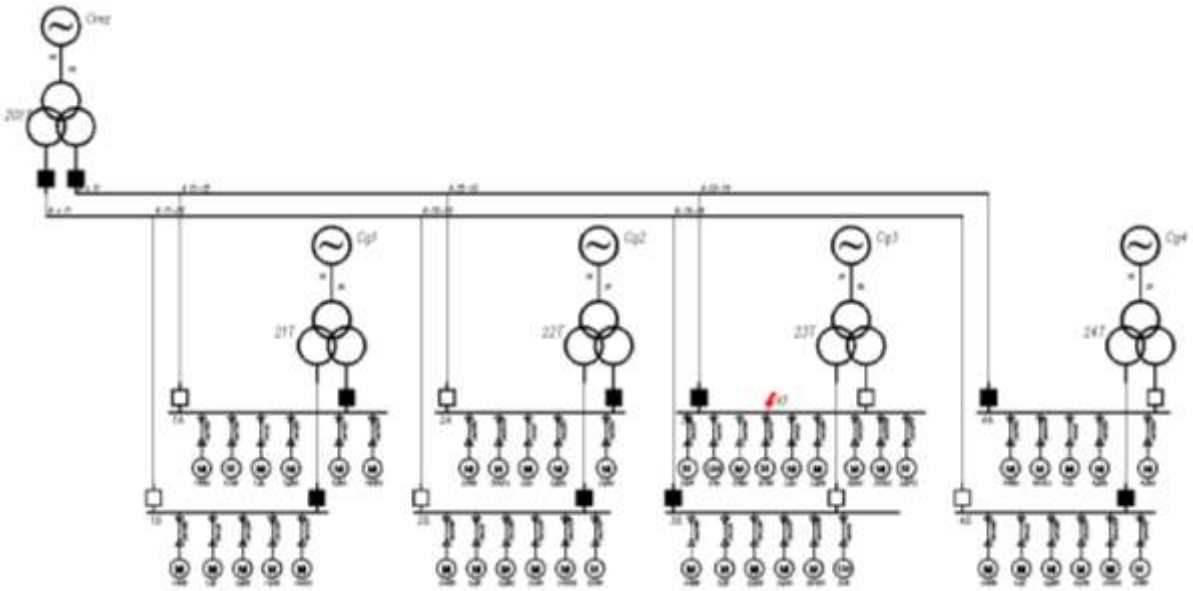


Рисунок 3 – Расчётная схема системы собственных нужд напряжением 6 кВ ЗуТЭС

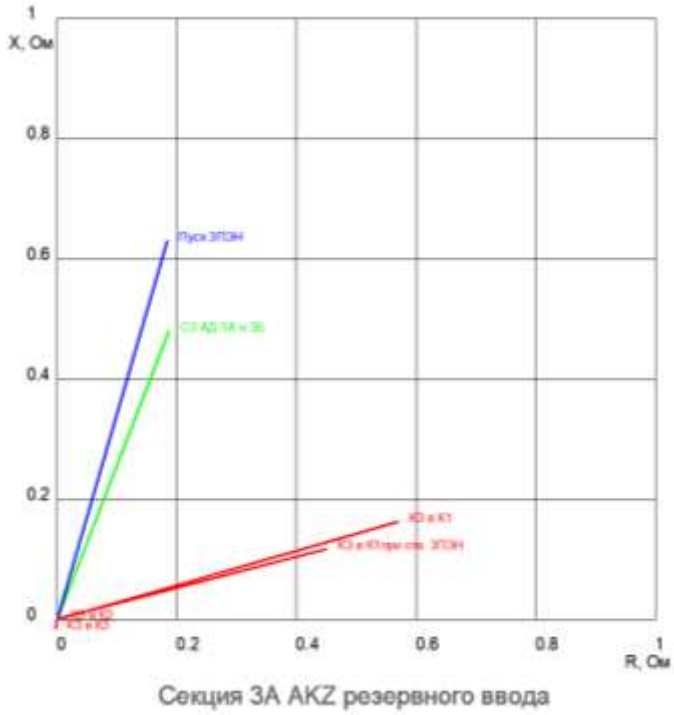


Рисунок 4 – Машинные результаты расчета токов КЗ, пуска ПРПЭН и режима самозапуска электродвигателей секции 3А

Также анализируя с учётом отечественного и мирового опыта существующих решений в области релейной защиты и автоматики энергообъектов системы собственных нужд, установлено, что применяемые в настоящее время защитные алгоритмы способны некорректно функционировать в ряде анормальных и аварийных режимах работы, как например, несимметрия напряжения, нарушение системы охлаждения электрических машин и др. Поэтому исходя из [8], [12] можно выделить следующие пути совершенствования цифровой релейной защиты и автоматики системы собственных нужд тепловых электростанций:

– модернизация алгоритма цифровой резервной дистанционной защиты вводов собственных нужд путём введения высокоточной отстройки от ложного срабатывания в режимах самозапуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором – электроприводных машин ответственных механизмов;

– разработка защиты от несимметричных режимов работы присоединения «силовой кабель-синхронный явнополюсный электродвигатель» шаровой барабанной мельницы;

– разработка защиты от перегрузки на основе контроля энергии электрических потерь мощности по данным измерения параметров текущего режима силовых понижающих трансформаторов собственных нужд 6/0,4 кВ или 10/0,4 кВ с сухой изоляцией;

– усовершенствование алгоритма идентификации наличия обрыва стержней обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя в темпе процесса;

– усовершенствование алгоритма цифровой защиты от перегрузки асинхронных и синхронных двигателей собственных нужд электростанций на основе контроля энергии потерь по данным измерения параметров текущего режима;

– разработка рекомендаций касательно повышения чувствительности релейной защиты присоединений, наиболее удалённых от источника питания.

Выводы

1. На основе выполненного анализа статистики повреждений энергообъектов системы собственных нужд электростанций и анализа научных публикаций установлено, что существующие системы релейной защиты и автоматики работают неэффективно или не работают вообще в ряде анормальных и аварийных режимах работы защищаемых объектов, как например несимметрия напряжения;

2. Установлено, что для настройки параметров цифровой дистанционной защиты вводов собственных нужд требуется выполнять расчёты комплексных сопротивлений нагрузки секций в различных режимах работы электрических двигателей: КЗ, пусков отдельных двигателей и самозапусков групп ответственных электродвигателей приводов механизмов ССН. Для решения такого рода задач была выполнена перестройка учебной САПР, разработанной на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ» в плане замены структуры расчётных схем систем собственных нужд;

3. На основе выполненного анализа предложены пути совершенствования цифровой релейной защиты и автоматики системы собственных нужд тепловых электростанций, заключающиеся в модернизации алгоритма цифровой резервной дистанционной защиты вводов собственных нужд путём введения высокоточной отстройки от ложного срабатывания в режимах самозапуска электродвигателей, в разработке защиты от несимметричных режимов работы присоединения «силовой кабель-синхронный явнополюсный электродвигатель» шаровой барабанной мельницы, в разработке защиты от перегрузки на основе контроля энергии электрических потерь мощности по данным измерения параметров текущего режима силовых понижающих трансформаторов собственных нужд 6/0,4 кВ или 10/0,4 кВ с сухой изоляцией, в усовершенствовании алгоритма идентификации наличия обрыва стержней обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя в темпе процесса, в усовершенствовании алгоритма цифровой защиты от перегрузки асинхронных и синхронных двигателей собственных нужд электростанций на основе контроля энергии потерь по данным измерения параметров текущего режима, в разработке рекомендаций касательно повышения чувствительности релейной защиты присоединений, наиболее удалённых от источника питания.

Перечень ссылок

1. Аббасова, Э. М. Собственные нужды тепловых электростанций / Ю.М. Голоднов, В.А. Зильберман, А.Г. Мурзаков: под ред. Ю.М. Голоднова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.

2. Сивокобыленко, В. Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций [Уч. Пособие] / В. К. Лебедев – Донецк, ДонНТУ, 2002. – 136 с.

3. Курбангалиев У. К. Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций / У. К. Курбангалиев – М.: Энергоиздат, 1982. – 56 с. ил.– (Б-ка электромонтера; Вып. 536).

4. Байтер, И. И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд / Байтер И. И. – [2-е изд.]. – М. Энергия. 1980. – 104 с. – (Б-ка электромонтёра, вып. 502.).

5. Байтер, И. И. Релейная защита и автоматика питающих элементов собственных нужд тепловых электростанций / И. И. Байтер, Н. А. Богданова – [3-е изд.]. – М. Энергоатомиздат. 1989. – 112 с. – (Б-ка электромонтёра, вып. 613.).

6. Козлов, А.Н. Собственные нужды тепловых, атомных и гидравлических станций и подстанций: учебное пособие / А. Н. Козлов, В. А. Козлов, А. Г. Ротачёва [Изд. 2-е, испр. и доп.]. – Благовещенск, Изд-во АмГУ, 2013. – 315 с.

7. Зилъберман, В. А. Релейная защита сети собственных нужд атомных электростанций / В. А. Зилъберман – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 128 с.: ил. - (Б-ка электромонтера, Вып. 642).

8. Сивокобыленко, В. Ф. Совершенствование систем диагностики и релейной защиты электрооборудования собственных нужд электростанций на основе информационных технологий / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Электрические станции. – 2016. – № 8(1021). – С. 46-52.

9. Противоаварийный циркуляр №Ц-11-84 Главтехуправления Минэнерго СССР от 11.11.84 г. О повышении надежности собственных нужд 6 и 0,4 кВ энергоблоков. – М.: б. и., 1984. – 12 с.

10. Вишневская, Е. В. Совершенствование резервной защиты кабельных линий собственных нужд электростанций / Е. В. Вишневская, Д. П. Журавлев // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 2(11). – С. 30-33.

11. Павлюков, В. А. Учебная САПР схем первичных электрических соединений станций и подстанций: учеб. Пособие / В. А. Павлюков, С. Н. Ткаченко – Донецк: Издательство ООО «НПП «Фолиант», 2021. – 264 с.

12. Маткин, П. А. Надежность двигателей собственных нужд электростанций / П. А. Маткин // Сборник материалов VIII Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая», Кемерово, 19-22 апреля 2016 года / Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева; Ответственный редактор О. В. Тайлаков. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва, 2016. – С. 336.

УДК 372.862

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА, МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

В.Ю. Мариничев, О.В. Вапирова, Д.В. Бажутин
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

В статье приведен сравнительный анализ функциональных возможностей отечественных инженерных программных пакетов с точки зрения возможности их использования в образовательном процессе в области автоматизированного электропривода, мехатроники и робототехники. Приведены ключевые особенности и наиболее значимые с учетом требований учебных планов функций программных пакетов SimInTech и Engee.

The article presents a comparative analysis of functional capabilities and features of domestic engineering software packages from the standpoint of their use in educational process in the field of automated electric drive, robotics and mechatronics. The key features and the most important functions of Engee and SimInTech software packages considering the educational plans requirements are presented.

Ключевые слова: *автоматизированный электропривод, компьютерное моделирование, генерирование программного кода, Engee, SimInTech.*

Keywords: *automated electric drive, computer simulation, executable code generation, Engee, SimInTech.*

В современном мире, где компьютерные технологии проникают во все сферы нашей жизни, использование специализированных программных пакетов становится неотъемлемой частью работы многих профессионалов. Соответственно, процесс подготовки высококвалифицированных инженерных кадров должен включать в себя приобретение навыков работы с подобными пакетами.

В настоящее время в мировой практике лидирующую позицию занимает среда разработки Matlab компании MathWorks. Этот программный продукт содержит большое количество библиотек, в том числе, созданных пользователями, что позволяет удовлетворить

потребности образовательного процесса по разнообразным профилям подготовки – от экономики от систем искусственного интеллекта и физики наночастиц [1]. Однако компания-разработчик данного программного пакета подчиняется требованиям законодательства США, в результате чего может отказывать в обслуживании клиентов, находящихся территориально в странах, попавших в санкционный список. В частности, после начала СВО имелись случаю дистанционного аннулирования лицензии у российских пользователей. Кроме того, приобретение лицензионных копий данного продукта в нынешних условиях затруднительно, поэтому возникает необходимость поиска альтернативных решений среди отечественного программного обеспечения.

Целью данной статьи является анализ возможности использования отечественных инженерных программных пакетов в образовательном процессе в области автоматизированного электропривода, мехатроники и робототехники на примере SimInTech и Engee.

К профессиональным навыкам инженеров в перечисленных отраслях науки и техники, в формировании которых ключевую роль играет специализированное программное обеспечение, относятся [2]:

1) умение разрабатывать компьютерные модели для исследования физических процессов;

2) умение проводить анализ свойств объектов управления и синтез систем автоматического регулирования, обеспечивающих соблюдение требуемых качеств переходных процессов;

3) умение реализовывать обмен данными между программным обеспечением и микроконтроллером для отладки алгоритмов управления на реальном оборудовании;

4) умение планировать эксперимент и анализировать полученные результаты;

5) умение представлять результаты эксперимента в доступном для понимания виде.

Исходя из этих навыков можно сформулировать следующие требования к программным пакетам, обеспечивающие их максимально эффективное использование в образовательном процессе:

1) функциональный и достаточно простой для восприятия алгоритмический язык программирования, позволяющий автоматизировать процесс синтеза и анализа исследуемых объектов и систем;

2) наличие библиотек графического и имитационного моделирования элементов электромеханических, робототехнических и мехатронных систем, позволяющих отразить физические их физические свойства с нужной степенью точности;

3) поддержка обмена данными и генерирования программного кода для внешних устройств;

4) наличие разнообразных средств графического представления численных результатов.

Первым из программных пакетов, которые будут рассмотрены в рамках данной статьи, является SciLab, который неофициально в различных источниках позиционируется как «бесплатная альтернатива Matlab» [3]. Он является открытым программным обеспечением с бесплатной лицензией, что делает его доступным для всех желающих. SciLab предоставляет широкий набор математических функций и инструментов для работы с данными, включая статистический анализ, численное решение дифференциальных уравнений и построение графиков. Также в его состав входит библиотека моделей и алгоритмов, которые могут быть использованы для решения различных задач. SciLab также является мощным математическим пакетом, предназначенным для анализа данных и численных вычислений, имеет большие функциональные возможности для решения системы уравнений, оптимизации, интерполяции, аппроксимации, численного интегрирования и многих других задач. Он обладает широким спектром возможностей, включая работу с матрицами, графиками и статистическим анализом данных. Благодаря своей открытой структуре и бесплатной лицензии, SciLab позволяет эффективно решать различные задачи и находить новые решения.

Недостатком данного программного пакета является его же открытая структура, поскольку некоммерческие продукты поддерживаются исключительно благодаря энтузиазму разработчиков и пользователей. С учетом того, что данный программный продукт был выкуплен компанией Dassault Systèmes, можно ожидать ограничений открытой модели в будущем, а также ограничений в предоставлении технической поддержки пользователям из отдельных стран.

Наибольший интерес с точки зрения отсутствия ограничений в доступе представляют разработки российских компаний: SimInTech и Engee.

SimInTech - это один из самых популярных пакетов для моделирования и анализа физических процессов. Он предоставляет

широкий набор инструментов и функций, которые позволяют создавать сложные математические модели, проводить различные эксперименты и анализировать полученные результаты. Программный интерфейс SimInTech обладает высокой гибкостью и удобством использования, что делает его доступным даже для начинающих пользователей [4].

SimInTech позволяет создавать высокоуровневые модели систем, такие как электромеханические системы, автоматизированные производственные линии и другие. Он обладает интуитивным интерфейсом и богатым набором функций, позволяющих эффективно проводить исследования и оптимизации систем. Можно использовать пакет SimInTech и для моделирования и анализа систем линейных уравнений. С помощью SimInTech можно создать модель, которая представляет систему линейных уравнений, и проводить различные анализы, такие как определение собственных значений, решение системы уравнений, и т.д.

К ключевым преимуществам данного программного продукта можно отнести поддержку автоматического генерирования кода с возможностью реализации обмена данными в режиме реального времени, а также наличие библиотек имитационного моделирования механических и электротехнических систем, в т.ч. электроприводов. Пример имитационной модели приведен на рис. 1.

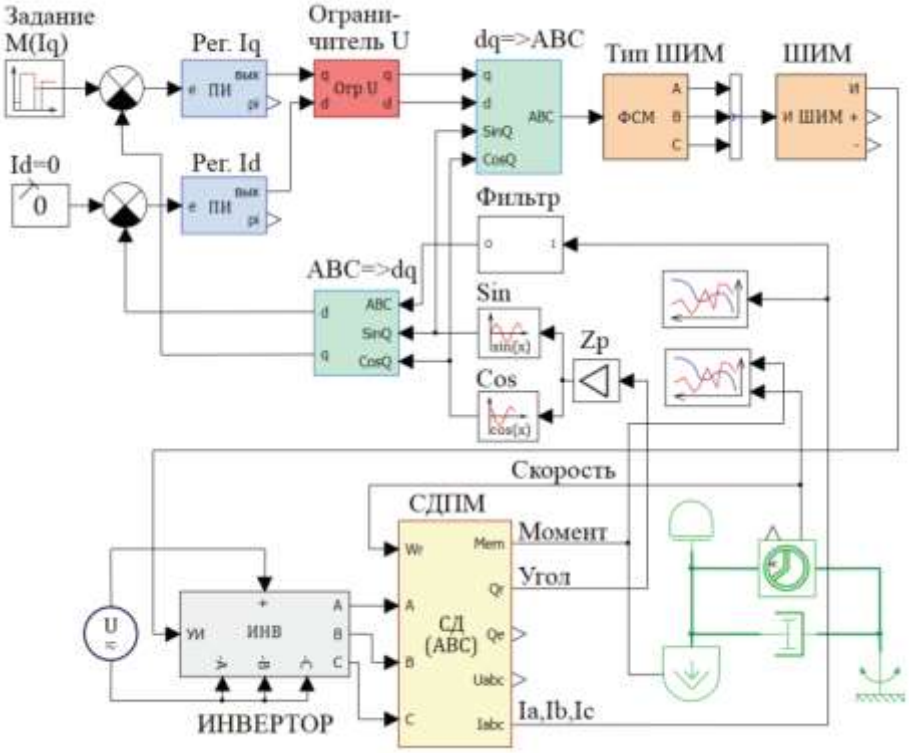


Рисунок 1 – Имитационная модель синхронного электропривода в пакете SimInTech [5]

К недостаткам данного программного продукта можно отнести недостаточно развитый язык алгоритмического программирования и текстовый формат редактирования свойств блоков в модели.

Engee – довольно «молодой» и перспективный проект, позиционируемый как замена Matlab, что выражается в частичной поддержке скриптового языка Matlab, а также возможности импорта Simulink-моделей, созданных с использованием определенных библиотек, например, имитационного моделирования электротехнических и электромеханических объектов Simscape Electrical [6]. Пример такой модели приведен на рис. 2.

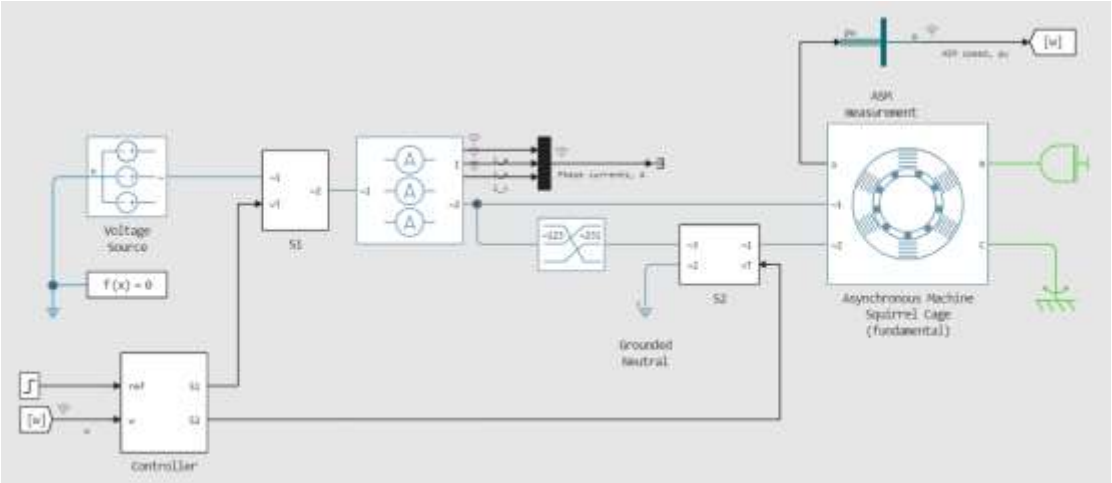


Рисунок 2 – Имитационная модель асинхронного электропривода в среде Engee

Главным достоинством данного программного пакета является развитый и функциональный скриптовый язык, позволяющий решать самые разнообразные задачи синтеза и анализа систем автоматического управления с помощью специализированных библиотек, что позволяет существенно упростить процесс алгоритмизации и сократить время, затрачивание на проведение исследований. К положительным сторонам также можно отнести поддержку символьных вычислений, численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, расширенные графические функции.

К сожалению, на данный момент не все необходимые в образовательном процессе функции реализованы в данном программном пакете. В частности, на данный момент имеются ограничения с точки зрения разработки и обучения искусственных нейронных сетей, автоматического генерирования программного кода, а также отсутствует функционал разработки систем нечеткой логики и моделирования объемных механических моделей. Однако данный

проект интенсивно развивается, анализируются отзывы и предложения пользователей, благодаря чему есть вероятность существенного расширения функциональных возможностей Engee в будущем.

Таким образом можно сделать вывод, что рассмотренные в рамках данной статьи отечественные программные пакеты практически полностью перекрывают потребности современного образовательного процесса в области автоматизированного электропривода, мехатроники и робототехники.

Перечень ссылок

1. Бурьяноватый, А. И. Применение пакета MATLAB в дисциплинах нового учебного плана подготовки инженеров-электромехаников / А. И. Бурьяноватый, М. А. Иванов // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : Седьмой Международный симпозиум, Санкт-Петербург, 08–11 октября 2013 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. – С. 93-99.

2. Бажутин Д.В. Роль специализированных инженерных программных пакетов в подготовке специалистов в области электромеханики и автоматики / Д.В. Бажутин // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании : сборник материалов XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 1-2 июня 2023 г., г. Донецк. – Донецк : ДонНТУ, 2023. – С. 38-44

3. Карпук, И. А. Использование пакета прикладных математических программ Scilab при подготовке специалистов-электромехаников / И. А. Карпук, Н. И. Андреева, Д. И. Морозов // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3(19). – С. 600-601.

4. Андреев, А. С. Опыт использования среды динамического моделирования технических систем SIMINTECH в процессе обучения студентов / А. С. Андреев, К. В. Аксенчик // Инновации в профессиональном и профессионально-педагогическом образовании : материалы 25-й Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 07–08 апреля 2020 года. Том 1. – Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2020. – С. 191-193.

5. Калачев Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе [Электронный ресурс]ю Режим доступа: https://help.simintech.ru/oxy_ex-1/webhelp_docs/SIT-_Kalachev_Y.N._SimInTech_Modelirovanie_v_electroprivode.pdf.

6. Документация Engee. Физическое моделирование электрических схем [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://engee.com/helpcenter/stable/fmod-electricity.html.

УДК 621.313

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

С.Н. Ткаченко, Д.А. Тонкошкур
ФГБОУ ВО «Донецкий Национальный Технический Университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Работа посвящена вопросам совершенствования цифровой релейной защиты асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций путём модернизации защиты от перегрузки. Основная идея предложенного алгоритма защиты заключается в расчёте и контроле выделяемой суммарной энергии потерь в режимах перегрузки, обусловленной составляющими прямой и обратной последовательностей по данным измерения мгновенных значений фазных токов, фазных напряжений и скольжения. Работоспособность предложенной усовершенствованной защиты от перегрузки асинхронного двигателя проверена на ПЭВМ с помощью методов математического моделирования на примере асинхронной машины номинальной мощностью 1000 кВт и напряжением статора 6 кВ типа VEM DKKAJ 4020-4.

The work is devoted to the issues of improving digital relay protection of induction motors of the power plants auxiliaries by modernizing overload protection. The main idea of the proposed protection algorithm is to calculate and control the released total loss energy in overload conditions, caused by the positive and negative sequences components based on the instantaneous values measurement data of phase currents, phase voltages and slip. The performance of the proposed improved overload protection for an induction motor has been tested on a PC using mathematical simulation methods for example an induction machine with a rated power of 1000 kW and a stator voltage of 6 kV type VEM DKKAJ 4020-4.

Ключевые слова: *цифровая релейная защита, асинхронный двигатель, собственные нужды, короткозамкнутый ротор, суммарная энергия потерь, перегрузка.*

Keywords: *digital protection, induction motor, auxiliaries, squirrel-cage rotor, total loss energy, overload.*

Постановка задачи. В системе собственных нужд (СН) современных тепловых и атомных электрических станций в качестве основной электрической машины переменного тока, применяемой для электропривода механизмов и установок, являются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором (КЗР) [1]-[3]. Несмотря на достаточно относительно высокую надёжность, обусловленную отсутствием изоляции короткозамкнутой обмотки ротора, контактно-щёточного аппарата и системы возбуждения, процент повреждаемости АД с КЗР довольно высокий и составляет примерно 25-30% согласно данным приведенным в [1]-[3]. В настоящее время на присоединениях «силовой кабель-АД с КЗР» системы СН наряду с аналоговыми и микроэлектронными комплектами релейной защиты (РЗ) используются цифровые системы РЗ (современные микропроцессорные терминалы). В большинстве случаев указанные системы реализуют стандартные защиты, рекомендуемые ПУЭ или стандартом IEEE [4]-[5], что негативно сказывается на корректной работе в ряде анормальных и аварийных режимов работы (РР), как например, работа при появлении несимметрии питающего напряжения, при обрыве стержней короткозамкнутой обмотки ротора, при ухудшении охлаждения машины и др. Существенно сократить повреждаемость возможно за счёт дальнейшего усовершенствования алгоритмов цифровых систем релейной защиты и автоматики (РЗиА) путём модернизации защиты от перегрузки, а также тепловой защиты асинхронной машины, способных корректно функционировать при появлении несимметрии питающего напряжения. Исходя из изложенного материала задача дальнейшего совершенствования цифровой релейной защиты асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций является актуальной.

Результаты исследований. Работа АД с КЗР при возникновении несиметрии питающего напряжения, при обрыве фазы обмотки статора, при обрыве стержней короткозамкнутой обмотки приводит к появлению составляющей обратной последовательности (ОП) в токах и напряжениях, частота которой равна удвоенной промышленной частоте или 100 Гц. Ввиду присутствия явления вытеснения тока на переменном токе ток удвоенной промышленной частоты ОП вытесняется на поверхность обмотки короткозамкнутого ротора, что негативно влияет на дополнительный перегрев стержней. Длительная работа в подобных РР приведёт к перегреву медной обмотки изоляции статора, а также к оплавлению стержней обмотки КЗР, выполненной из алюминия, или приведёт к обрыву стержней медной или латунной беличьей клетки [3], [6]-[8]. Поэтому исходя из вышеизложенного

материала в данной работе уделим основное внимание развитию алгоритмов РЗ, способных корректно работать в несимметричных режимах. Как справедливо показано в [8] во многих моделях современных цифровых системах РЗиА ток ОП определяется очень грубо и только в некоторых режимах. В данной работе будем использовать подход, описанный в [3], основанный на использовании формул (1)-(3) для качественного вычисления токов (I_1, I_2), напряжений (U_1, U_2) и мощностей (P_1, P_2) прямой последовательности (ПП) и ОП по данным замеров мгновенных значений фазных токов (i_a, i_b, i_c) и напряжений (u_a, u_b, u_c), и оптимизированных для реализации в микропроцессорных терминалах РЗиА. Все расчёты в работе будет выполнять в системе относительных единиц (о.е.).

$$I_{S.1} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(i_\alpha - i_{\beta.n})^2 + (i_{\alpha.n} + i_\beta)^2},\ I_{S.2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(i_\alpha + i_{\beta.n})^2 + (i_{\alpha.n} - i_\beta)^2}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U_{S.1} &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(u_\alpha - u_{\beta.n})^2 + (u_{\alpha.n} + u_\beta)^2}, \\ U_{S.2} &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(u_\alpha + u_{\beta.n})^2 + (u_{\alpha.n} - u_\beta)^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{(u_\alpha - u_{\beta.n}) \cdot (i_\alpha - i_{\beta.n})}{4} + \frac{(u_{\alpha.n} + u_\beta) \cdot (i_{\alpha.n} + i_\beta)}{4}; \\ P_2 &= \frac{(u_\alpha + u_{\beta.n}) \cdot (i_\alpha + i_{\beta.n})}{4} + \frac{(u_{\alpha.n} - u_\beta) \cdot (i_{\alpha.n} - i_\beta)}{4}; \end{aligned} \quad (3)$$

где $i_\alpha = i_a$ – ток статора по оси α, о.е., $i_\alpha = (i_b - i_c) / \sqrt{3}$ – ток статора по оси β, о.е., $u_\alpha = u_a$ – напряжение статора по оси α, о.е., $u_\alpha = (u_b - u_c) / \sqrt{3}$ – напряжение статора по оси β, о.е., $i_{\alpha.n}$, $u_{\alpha.n}$ – значения тока и напряжения статора по оси α, сдвинутые на четверть периода тока промышленной частоты относительно текущей точки измерения, о.е., $i_{\beta.n}$, $u_{\beta.n}$ – значения тока и напряжения статора по оси β, сдвинутые на четверть периода тока промышленной частоты относительно текущей точки измерения, о.е.,

С целью устранения колебаний в сигналах токов и напряжений будем использовать усреднение токов и напряжений ПП и ОП по (4).

$$X = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \sum_{1}^{m} (X_{n-1})^2}; \quad (4)$$

где m – количество точек, направляемых на усреднение (среднее значение 20-40 точек).

Для устранения выявленных в процессе анализа, недостатков стандартной ЗП, в работе предлагается модернизация защиты в виде контроля выделяемой энергии потерь (потери в обмотках статора и КЗР) в режимах перегрузки, обусловленной составляющими ПП и ОП, определяемой по (5)-(7). В процессе расчёта энергии потерь в качестве допущения не будем учитывать потери в стали магнитопровода статора.

$$Q_{СУМ} = Q_1 + Q_2. \tag{5}$$

$$Q_1 = \int_0^{t_{ПЕР}} (R_S \cdot (I_1(t))^2 + (P_1 - R_S \cdot (I_1(t))^2) \cdot s) \cdot dt; \tag{6}$$

$$Q_2 = \int_0^{t_{ПЕР}} (R_S \cdot (I_2(t))^2 + (P_2 - R_S \cdot (I_2(t))^2) \cdot (2 - s)) \cdot dt; \tag{7}$$

где R_S – активное сопротивление обмотки статора в о.е., определяемое экспериментально по [9] или упрощённо, как показано в [10]; s – величина скольжения АД, определяемая косвенно по методике, изложенной в [3] или измеряемая с помощью датчика угла положения ротора (ДПР); Q_1 – энергия потерь в асинхронном двигателе, обусловленная составляющими ПП, о.е., Q_2 – энергия потерь в асинхронном двигателе, обусловленная составляющими ОП, о.е., $Q_{СУМ}$ – суммарная энергия потерь в асинхронном двигателе, обусловленная составляющими ПП и ОП, о.е.

По логике триггером на включение процесса интегрирования или определения энергии потерь должен стать факт превышения тока электродвигателя свыше предельно допустимого значения, который равен уставке срабатывания классической ЗП по току статора АД.

Ключевой особенностью предложенной защиты является превышение заданной уставки или предельно-допустимого значения суммарной энергии потерь, выделяемой в асинхронной машине за период двух следующих один за другим прямых пусков из холодного состояния при номинальной нагрузке на валу. Это обусловлено наличием обязательного требования, прописанного в пункте 2.5.12 правил технической эксплуатации электроустановок потребителей [11], а также в паспорте электродвигателей, предоставляемого заводом-изготовителем.

Более точно значение уставки ($Q_{ДОП}$) целесообразно определять по (5)-(7) экспериментально путём регистрации процессов двух пусков подряд из холодного состояния (время: $2 \cdot t_{ПУСК}$). Осциллографирование мгновенных значений фазных токов, фазных напряжений и скольжения желательно выполнять с использованием цифровых осциллографом, например, производства НПП «Рекон», компания «ПАРМА», ООО «Л Кард» и др.

Альтернативным способом является использование математической модели, основанной на полных дифференциальных уравнениях (8), описывающих одноконтурную эквивалентную схему замещения (ЭСЗ) АД с учётом скин-эффекта в обмотке КЗР и наличием контура потерь в стали статора (см. рис.1).

$$\begin{cases} p\psi_{S.\alpha} = u_{S.\alpha} - R_S \cdot i_{S.\alpha}, & p\psi_{S.\beta} = u_{S.\beta} - R_S \cdot i_{S.\beta}, \\ p\psi_{R.\alpha} = -R_R(s) \cdot i_{R.\alpha} - \omega \cdot \psi_{R.\alpha}, & p\psi_{R.\beta} = -R_R(s) \cdot i_{R.\beta} + \omega \cdot \psi_{R.\beta}, \\ p\psi_{FE.\alpha} = -R_{FE} \cdot i_{FE.\alpha}, & p\psi_{FE.\beta} = -R_{FE} \cdot i_{FE.\beta}, \\ p\omega = J^{-1} \cdot \ (m - m_C(\omega, k_3)), \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} & pm = (\psi_{S.\beta}(s) \cdot \psi_{\mu.\alpha} - \psi_{S.\alpha}(s) \cdot \psi_{\mu.\beta}) / X_{\sigma S} \\ & \psi_{\mu.\alpha}(s) = a_S \cdot \psi_{S.\alpha} + a_R(s) \cdot \psi_{R.\alpha} + a_{FE} \cdot \psi_{FE.\alpha}, \\ & \psi_{\mu.\beta}(s) = a_S \cdot \psi_{S.\beta} + a_R(s) \cdot \psi_{R.\beta} + a_{FE} \cdot \psi_{FE.\beta}, \\ & a_S = X_{SR} / X_{\sigma S}, a_R(s) = X_{SR} / X_{\sigma R}(s), a_{FE} = X_{SR} / X_{\sigma FE}, \\ & X_{SR}(s) = \left[(X_{\mu N})^{-1} + (X_{\sigma S})^{-1} + (X_{\sigma R}(s))^{-1} + (X_{\sigma FE})^{-1} \right]^{-1}. \\ & i_{S.\alpha} = (\psi_{S.\alpha} - \psi_{\mu.\alpha}) / X_{\sigma S}, \ i_{R.\alpha} = (\psi_{R.\alpha} - \psi_{\mu.\alpha}) / X_{\sigma R}(s), \\ & i_{FE.\alpha} = (\psi_{FE.\alpha} - \psi_{\mu.\alpha}) / X_{\sigma FE}, \ i_{\mu.\alpha} = i_{S.\alpha} + i_{R.\alpha} + i_{FE.\alpha}, \\ & i_{S.\beta} = (\psi_{S.\beta} - \psi_{\mu.\beta}) / X_{\sigma S}, \ i_{R.\beta} = (\psi_{R.\beta} - \psi_{\mu.\beta}) / X_{\sigma R}(s), \\ & i_{FE.\beta} = (\psi_{FE.\beta} - \psi_{\mu.\beta}) / X_{\sigma FE}, \ i_{\mu.\beta} = i_{S.\beta} + i_{R.\beta} + i_{FE.\beta}. \end{aligned}$$

где $\psi_{S.\alpha}$, $\psi_{R.\alpha}$, $\psi_{FE.\alpha}$, $\psi_{S.\beta}$, $\psi_{R.\beta}$, $\psi_{FE.\beta}$ – соответственно потокосцепления по осям α и β для статора , контура ротора и контура потерь в стали статора; ω – угловая частота вращения ротора; m – мгновенное значение электромагнитного момента на валу; m_C – момент сопротивления; J – суммарный момент инерции привода; $u_{S.\alpha}$, $u_{S.\beta}$ – мгновенные значения напряжений статора по осям α и β; $\psi_{\mu.\alpha}$, $\psi_{\mu.\beta}$ – рабочее потокосцепление (потокосцепление воздушного зазора) по осям α и β; a_S, a_R, a_{FE} – коэффициенты распределения

потокосцеплений статора, контура ротора и контура потерь в стали; X_{SR} – суммарная входная проводимость электродвигателя; $u_{S.\alpha}$, $u_{S.\beta}$ – напряжение статора по осям α и β. $i_{S.\alpha}$, $i_{R.\alpha}$, $i_{FE.\alpha}$, $i_{\mu.\alpha}$, $i_{S.\beta}$, $i_{R.\beta}$, $i_{FE.\beta}$, $i_{\mu.\beta}$ – токи статора, ротора, контура потерь в стали магнитопроводе стали статора и ветви намагничивания по осям α и β.

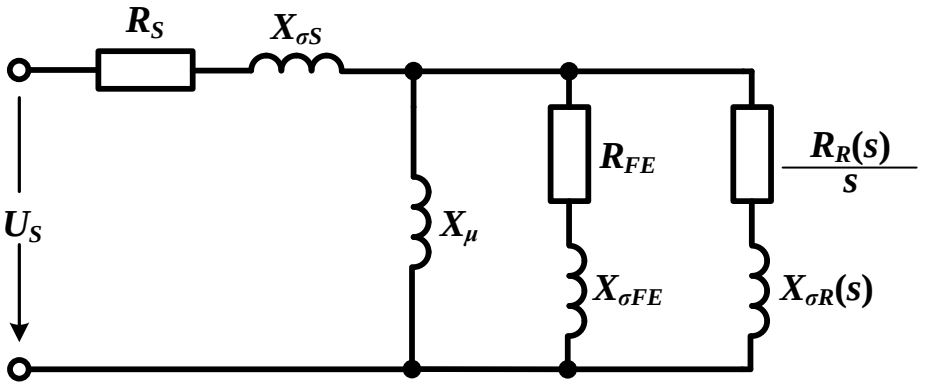


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения с одним контуром на роторе АД с КЗР

Для решения приведенной системы ДУ (8) рекомендуется использовать метод Рунге-Кутта четвёртого порядка [12].

Параметры используемой ЭСЗ АД в о.е. (R_S, $X_{\sigma S}$, X_μ, R_{FE}, $X_{\sigma FE}$, $R_R^{s=1}$, $X_{\sigma R}^{s=1}$, $R_R^{s_{НОМ}}$, $X_{\sigma R}^{s_{НОМ}}$) определяем по методике, изложенной в [10].

Для учёта скин-эффекта в обмотке КЗР АД в математической модели используются нелинейные зависимости активных и индуктивных составляющих сопротивлений обмотки ротора:

$$R_R(s) = R_R^{s_{НОМ}} \cdot \left[a_R + (1 - a_R) \cdot k_R\right]; \; X_{\sigma R}(s) = X_{\sigma R}^{s_{НОМ}} \cdot \left[a_X + (1 - a_X) \cdot k_X\right]; \quad (9)$$

где a_R и a_X – коэффициенты, определяющие лобовые части обмоток ротора соответственно по активной и индуктивной составляющих сопротивления обмотки ротора АД; k_R, k_X – коэффициенты вытеснения, определяемые по известным отношениям (10) для прямоугольного паза беличьей клетки ротора.

$$h_R = \zeta \cdot \frac{\mathrm{sh}(2 \cdot \zeta) + \sin(2 \cdot \zeta)}{\mathrm{ch}(2 \cdot \zeta) - \cos(2 \cdot \zeta)}, \; h_X = \frac{3}{2 \cdot \zeta} \cdot \frac{\mathrm{sh}(2 \cdot \zeta) - \sin(2 \cdot \zeta)}{\mathrm{ch}(2 \cdot \zeta) - \cos(2 \cdot \zeta)}, \quad (10)$$

где ζ – приведенная высота, определяемая для медного стержня обмотки по (11).

$$\zeta = 0{,}9 \cdot h \cdot \sqrt{|s|} \qquad (11)$$

где h – ширина проводника, м.

Структурно-логическая схема усовершенствованной цифровой защиты от перегрузки АД с КЗР приведена на рис. 4.

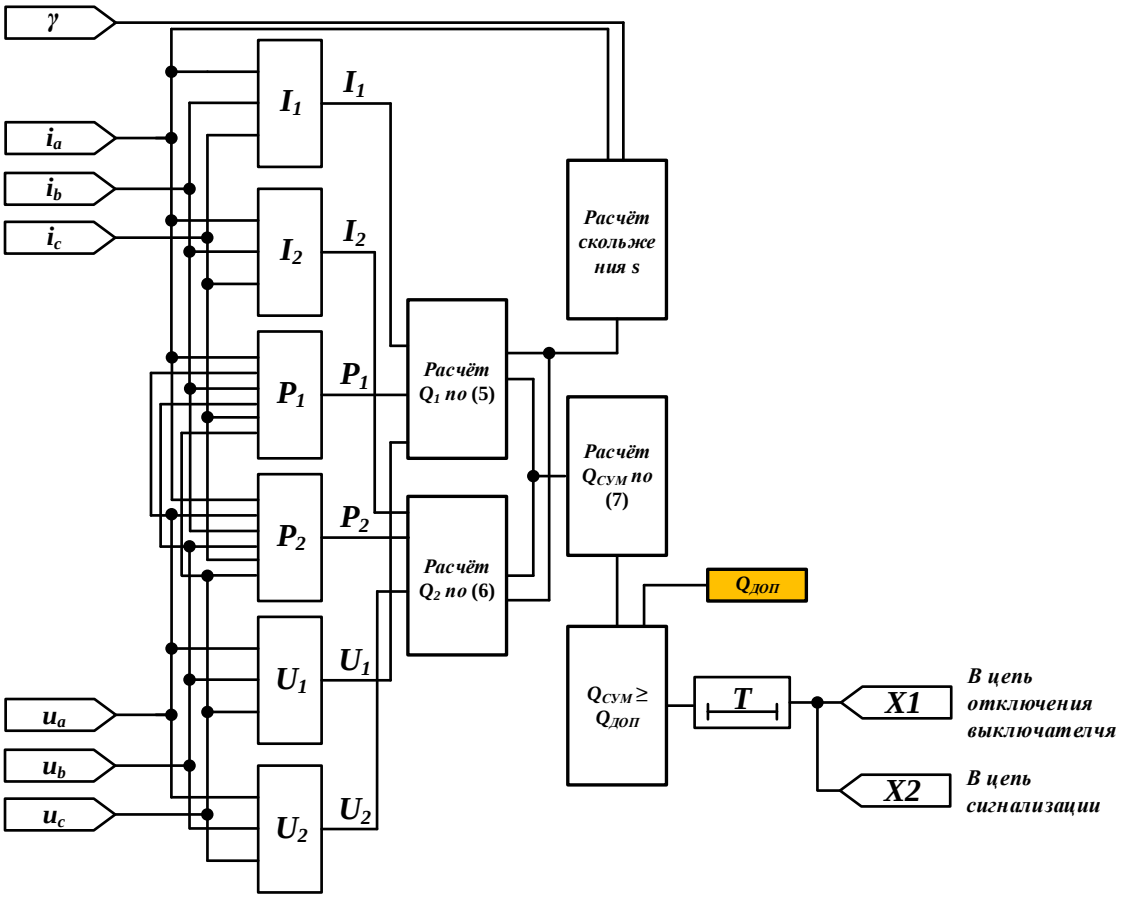


Рисунок 2 – Структурно-логическая схема модернизированной защиты от перегрузки АД с КЗР

Время допустимой перегрузки асинхронного двигателя равно такому значению времени, за которое интегрируемая микроконтроллером величина энергии потерь $Q_{СУМ}$ достигнет уставки или допустимого значения энергии $Q_{ДОП}$.

Блок-схема защиты от перегрузки АД с КЗР, включающая последовательность операций за один такт работы микроконтроллера, приведена на рис. 3.

Работоспособность предложенной усовершенствованной защиты от перегрузки АД с КЗР проверена на ПЭВМ с помощью методов математического моделирования для глубокопазного асинхронного двигателя типа VEM DKKAJ 4020-4 производства компании VEM Group® номинальной мощностью 1000 кВт и напряжением статора 6

кВ. Паспортные или каталожные данные асинхронной машины с короткозамкнутым ротором приведены в таблице 1, а рассчитанные по методике, представленной в [10], параметры ЭСЗ АД приведены в таблице 2.

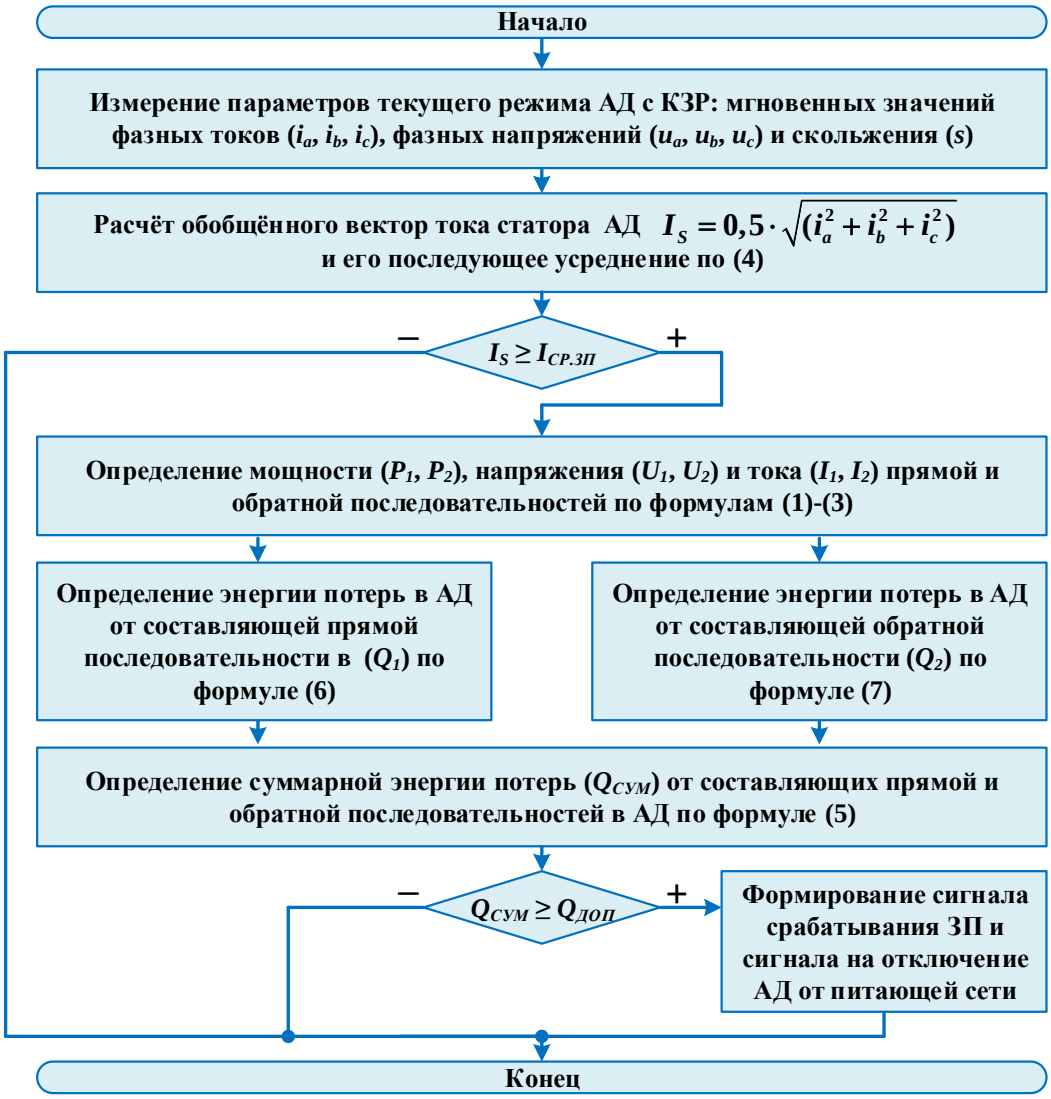


Рисунок 3 – Блок-схема защиты от перегрузки АД с КЗР, включающая последовательность операций за один такт работы микроконтроллера

Таблица 1 – Каталожные данные АД с КЗР типа VEM DKKAJ 4020-4

$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, кВ	$I_{НОМ}$, А	$cos\varphi_{НОМ}$	$\eta_{НОМ}$	$M_П/M_{НОМ}$	$M_{МАКС}/M_{НОМ}$	$I_П/I_{НОМ}$	$s_{НОМ}$
1000	6	114,1	0,88	0,957	0,87	2,56	5,43	0,01

Таблица 2 – Параметры схемы замещения АД с КЗР типа VEM DKKAJ 4020-4

R_S	$X_{\sigma S}$	X_{μ}	R_{FE}	$X_{\sigma FE}$	$R_R^{S=1}$	$X_{\sigma R}^{S=1}$	$R_R^{s_{НОМ}}$	$X_{\sigma R}^{s_{НОМ}}$
0,01	0,091	2,959	16,16	2,39	0,043	0,085	0,011	0,137

В качестве примера, иллюстрирующего корректную работу предложенной в работе ЗП, на рис. 4 и рис.5 приведены зависимости от времени t величин мощности ПП и ОП, токов ПП и ОП и суммарной энергии потерь, определённых по математической модели.

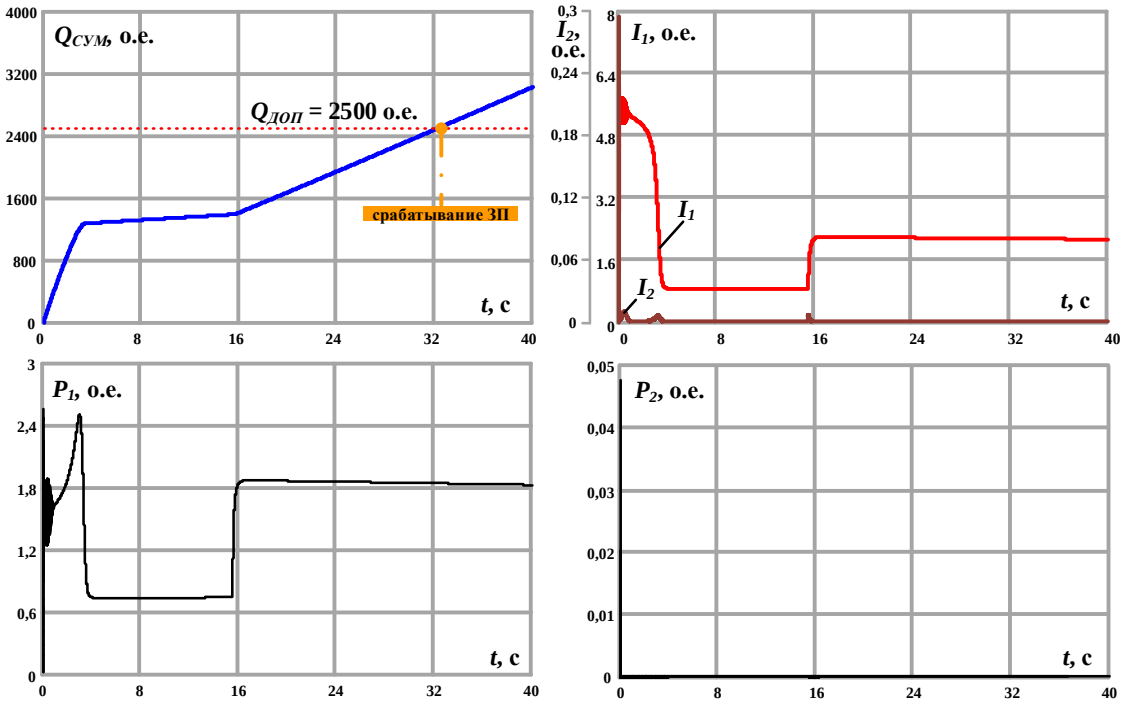


Рисунок 4 – Зависимости от времени (t) величин мощности ПП и ОП, токов ПП и ОП и суммарной энергии потерь для АД с КЗР типа VEM DKKAJ 4020-4 без наличия несимметрии напряжения

Из рис. 4 и рис.5 видно, что ЗП на основе контроля энергии потерь работает правильно, как без наличия несимметрии, так и при наличии несимметрии. Значение уставки защиты в виде допустимой энергии потерь $Q_{доп}$ = 2·1250 о.е., выделяемой за время прямого пуска, было рассчитано по математической модели (8) при использовании коэффициента загрузки машины, равного 0,75. Превышение заданной уставки приводит к формированию дискретного сигнала о срабатывании ЗП. Как видно из рис.4 и рис. 5, несмотря на одинаковый перегрузочный коэффициент, перегрузка асинхронной машины наступает на 7 с быстрее в режиме работы при наличии несимметрии равной 10% по сравнению с режимом без несимметрии, что подчеркивает правильный вектор совершенствования защиты с

учётом суммарной энергии потерь, как от составляющей прямой, так и обратной последовательностей.

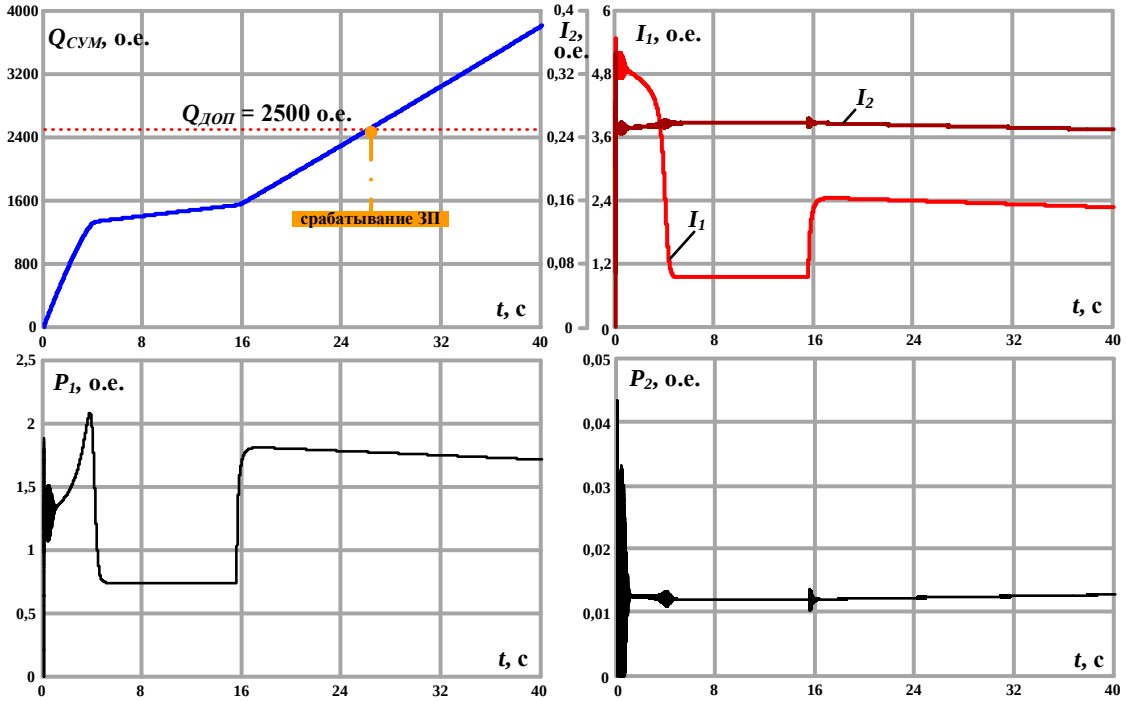


Рисунок 5 – Зависимости от времени (t) величин мощности ПП и ОП, токов ПП и ОП и суммарной энергии потерь для АД с КЗР типа VEM DKKAJ 4020-4 с наличием несимметрии напряжения

Следует отметить, что с целью повышения качества РЗиА асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций представленная в работе защита от перегрузки может быть дополнена комбинированной тепловой защитой, позволяющей косвенно контролировать температуру нагрева обмотки короткозамкнутого ротора на основе измерения режимных параметров [3].

Выводы

1. В работе представлен подход к совершенствованию цифровой релейной защиты асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций путём модернизации защиты от перегрузки;

2. Основная идея предложенного алгоритма защиты заключается в расчёте и контроле выделяемой суммарной энергии потерь в режимах перегрузки, обусловленной составляющими прямой и обратной последовательностей по данным измерения мгновенных значений фазных токов, фазных напряжений и скольжения;

3. С целью повышения качества релейной защиты асинхронных двигателей системы собственных нужд электростанций представленная в работе защита от перегрузки может быть дополнена модернизированной тепловой защитой, позволяющей косвенно контролировать температуру нагрева обмотки короткозамкнутого ротора на основе измерения режимных параметров;

4. Работоспособность предложенной усовершенствованной защиты от перегрузки асинхронного двигателя проверена на ПЭВМ с помощью методов математического моделирования на примере асинхронной машины номинальной мощностью 1000 кВт и напряжением статора 6 кВ типа VEM DKKAJ 4020-4.

Перечень ссылок

1. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.

2. Аббасова Э.М. Собственные нужды тепловых электростанций / Ю.М. Голоднов, В.А. Зильберман, А.Г. Мурзаков: под ред. Ю.М. Голоднова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.

3. Сивокобыленко, В. Ф. Математическое моделирование комбинированной тепловой защиты глубокопазного асинхронного двигателя / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Электрические станции. – 2020. – № 2 (1063). – С. 46-53.

4. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 01 февраля 2016 г. М.: КНОРУС, 2016. – 488 с;

5. IEEE Recommended Practice for Motor Protection in Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Std 3004.8™-2016) / Status: Active – Approved 7 December 2016. Date of Publication: 15 May 2017. – The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2016. – 163 p;

6. Ziuzev, A. M. On Heating Induction Motor Rotor at Start-Up of High-Inertia Mechanisms [Text] / A. M. Ziuzev, V. P. Metelkov // Proceedings of 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – 2018. – P.1-5;

7. Галеева Р.У. Исследование влияния несимметрии напряжения по обратной последовательности на нагрев, срок службы и коэффициенты снижения номинальной мощности асинхронных электродвигателей / Р.У. Галеева, Д.С. Альмиева // Мировая наука, №. 4 (4), 2017, С. 112-117;

8. Сушко В.А. Защита низковольтных электродвигателей. Совершенных устройств не существует [Электронный ресурс] / В.А. Сушко – М.: «Новости электротехники» – 2005. – №5(35). – Режим доступа к журн.: http://news.elteh.ru/arh/2005/35/11.php

9. ГОСТ 7217-87. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Издательство стандартов, 2003. – 38 с.

10. Павлюков, В. А. Совершенствование методов идентификации параметров эквивалентных схем замещения глубокопазных асинхронных двигателей / В. А. Павлюков, С. Н. Ткаченко // Электричество. – 2018. – № 10. – С. 54-60.

11. Охрана труда: правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: Утв. М-вом энергетики Рос. Федерации от 13.01.2003 № 6. – Москва : ИНФРА-М, 2003.

12. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике [Уч. Пособие] / В.Ф. Сивокобыленко – Донецк, РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.