

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО

Материалы
Всероссийской научно-практической
конференции, посвященной
80-летию профессора Ф.Р. Исмагилова

(г. Уфа, 30 октября – 1 ноября 2024 г.)



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ**

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО

*Сборник материалов
Всероссийской научно-практической конференции,
посвященной
80-летию профессора Ф.Р. Исмаилова
(г. Уфа, 30 октября – 1 ноября 2024 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

**Уфа
РИЦ УУНиТ
2024**

УДК 620.9
ББК 31
Э65

*Печатается по решению кафедры электромеханики
ПИШ «Моторы будущего» УУНиТ.
Протокол № 2 от 25.10.2024 г.*

Редакционная коллегия:

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электромеханики,
директор ПИШ «Моторы будущего» **В.Е. Вавилов** (*отв. редактор*);
д.т.н., профессор кафедры электромеханики **Ф.Р. Исмагилов**;
преподаватель кафедры электромеханики **А.М. Кабиров**;
к.т.н., доцент кафедры электромеханики **И.З. Шахмаев**;
к.т.н., доцент кафедры электромеханики **Е.М. Федосов**;
ст. преподаватель кафедры электромеханики **Е.Ю. Шварцман**;
ст. преподаватель кафедры электромеханики **Т.Ю. Волкова**

Энергетика будущего: сборник статей Всероссийской научно-практической
Э65 конференции, посвященной 80-летию проф. Ф.Р. Исмагилова (г. Уфа, 30 октября –
1 ноября 2024 г.) / отв. ред. В.Е. Вавилов. [Электронный ресурс] / Уфимск.
ун-т науки и технологий. – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2024. – 237 с. – URL: [https://
uust.ru/digital-publications/2024/197.pdf](https://uust.ru/digital-publications/2024/197.pdf) – Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-5972-5

В сборнике представлены научные статьи и доклады о современных проблемах
энергетики, таких как интеллектуальные энергетические системы, релейная защита
и автоматика, использование сверхпроводников, аварии в энергосистемах и
зелёной энергетике.

Статьи приводятся в авторской редакции, авторы несут ответственность за
достоверность и точность материала.

УДК 620.9
ББК 31

ISBN 978-5-7477-5972-5

© УУНиТ, 2024

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

1. *Герасимов А.С., Измайлов Р.К., Лисицын А.А.* Развитие средств режимного и противоаварийного управления энергосистем..... 7
2. *Нуриахметов В.Р.* Дальний Восток как драйвер энергетики..... 13
3. *Гилев О.В., Ивкин Е.С., Фишов А.Г., Холдин Д.В.* Локальные интеллектуальные энергосистемы в действии: успешная трансформация энергорайона в Новосибирске 17

СЕКЦИЯ I. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- 1.1. *Пестряев Д.А., Руссова Н.В.* Применение нейросетей для эффективного и точного тестирования релейной защиты в энергетических системах. 23
- 1.2. *Голобоков С.В., Михайлов С.А., Дудин А.В., Ушаков К.С.* Применение накопителей энергии в локальных системах электроснабжения..... 28
- 1.3. *Валюк А.С., Галиева Т.Г.* Интеллектуальный прибор для диагностики энергетического оборудования..... 35
- 1.4. *Дюндина В.П., Хуснутдинов А.Н.* Влияние электромобилей на инфраструктуру города Казань..... 39
- 1.5. *Заирова Д.И., Сандаков В.Д.* Применение цифровых технологий в smart grid..... 45
- 1.6. *Разжевалов С.А., Сандаков В. Д.* Цифровые двойники на цифровых подстанциях 51
- 1.7. *Якупов Н.М.* Разработка высокочастотного модуля-приемника для мониторинга изоляции на подстанциях..... 54
- 1.8. *Васильева И.С.* Цифровизация учета электроэнергии: интеллектуальные счетчики и их влияние на потребление энергии 59
- 1.9. *Муртазин А.Р., Сандаков В.Д.* Развитие интеллектуальных электроэнергетических систем в России 63

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

1.10. <i>Сандаков В.Д., Ятова А.С.</i> Использование цифровых двойников в энергетике	68
--	----

СЕКЦИЯ II. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

2.1. <i>Мусин И.Х., Гарфиев И. Б., Сандаков В. Д.</i> Релейная защита: от традиционных методов к Smart Grid	73
2.2. <i>Бернякович Е.А.</i> Влияние солнечных электростанций на работу релейной защиты	77
2.3. <i>Осинцев А.А.</i> Релейная защита и управление режимами активных электрических сетей с распределённой малой генерацией	82
2.4. <i>Федосов Е.М., Сафин А.В.</i> Совершенствование методов защиты распределительных сетей от однофазных замыканий на землю	88
2.5. <i>Мирзаянов Р.Р., Вавилов В.Е., Миргалиев А.А., Бородин Д.С.</i> Модель оптического трансформатора тока	95

СЕКЦИЯ III. ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

3.1. <i>Магоммедов Э.Ш., Коломенцева Д.А., Мойзых М.Е.</i> Применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в объектах энергетики.....	102
3.2. <i>Калитка В.С., Васильков Н.Д.</i> Высокотемпературные сверхпроводники для вращающихся машин	109

СЕКЦИЯ IV. АВАРИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

4.1. <i>Габдушев Д.М., Ванин А.С.</i> Разработка статистической модели вероятности отказа кабельных линий электропередачи 10 кВ.....	116
4.2. <i>Герасимов Д.А., Гуриков О.В.</i> Случаи неустойчивого регулирования частоты системами регулирования гидротурбин	124
4.3. <i>Голобоков С.В., Бростилова Т.Ю., Душутин К.А., Банбенков С.К.</i> Оптимизация мощности возобновляемых источников энергии в локальных энергосистемах	131
4.4. <i>Казаков Ю.Б., Грачев И.А.</i> Анализ причин аварии турбогенератора ТЗФП-220-2УЗ.....	137

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

4.5. *Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Кабиров А.М., Салихов Р.М., Семенов Я.О.*

Многодисковый электропривод для борьбы с гололедом воздушных линий
(ЭПМДК)..... 142

4.6. *Янгиров И.Ф., Кабиров А.М., Халиков А.Р., Федосов Е.М., Андреев А.К.*

Способ борьбы с гололедом воздушных линий СВЧ магнитокумулятивным
генератором (СМКГ)..... 150

4.7. *Янгиров И.Ф., Кабиров А.М., Халиков А.Р., Кудрявцев Н.С.* Электропривод
для борьбы с гололедом воздушных линий (ЭПДБГ)..... 161

4.8. *Кабиров А.М.* Разработка алгоритма поиска оптимального деления сети для
ликвидации перегруза ЛЭП или АТ..... 168

СЕКЦИЯ V. ЗЕЛЕНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

5.1. *Голобоков С.В., Медведева С.Н., Агеев В.А., Токарева О.Н.* Оптимизация
внутристанционных электрических сетей ветропарка 176

5.2. *Бутко В.П., Кузьмин Р.В.* Использование низкоскоростных индукторных
электрических машин дугостаторного (секционного) типа в качестве
генераторов для микроГЭС 182

5.3. *Шайхлисламов А.И., Исмагилов Ф.Р.* Обзор аддитивных технологий и их
применение при изготовлении обмоток электрических машин..... 187

5.4. *Максудов Д.В.* Солнечная энергетика в космосе..... 197

5.5. *Ямалов И.И., Шарафутдинов Ш.Н., Ильясов Д.Р., Нагорнов А.С.* О
применении активных магнитных подшипников в возобновляемой
энергетике 200

5.6. *Хафизов А.Д.* Инновационные решения в ходе реализации проектов
строительства объектов солнечной генерации в России 206

5.7. *Захаров В.А., Серебрянников А.В.* Перспективы применения реактивно-
вентильного двигателя для повышения эффективности работы солнечных
электроустановок 213

5.8. *Соломенцев Г.Р.* Перспектива эксплуатации электромобилей с
электродвигателями и водородными двигателями в городе Липецке..... 218

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

- 5.9. *Шакурова Л.Э.* Перспективы развития водородной энергетики:
возможности и вызовы для устойчивого будущего 222
- 5.10. *Березов В.В., Хафизов А.Д.* Перспективы применения водородной зеленой
энергетики в резервных и автономных системах электроснабжения..... 229
- 5.11. *Шишкина Ю.С., Новикова О.В.* Исследование проблемы выбора
биоэнергетического оборудования..... 233

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 621.311

**1. Развитие средств режимного и противоаварийного управления
энергосистем**

Герасимов А.С., Измайлов Р.К., Лисицын А.А.

АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы»

Единая энергосистема (ЕЭС) России имеет характерные особенности, отличающие её от крупных энергообъединений в Европе, Северной Америке, Южно-Восточной Азии и др., а именно:

- региональные энергосистемы объединяются сравнительно слабыми связями на напряжении 220, 330, 500, 750 кВ. Эти связи имеют, как правило, сложную структуру, по ним передается мощность до нескольких ГВт, и поэтому нарушения устойчивости параллельной работы по этим связям могут повлечь за собой тяжелые последствия;
- перетоки мощности значительно изменяются в течение суток, в зависимости от сезона и других обстоятельств;
- пропускная способность линий 330 кВ и выше в значительной части определяется условиями устойчивости, а не перегрузкой по току;
- суммарная мощность всех средств компенсации реактивной мощности в электрической сети относительно невелика.

В связи с перечисленными особенностями, для обеспечения надежности параллельной работы Единой энергетической системы (ЕЭС) России в процессе диспетчерского управления используются различные системы мониторинга, а также режимная и противоаварийная автоматика. В частности, в ЕЭС России функционируют: система мониторинга запасов устойчивости по контролируемым сечениям энергосистемы (СМЗУ), централизованная система автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (ЦС АРЧМ), централизованная система противоаварийного управления (ЦСПА).

В современной практике управления ЕЭС России основополагающим критерием допустимости электрического режима является понятие максимально допустимого перетока активной мощности (МДП) в контролируемых сечениях электрической сети. Программно-технический комплекс СМЗУ [1] разработан для автоматического в онлайн режиме определения максимально допустимых (МДП) и аварийно допустимых (АДП) перетоков активной мощности в контролируемых сечениях с учетом действия противоаварийной автоматики (ПА). Для анализа статической апериодической устойчивости в СМЗУ используется расчетный модуль программного комплекса (ПК) RastrWin. Для анализа динамической устойчивости используется расчетный модуль ПК Rustab, в котором для моделирования генераторов, их систем возбуждения и

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

регулирования применяются упрощенные модели, идентичные моделям, реализованным в ранее повсеместно использовавшемся ПК Mustang.

Определение МДП и АДП осуществляется в СМЗУ циклически на основе текущей телеметрической информации, получаемой из оперативно-информационного комплекса диспетчерского центра, и расчетной модели электрической сети. В цикле расчета и обновления значений МДП и АДП, который составляет от 1 до 5 минут, выполняются:

- оценивание состояния;
- определение предельного перетока по статической аperiodической устойчивости для заданных контролируемых сечений;
- определение перетоков в контролируемых сечениях, соответствующих нормативным запасам по статической аperiodической устойчивости в доаварийном и послеаварийных режимах для заданного списка аварийных процессов;
- определение величин МДП без учета действия ПА и с учетом действия ПА;
- определение величины АДП.

На сегодняшний день СМЗУ используется для расчетов МДП и АДП для более 280 контролируемых сечений ЕЭС России, что составляет порядка 20% от их общего числа. Несмотря на то, что технология СМЗУ еще находится на этапе внедрения, алгоритмы ее активно развиваются, расширяются области ее применения, а сама технология становится одной из ключевых для режимного и противоаварийного управления режимами энергосистем.

С развитием технологии СМЗУ результаты расчетов, выполненных ею, стали использоваться для автоматизации процессов других технологических задач. Так, один из этапов развития технологии СМЗУ состоял в организации автоматической передачи результатов рассчитанных величин МДП и АДП из СМЗУ в ЦС АРЧМ для использования в качестве уставки регулирования перетоков активной мощности. Действительно, одной из задач ЦС АРЧМ является ограничение перетоков активной мощности по контролируемым сечениям путем изменения мощности электростанций, участвующих во вторичном регулировании частоты в энергосистеме. В устоявшейся практике значение максимально допустимой величины перетока мощности, поступающее в ЦС АРЧМ в качестве уставки регулятора перетоков, является наперед заданным расчетным значением, определенным для наиболее тяжелого режима работы энергосистемы. Использование для ограничения перетоков в ЦС АРЧМ рассчитанных СМЗУ в режиме реального времени значений МДП существенно повысило эффективность вторичного регулирования частоты и позволило более полно использовать пропускную возможность сечений, контролируемых АРЧМ. На настоящий момент 6 комплексов ЦС АРЧМ в ЕЭС России получают и используют информацию от СМЗУ в автоматическом режиме.

Технология СМЗУ используется также при проведении расчетов максимально допустимых перетоков на стадии краткосрочного планирования режимов работы энергосистемы. На этом этапе планирования в составе планового диспетчерского

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

графика (ПДГ) для каждого часа суток определяются значения генерации (график генерации) и межсистемных, межгосударственных перетоков активной мощности в контролируемых сечениях (графики перетоков), потребление (графики потребления), а также заданные объемы резервов активной мощности Единой энергетической системы, Объединенной энергетической системы, энергосистем и электростанций. С помощью технологии СМЗУ осуществляется расчет МДП с учетом всех возможных плановых схемно-режимных ситуаций, исключается недоиспользование пропускной способности связей и, соответственно, обеспечивается полное использование мощности наиболее экономичных электростанций для покрытия электропотребления [2].

Технология СМЗУ также находит применение в локальных устройствах противоаварийного управления. Она эффективно используется для выбора уставок автоматики разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ) [3]. В случае с АРПМ, автоматика начинает действовать, когда контролируемый параметр (активная мощность или угол между векторами напряжений) достигает уставки срабатывания. Обычно эти уставки рассчитываются на этапе планирования режимов работы энергосистемы и либо задаются в АРПМ как постоянные параметры, либо представляются в виде нескольких групп уставок, переключение между которыми осуществляется персоналом вручную один раз в сезон. С внедрением технологии СМЗУ появилась возможность организовать АРПМ по централизованному принципу. СМЗУ становится верхним уровнем двухуровневой системы, а устройство АРПМ на объекте — низовым (локальным) элементом, который получает уставки для своей работы с верхнего уровня. Важно отметить, что СМЗУ использует для расчетов не наихудшие или «усредненные» схемно-режимные условия, а текущие, сложившиеся в схеме и наблюдаемые в режиме реального времени. Поэтому использование СМЗУ в качестве «задатчика» уставок для АРПМ существенно повышает эффективность использования пропускных способностей электрических связей, а также повышает эффективность работы средств локального противоаварийного управления.

Основной задачей противоаварийного управления в крупных энергообъединениях, обладающими достаточным количеством первичного и вторичного резерва активной мощности, является предотвращение нарушения устойчивости параллельной работы отдельных его частей и обеспечение нормативных запасов устойчивости. Существенное изменение частоты переменного напряжения в таких энергосистемах может возникать только при аварийном отключении особо крупных энергоблоков или электростанций, а также в результате совокупности аварийных возмущений, приводящей к нарушению устойчивости параллельной работы в случае отказа или неправильной работы устройств автоматического предотвращения нарушения устойчивости, а также в случае отсутствия такой противоаварийной автоматики. При этом, обычно в качестве пусковых факторов срабатывания автоматики предотвращения нарушения устойчивости принимаются отключения линий

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

электропередачи, а основные управляющие воздействия направлены на отключение потребителей и генерации.

С ростом требований к качеству электрических режимов и, как следствие, к оперативно-диспетчерскому управлению территориально изолированными энергосистемами, возникает задача обеспечения надежности функционирования энергорайонов, изолированных от ЕЭС России, а также связанных с ней слабыми электрическими связями. Такие энергорайоны, с одной стороны, имеют высокую вероятность отселения от ЕЭС России и перехода на автономную работу, а с другой стороны, могут иметь в своем составе достаточно мощную генерацию, в том числе на основе возобновляемых источников энергии.

В отличие от крупных энергосистем, изолированно работающие энергосистемы сравнительно небольшой мощности, в первую очередь, наиболее чувствительны к возникновению небалансов активной мощности, вызванных аварийными отключениями генераторов. Последствиями возникновения таких небалансов могут являться недопустимые изменения частоты переменного напряжения (кратковременные или длительные), приводящие ввиду определенных технологических особенностей первичных двигателей, к дополнительному отключению генераторов электростанций и возникновению лавины частоты. Данное обстоятельство может быть обусловлено как соизмеримостью мощностей аварийно отключаемых энергоблоков или электростанций с суммарной мощностью самих изолированных энергосистем, так и относительно небольшими значениями эквивалентных инерционных постоянных времени таких энергетических систем.

Достаточно долгое время в изолированных энергосистемах России задача противоаварийного управления, связанная с предотвращением возникновения недопустимого снижения частоты при недостаточных объёмах или скорости реализации резервов активной мощности, решалась за счёт применения устройств автоматической частотной разгрузки, действующих в процессе развития частотной аварии с заданной выдержкой времени и уставкой срабатывания по частоте на отключение потребителей. Однако с появлением в энергосистемах газотурбинных энергоблоков, а также источников генерации на основе ВИЭ, имеющих существенные ограничения на длительную работу при частотах, отличающихся от номинальной, и оснащенных соответствующими технологическими защитами, приводящими зачастую к их отключению (или разгрузке до холостого хода), появилась необходимость применения особых систем противоаварийного управления.

Для этих целей был разработан специализированный алгоритм программно-технического комплекса противоаварийной автоматики, позволяющий оптимизировать решение рассматриваемой задачи противоаварийного управления путём расчёта величины возникающего небаланса и оптимальных объёмов управляющих воздействий в онлайн-режиме [4]. Основной сложностью при разработке алгоритма являлось определение коэффициента регулирующего эффекта генерации по частоте для текущей величины резерва активной

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

мощности в изолированной энергосистеме. В общем случае, значение этого коэффициента определяется достаточно большой совокупностью факторов, таких как: состав генераторов электростанций, схемно-балансовая ситуация, наличие вращающегося резерва, положение рабочей точки регуляторов частоты вращения в зоне нечувствительности и др., – и может варьироваться в весьма широких пределах при одном и том же потреблении энергосистемы (от 0 при отсутствии первичного резерва до значения 25 и более). Эта задача была решена путем использования при работе алгоритма актуальной информации о величине текущего резерва генерации, получаемой онлайн из диспетчерского центра, и характерной функции, являющейся аппроксимацией экспериментальных или расчётных данных об изменениях частоты переменного напряжения при аварийном отключении энергоблоков при различных величинах реализуемого резерва активной мощности.

На основе разработанного алгоритма был создан и введен в эксплуатацию программно-технический комплекс противоаварийной автоматики энергосистемы Калининградской области. Принятое решение позволило обеспечить корректный учет регулирующего эффекта генерации по частоте и выбор объемов отключения нагрузки при аварийном отключении энергоблоков в изолированно работающей Калининградской энергосистеме и, соответственно, обеспечить устойчивый переход к послеаварийному режиму без рисков возникновения неконтролируемого снижения частоты. Преимущества применения разработанного комплекса противоаварийной автоматики, по сравнению с традиционными АЧР и дополнительной аварийной разгрузкой (ДАР), были неоднократно продемонстрированы во время проведения испытаний по выделению на изолированную работу Калининградской энергосистемы [5].

Еще одной особенностью регулирования частоты в небольших изолированно работающих энергосистемах является необходимость поддержания на электростанциях энергосистемы достаточных резервов первичного и вторичного регулирования. Особенность эта определяется, прежде всего тем, что при возникновении небаланса активной мощности, связанного с отключением генерирующих источников, в изолированной энергосистеме одновременно существенно снижаются резервы мощности, и, соответственно, снижается эффективность первичного и вторичного регулирования частоты. Таким образом, задача как можно более быстрого и эффективного восстановления резервов первичного и вторичного регулирования частоты с минимизацией риска возникновения аварийных ситуаций, связанных с недостаточностью регулировочного диапазона энергоблоков, становится существенно значимой для обеспечения надёжной работы такой энергосистемы.

Для решения этой задачи была разработана централизованная система автоматического поддержания резервов активной мощности электростанций (АПРАМ), решающая задачи автоматического поддержания требуемого объема вторичных резервов в энергосистеме путем регулирования величины генерации

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

на электростанциях, участвующих в третичном регулировании частоты [6]. Система осуществляет автоматическое изменение величины генерации электростанций с нормативными скоростями в соответствии с наперед заданным приоритетом для поддержания требуемых объемов вторичного резерва активной мощности, а также дает рекомендации диспетчерскому персоналу по пуску или останову единиц генерирующего оборудования для обеспечения требуемых объемов третичного резерва активной мощности.

Внедрение АПРАМ позволит повысить надежность функционирования энергосистемы за счет существенного снижения нагрузки на диспетчерский персонал и оперативный персонал электростанций путем сокращения необходимого количества голосовых команд на поддержание вторичных резервов активной мощности и автоматизации их выполнения, а также минимизации риска ошибочных действий оперативного персонала электростанций при исполнении команд по изменению величины генерации.

В настоящее время система АПРАМ находится на этапе внедрения в энергосистеме Калининградской области. Программное обеспечение системы полностью отвечает всем требованиям по разработке безопасного отечественного программного обеспечения и функционирует под управлением отечественной операционной системы семейства Linux. Необходимо отметить, что инновационная система автоматического третичного регулирования активной мощности была разработана в России впервые. Опыт эксплуатации разработанной системы регулирования позволит уточнить и, возможно, улучшить уникальные технические решения, которые легли в основу разработки, а также выявит целесообразность тиражирования разработанных технических решений и внедрения подобных систем третичного регулирования частоты в других энергосистемах ЕЭС России.

Все вышеизложенное свидетельствует о продолжающемся активном развитии средств режимного и противоаварийного управления энергосистемами, связанном как с интенсивной цифровизацией процессов мониторинга и управления в электроэнергетике, так и с новыми вызовами, появившимися в последние годы, такими как ужесточение требований к качеству управления электрическим режимом территориально изолированных энергосистем, а также переводом программного обеспечения на работу под управлением отечественных операционных систем.

Библиографический список

1. Развитие системы мониторинга запасов устойчивости с контролем динамической устойчивости для учета действия противоаварийной автоматики / Александров А.С., Максименко Д.М., Михайленко А.Ф., Неуймин В.Г. – Текст: непосредственный // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2017. — №76. — С. 64-73.
2. Интеграция системы мониторинга запасов устойчивости с технологическими инструментами рынка электроэнергии и мощности /

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Костоглодова С.Л., Лоцман Д.С., Максименко Д.М., Неуймин В.Г. – Текст: непосредственный // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2021.- №84. — С. 89-95.

3. Координация работы противоаварийной автоматики и системы мониторинга запасов устойчивости / Говорун М.Н., Горячевский К.С., Михайленко А.Ф., Сацук Е.И., Синянский И.В. – Текст: непосредственный // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2020. — №83. — С. 20-30.

4. Разработка программно-технического комплекса противоаварийной автоматики Калининградской энергосистемы / Аюев Б.И., Грабчак Е.П., Лисицын А.А. [и др.] – Текст: непосредственный // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2019. — №81. — С. 14-22.

5. Результаты натурных испытаний программно-технического комплекса противоаварийной автоматики Калининградской энергосистемы / Аюев Б.И., Грабчак Е.П., Лисицын А.А. [и др.] – Текст: непосредственный // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2020. — №82. — С. 36-42.

6. Особенности регулирования частоты и перетоков мощности в изолированно работающих энергосистемах / Аюев Б.И., Бинько Г.Ф., Герасимов А.С. [и др.] – Текст: непосредственный // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2020. — №82. — С. 124-130.

© Герасимов А.С., Измайлов Р.К., Лисицын А.А., 2024

УДК 620.9

2. Дальний Восток как драйвер энергетики

Нуриахметов В.Р.

Филиал АО «СО ЕЭС» Тихоокеанское РДУ

Единая энергетическая система России (ЕЭС России) состоит из 75 региональных энергосистем, которые, в свою очередь, образуют 7 объединенных энергетических систем: Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Юга, Центра и Северо-Запада. Все энергосистемы соединены межсистемными высоковольтными линиями электропередачи напряжением 220-500 кВ и выше и работают в синхронном режиме (параллельно), за исключением ОЭС Востока, которая ввиду наличия недостаточного количества слабых связей с ОЭС Сибири функционирует изолированно от остальных ОЭС.

В электроэнергетический комплекс ЕЭС России входит 911 электростанций мощностью свыше 5 МВт каждая. На 1 января 2024 года общая установленная мощность электростанций ЕЭС России составила 263,1 ГВт [2].

Ежегодно все станции вырабатывают около одного триллиона кВт·ч электроэнергии. В 2023 году электростанции ЕЭС России выработали 1 178 млрд кВт·ч. Потребление электроэнергии в 2023 году составило 1 122 млрд кВт·ч [2].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Управление электроэнергетическими режимами 7 энергообъединений и энергосистем, расположенных на территории 85 субъектов Российской Федерации, осуществляют филиалы Системного оператора – объединенные и региональные диспетчерские управления соответственно.

Отличительными особенностями ОЭС Востока является преобладание в структуре генерирующих мощностей тепловых электростанций (ТЭС), имеющих ограниченный диапазон регулирования, а также протяжённые линии электропередачи.

Согласно Федеральному закону от 11.06.2022 № 174-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» и отдельные законодательные акты Российской Федерации», начиная с 01.01.2024 Системный оператор обеспечивает единоличное оперативно-диспетчерское управление в пределах Единой энергетической системы, а также в технологически изолированных территориальных электроэнергетических системах, в том числе расположенных в Дальневосточном федеральном округе – энергосистемах Чукотского автономного округа, Камчатского края, Магаданской и Сахалинской областей.

В связи с принятием [6] предусмотрено появление новой системы планирования перспективного развития электроэнергетики с 1 января 2023 года, включающей в себя:

- установление исчерпывающего перечня документов перспективного развития электроэнергетики, к которым относятся генеральная схема размещения объектов электроэнергетики, утверждаемая Правительством Российской Федерации, схема и программа развития электроэнергетических систем России, утверждаемая Минэнерго России (далее – СиПР ЭЭС России);

- отказ от схем и программ перспективного развития субъектов Российской Федерации как самостоятельных документов, ежегодно разрабатываемых и утверждаемых органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, с включением соответствующих технических решений в СиПР ЭЭС России;

- централизованное выполнение АО «СО ЕЭС» функций по разработке вышеуказанных документов перспективного развития электроэнергетики.

18 сентября 2024 года завершено общественное обсуждение генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года (далее – проект Генеральной схемы), и АО «СО ЕЭС» подготовлен к утверждению доработанный проект Генеральной схемы.

Согласно проекту Генеральной схемы Дальневосточный федеральный округ (ДФО) отнесен к числу регионов, характеризующихся интенсивным увеличением спроса на электрическую энергию и мощность. При этом, для ДФО данный показатель существенно выше, чем в среднем по России.

По сравнению с базовым 2023 годом (первый послековидный год, характеризующийся устойчивым ростом экономического производства в стране) прогнозное потребление электрической мощности/электрической энергии:

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

а) в ОЭС Востока прогнозируется рост:

– к 2030 году (горизонт планирования СиПР ЭЭС России в 2024 году) на 38,9% по мощности и 27,2% по электроэнергии;

– к 2042 году (горизонт планирования генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики) на 63,3% по мощности и 50% по электроэнергии.

б) в технологически изолированных территориальных энергосистемах ДФО тренд сохраняется аналогичный:

– к 2030 году рост на 22,3% по мощности и 20,4% по электроэнергии;

– к 2042 году рост на 28,2% по мощности и 26,3% по электроэнергии.

Как видно из вышеприведенных показателей, ДФО в период до 2042 года предстоит выступить одним из основных драйверов развития отечественной энергетики. Прирост потребления электрической мощности/ электрической энергии для дальневосточных энергосистем на предстоящую перспективу планируется колоссальный как по местным меркам, так и в масштабе всей страны, что неотвратимо потребует в недалеком будущем проведения глубокой модернизации морально и физически изношенного оборудования находящихся в настоящий момент в эксплуатации, а также строительства принципиально новых источников генерации.

В соответствии с [1] будущие потребности планируется покрывать в первую очередь за счет строительства новых генерирующих мощностей. Если сегодня в структуре энерго мощностей в ДФО преобладает тепловая и гидрогенерация (63,3% и 34,9% соответственно), и минимально присутствуют возобновляемые источники энергии (без учета гидрогенерации), а также атомные станции (1,2% и 0,6% соответственно), то к 2042 году структура генерации существенно изменится: сохранится преобладание ТЭС (45,4%), но существенно вырастет доля атомных (до 7,3%), солнечных и ветровых электростанций (до 17,6%).

Курс на увеличение доли ВИЭ-генерации связан прежде всего с экономическими аспектами. В числе ее основных преимуществ – быстрота реализации проектов.

Основные места размещения планируемых к сооружению источников генерации расположены в регионах, обладающими наибольшей плотностью проживающего в них населения: Амурская область, Хабаровский край, ЕАО, Приморский край, Сахалинская область и Камчатский край. Суммарная установленная мощность планируемых к вводу новых ГЭС(ГАЭС) и АЭС составляет 4860 МВт, новых СЭС и ВЭС – 5596,6 МВт, а также эксклюзивной для России, присутствующей только на Камчатке, геотермальной электростанции – 66,5 МВт. Наиболее крупные энергообъекты: Хабаровская и Приморская АЭС (каждая по 1200 МВт); Канкунская ГЭС (1000 МВт); Приморская ГАЭС (600 МВт); Хинганская ВЭС (1000 МВт); Волочаевская, Дежневская и Архаринская СЭС (каждая по 500 МВт).

Суммарный планируемый объем ввода в эксплуатацию генерации всех типов, включая ТЭС на угле и газе, до 2042 года ожидается в объеме более

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

13 ГВт, что составляет 97,5% от суммарной установленной мощности станций ОЭС Востока в 2023 году.

Строительство такого количества объектов генерации в ДФО естественным образом создаст синергетический эффект и приведет к необходимости дополнительного строительства соответствующего количества электрических сетей и развития системы релейной защиты и автоматики.

Как известно, энергетика является важнейшей отраслью промышленности страны. Проблемы энергетики (в том числе кадровый голод) активно освещаются на всех уровнях. Поэтому в любой энергетической компании остаются острыми вопросы кадрового потенциала. Решение всех намеченных планов невозможно без привлечения квалифицированных инженерных кадров.

Одним из путей решения проблемы кадрового дефицита можно рассматривать создание кадрового резерва компании, формирование которого заключается в работе на перспективу – как текущую, так и стратегическую потребность в персонале. При положительном решении данной задачи обеспечивается постоянный приток новых кадров, что позволяет гарантировать обеспеченность компании персоналом, повысить его качество за счет планирования карьерного роста ключевых сотрудников и защиты важных для развития компании позиций.

В настоящее время Системный оператор активно принимает участие в следующих программах по привлечению новых и сохранению уже работающих сотрудников, таких как:

1. «Жилищная политика» и «Корпоративная поддержка трудовой мобильности работников АО «СО ЕЭС»». В рамках данных программ реализуется: компенсация за аренду жилья, компенсация процентов по ипотечному займу, выплата процентной надбавки к заработной плате.

2. «Повышение мобильности трудовых ресурсов на территории Магаданской области». В рамках данной программы реализуется предоставление субсидии в размере 1 000 000 руб. в случае трудоустройства вновь принимаемого персонала в г. Магадане.

3. «Развитие арендного жилья в Камчатском крае». В рамках данной программы реализуется предоставление арендного жилья в г. Петропавловске – Камчатском, программа начинает действовать с 4 квартала 2024 года.

Основные выводы:

1) ДФО в период до 2042 года предстоит выступить одним из основных драйверов развития отечественной энергетики.

2) В ДФО для обеспечения сбалансированного развития экономики в период до 2042 года потребуются строительство принципиально новых источников генерации (в том числе ГЭС, АЭС, ВЭС и СЭС) в объеме более 13 ГВт.

3) Для решения всех намеченных планов по развитию энергетики ДФО необходимо привлечение квалифицированных инженерных кадров.

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

1. Проект Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года [Электронный ресурс] // Веб-сайт АО «СО ЕЭС». – 2024. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/future-planning/public-discussion-genshema/2042/>.
2. АО «СО ЕЭС» [Электронный ресурс] // Веб-сайт ОАО «АО СО ЕЭС». – 2024 – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/>.
3. Шмидт А.Н., Банников А.Ю. О системе стратегического планирования социально-экономического развития муниципального образования // Новый взгляд. Международный научный вестник. - 2015. - № 10. - С. 262-270.
4. Постановление Правительства Магаданской области от 14 июля 2015 года № 470-пп. Об утверждении государственной программы Магаданской области «Повышение мобильности трудовых ресурсов на территории Магаданской области» (с изменениями на 26 октября 2021 года). [Электронный ресурс] // Веб-сайт информационно правового обеспечения Гарант – 2024. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/26971096/?ysclid=m2low313gi428646230>.
5. Постановление Правительства Камчатского края от 21 февраля 2024 года № 55-П (в редакции Постановления Правительства Камчатского края от 04.10.2024 № 484-П). Об утверждении государственной программы Камчатского края «Обеспечение доступным и комфортным жильем жителей Камчатского края» (с изменениями на 4 октября 2024 года). [Электронный ресурс] // Веб-сайт Правительства Камчатского края – 2024. – Режим доступа: <https://kamgov.ru/document/frontend-document/view-npa?id=36278&ysclid=m2lozqmg3b773187628>.
6. Федеральный закон Российской Федерации от 11.06.2022 № 174-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». [Электронный ресурс] // Веб-сайт АО «АО СО ЕЭС». – 2024. – Режим доступа: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/fz174_110622.pdf.

© Нуриахметов В.Р., 2024

УДК 620.9

3. Локальные интеллектуальные энергосистемы в действии: успешная трансформация энергорайона в Новосибирске

Гилев О.В., Ивкин Е.С., Фишов А.Г., Холдин Д.В.

АО «ТЭСС», Новосибирский Государственный Технический Университет

Введение

Энергетическая система России стоит перед рядом вызовов, таких как устаревшая инфраструктура, рост спроса на электроэнергию и необходимость

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

перехода на более экологичные и эффективные технологии. В свете этих вызовов, развитие локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС) становится одним из ключевых направлений модернизации энергетики. ЛИЭС, позволяющие повысить энергоэффективность, снизить зависимость от централизованных сетей и повысить устойчивость энергоснабжения.

Локальные интеллектуальные энергосистемы или Минигрид – это сбалансированные по генерации и потреблению энергорайоны или локальные системы энергоснабжения (ЛСЭ), способные работать как автономно, так и параллельно с внешними сетями, управляемые современными цифровыми технологиями. Они дают возможность гибко управлять режимом работы энергорайона, повышая надежность и эффективность всей системы.

Характеристика объекта

Электроснабжение жилого массива «Березовое» с помощью распределенной генерации было выбрано девелопером на этапе его строительства из-за высокой стоимости и сложности подключения к внешним сетям. В 2012 году была введена в эксплуатацию коТЭС с установленной электрической 13.2 МВт и тепловой 40 МВт мощностью, состоящей из пяти газопоршневых установок (ГПУ) мощностью по 2 МВт каждая и двух дизельных генераторов. Схема выдачи мощности станции и ее внешний вид представлены на рис.1.

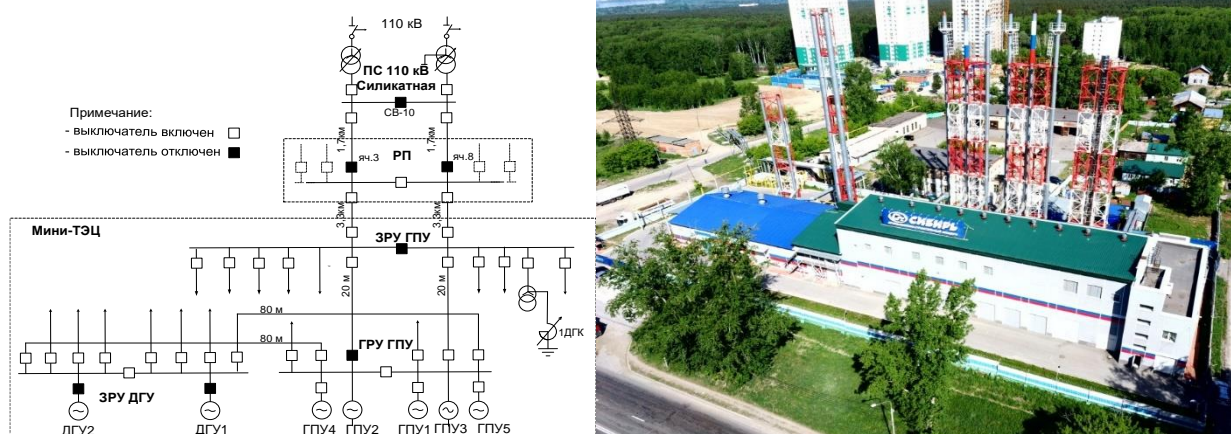


Рис. 1. Схема выдачи мощности мини-ТЭЦ и ее внешний вид

До внедрения ЛИЭС в 2021 году станция работала исключительно в автономном режиме, что порождало проблемы, связанные с частыми отключениями при резких изменениях нагрузки, внешних коротких замыканиях (КЗ) или отключении одной из ГПУ при неисправности. В 2016 году было установлено автоматическое устройство ввода резерва (АВР) от внешней сети без права параллельной работы генераторов ЛИЭС с внешней сетью, что позволило сократить время нарушения электроснабжения потребителей, но не решало проблему живучести станции. В 2021 году был введен в эксплуатацию программно-технический комплекс, обеспечивший безопасную параллельную работу генераторов ЛИЭС с внешней сетью, устранивший проблему надежности генерации энергии и увеличивший ее энергетическую и экономическую эффективность.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Краткое описание технических решений

Локальная система электроснабжения жилмассива «Березовое» стала пилотной площадкой для внедрения инновационной системной автоматики ПТК Минирид, разработанной при поддержке НТИ Энерджиет и АО «Россети Тюмень». Основная задача этой системы — безопасное и эффективное управление параллельной работой ЛСЭ с внешней сетью, что позволяет получить все преимущества параллельной работы стации с внешней сетью и устранить связанные с этим риски:

- Возникновение недопустимых ударных моментов на валах генераторов при КЗ во внешней сети.
- Увеличение токов КЗ, что может привести к повреждению оборудования и нарушению работы защит.
- Необходимость интеграции в систему оперативного управления внешней энергосистемы.

Автоматика ПТК Минирид снимает эти риски за счет высокоэффективных алгоритмов, использующих инновационные способы противоаварийного и режимного управления, которые обеспечивают: быстроедействие сбалансированное отделение ЛСЭ от внешней сети при возникновении аварийных ситуаций, таких как проходящие во внешней сети КЗ, с последующим переходом в автономный режим, автоматическую синхронизацию и повторное подключение к внешней сети после восстановления нормальных условий, что минимизирует риск развития аварийных ситуаций и время отключения потребителей.

Осуществляется комплексное управление ЛИЭС в котором:

- Режимная автоматика обеспечивает баланс между генерацией и потреблением по одному из нескольких сечений на пути выдачи мощности в сеть, что позволяет поддерживать возможность сбалансированного противоаварийного отделения в условиях меняющихся нагрузок и внешних факторов.
- Противоаварийная автоматика выявляет аварийные ситуации и, опережая действия защит внешней сети и генерирующего оборудования, осуществляет сбалансированное отделение по подготовленному сечению, предотвращая повреждения оборудования и сохраняя в работе станцию с собственной нагрузкой.
- Автооператор — ключевой элемент решения. Осуществляется автоматический выбор состава генерирующего оборудования и его загрузка, выбор сечения балансирования и режима работы (параллельный или автономный). Более подробно о технологии изложено в [1-5]

Опыт эксплуатации ЛИЭС

Одним из главных эффектов внедрения автоматики стало радикальное снижение времени нарушения электроснабжения потребителей. Так при работе в автономном режиме и погашении станции время восстановления нормального режима всех потребителей занимало до 20 минут. После установки АВР со

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

стороны внешней энергосистемы восстановление электроснабжения потребителей при остановке станции было равно времени работы АВР, но из-за отсутствия возможности параллельной работы, переход на электроснабжение от станции также занимал 20 минут, но только ночью, когда большинству потребителей этот переход был незаметен. Теперь же благодаря сбалансированному противоаварийному отделению ЛИЭС при параллельной работе прерывания электроснабжения потребителей практически нет. Примерная частота отделений от внешней сети находится около 2-х раз в месяц. На рис. 2 представлена осциллограмма реального сбалансированного отделения от внешней сети из-за проходящего внешнего КЗ, за 59 мс после возникновения возмущения, с последующей работой в автономном режиме.

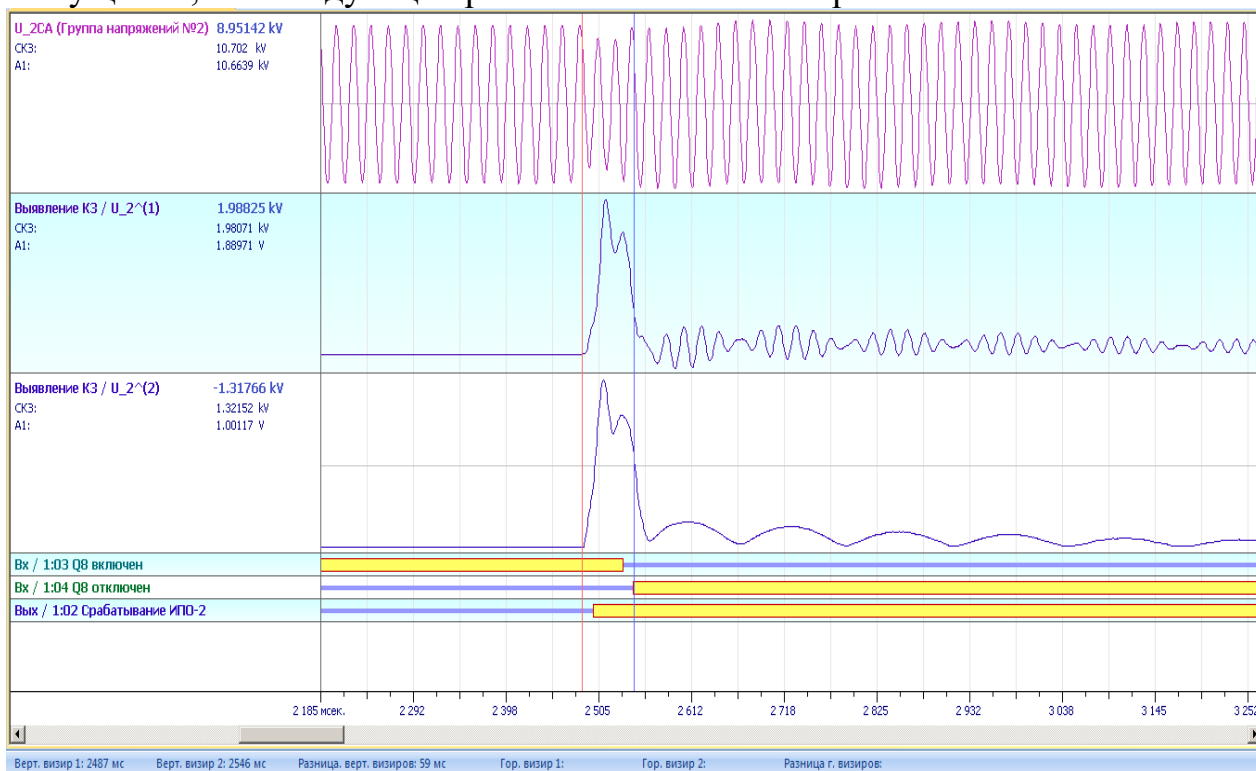


Рис. 2. Работа быстродействующего пускового органа, автоматики опережающего сбалансированного деления

Благодаря переходу на параллельную работу и эффективному управлению мощностью энергоблоков, удалось снизить удельный расход газа до 10% за счет отсутствия реакции регуляторов на колебания частоты в ЕЭС и работы ЛИЭС с перетоком мощности в коридоре допустимых небалансов.

Также увеличился коэффициент использования установленной мощности ГПУ, как за счет выдачи свободных мощностей в сеть, так и за счет увеличения вырабатываемой энергии за один и тот же моточас ГПУ при параллельной работе по отношению к автономному режиму, поскольку все динамические небалансы сглаживаются внешней энергосистемой и нет необходимости поддерживать соответствующий им вращающийся резерв. Таким образом, при одинаковой мощности нагрузки в автономном режиме будут работать 4 ГПУ, с загрузкой по

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

1350 кВт, а в параллельном режиме 3 ГПУ с загрузкой 1800 кВт, что на 25% уменьшает расход моторесурса станции.

При управлении режимом ЛИЭС в летнее время выяснилась необходимость реализации загрузки станции и выбора сечения балансирования из условия теплофикационного режима ЛСЭ, как наиболее экономически эффективного режима станции.

Перспективы и масштабируемость проекта

ЛИЭС жилмассива «Березовое» в городе Новосибирск, стала первым объектом такого типа и представляет собой успешный пример минирид, который может быть масштабирован и адаптирован для других регионов. В будущем планируется разработка и внедрение мультиагентной системы управления, которая позволит объединять несколько ЛИЭС в единую сеть или энергосистему.

Мультиагентная парадигма управления предполагает децентрализованное взаимодействие локальных систем управления различных ЛИЭС по определенным правилам, что позволит эффективно распределять ресурсы и гибко реагировать на аварийные возмущения и изменения в потреблении энергии. Это особенно актуально для районов с отсутствием централизованного электроснабжения.

Таким образом, ЛИЭС жилмассива «Березовое» может стать основой для перехода к новой модели распределенной энергетики, где локальные энергосистемы будут играть ключевую роль в обеспечении устойчивого и надежного электроснабжения.

Заключение

Трансформация энергорайона «Березовое», г. Новосибирск в ЛИЭС продемонстрировала успешное решение проблемы надежного электроснабжения. Внедрение передовых технологий управления и параллельная работа с внешней сетью позволили улучшить качество электроснабжения, снизить эксплуатационные расходы и повысить эффективность использования ресурсов.

Проект также открыл перспективы для дальнейшего развития и масштабирования применения в других районах и городах.

Библиографический список

1. Режимы и автоматика минирид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС / Фишов А.Г. Ивкин Е.С. Гилев О.В. Кокоша Ю.В // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №3. – С. 22-37;
2. Синхронизация Microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения / Фишов А.Г., Гуломзоде А.Х., Ивкин Е.С., Семендяев Р.Ю // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – №2. – С. 32-42;
3. Системная автоматика для интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети / Гежа Е.Н., Ивкин Е.С., Сердюков О.В., Глазырин В.Е., Глазырин Г.В., Марченко А.И., Семендяев Р.Ю., Фишов А.Г. // Релейщик. 2018. № 2 (32). С.24-31;

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

4. Decentralized emergency control of AC power grid modes with distributed generation / A. Fishov, A. Osintsev, A. Ghulomzoda, A. Marchenko [et al.]. – DOI 10.3390/en16155607. – Text: direct // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, iss. 15. – Art. 5607.

5. Fishov A.G. Synchronization of the parts of electrical networks with distributed energy sources after emergency or accident-prevention separation / A.G. Fishov, A.A. Osincev, A.K. Gulomzoda. – DOI 10.1007/s10749-023-01634-5. – Text: direct // *Power Technology and Engineering*. – 2023. – Vol. 57, iss. 1. – P. 136–144.

© Гилев О.В., Ивкин Е.С., Фишов А.Г., Холдин Д.В., 2024

СЕКЦИЯ I. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.311

1.1. Применение нейросетей для эффективного и точного тестирования релейной защиты в энергетических системах.

Пестряев Д.А., Руссова Н.В.

Чувашский государственный университет; Россия, Чебоксары.

Аннотация. Данный текст исследует потенциал использования нейронных сетей в тестировании релейной защиты. Автор демонстрирует, как нейросети, вдохновленные структурой человеческого мозга, способны обучаться, распознавать закономерности и принимать решения, что делает их ценным инструментом в различных областях, включая энергетику.

Текст также поясняет концепцию глубокого обучения как подмножества машинного обучения, которое позволяет анализировать огромные объемы данных и обнаруживать сложные закономерности. Автор утверждает, что глубокое обучение может быть особенно полезным в тестировании релейной защиты, где ручное проектирование сценариев может быть сложным.

Особое внимание уделяется архитектуре и работе нейронных процессоров (NPU), которые оптимизированы для обработки данных нейронных сетей. Текст подробно описывает ключевые компоненты NPU.

В заключение, автор подчеркивает преимущества применения нейронных сетей в тестировании релейной защиты, такие как повышение точности, автоматизация, сокращение времени на диагностику и предиктивное обслуживание. Внедрение нейросетей в энергетике открывает новые возможности для решения сложных задач и повышения эффективности работы систем электроснабжения.

Ключевые слова: нейронный процессор (NPU); глубокое обучение; тестирование релейной защиты.

Нейросети — это компьютерные системы, вдохновленные структурой и функционированием мозга. Они способны обучаться, распознавать закономерности и принимать решения на основе данных. В энергетике нейросети могут использоваться для прогнозирования спроса на энергию, управления энергосистемами и даже для обнаружения аномалий в работе оборудования.

Современные методы машинного обучения, включая нейросети, предоставляют возможность анализировать большие объемы данных и выявлять сложные закономерности.

Подобно традиционным парадигмам машинного, гибридного и ансамблевого обучения, глубокое обучение стремится имитировать работу человеческого мозга в его способности учиться на больших объемах данных. Он принимает необработанные данные, анализирует их, извлекает из них признаки и

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

использует их для составления прогнозов с невероятной степенью точности. Кроме того, подобно традиционным парадигмам машинного, гибридного и ансамблевого обучения, глубокое обучение является подмножеством машинного обучения. Обычно это нейронная сеть с несколькими скрытыми слоями. Количество скрытых слоев определяет глубину и степень сложности сети.

Концепция глубокого обучения возникла из необходимости анализировать огромные объемы данных. Глубокое обучение лежит в основе искусственного интеллекта, которое выполняют автоматизацию аналитических и физических задач без вмешательства человека (или с гораздо меньшим вмешательством). В то время как традиционная нейронная сеть с одним слоем будет делать соответствующие прогнозы, добавление большего количества скрытых слоев может помочь оптимизировать сеть и повысить ее точность.

При отсутствии понимания предметной области для проектирования сценариев тестирования, методы глубокого обучения будут предпочтительным выбором, поскольку они полностью устраняют необходимость ручной идентификации, извлечения и проектирования признаков.

Применение нейронных сетей для тестирования релейной защиты - это перспективное направление, которое открывает новые возможности для повышения эффективности и точности тестирования.

Нейросеть позволит реализовать точность и надёжность выполнения работы. Для этого используются NPU чип, ускоритель алгоритмов машинного обучения, которые позволяют системам воссоздать процесс по заданным параметрам, такие как напряжение, ток. Так же позволяет сократить время на диагностику и устранение неполадок. Кроме того, системы с нейросетями могут автоматически адаптироваться к изменениям в условиях работы, что делает их более гибкими и эффективными.

Архитектура и механизм работы NPU чипа.

Для того чтобы адаптироваться к условиям высокой производительности, использован специализированный процессор глубокого обучения для замены традиционных CPU или GPU для обработки алгоритмов.

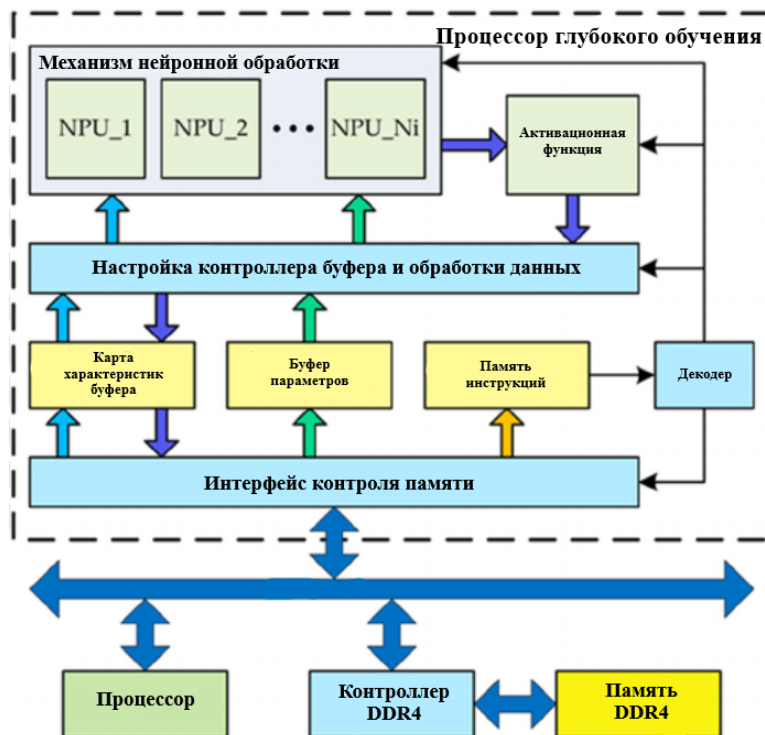


Рис. 1. Архитектура процессора глубокого обучения.

Архитектура нейронных процессоров может меняться в зависимости от цели реализации. Обычно она включает в себя следующие компоненты: регистры, блоки памяти магазинного типа, коммутатор, вычислительное устройство, включающее матрицу умножения, дешифраторы, триггеры и мультиплексоры, рис 1.

1) Механизм нейронной обработки представляет собой матрицу умножения – это основной компонент нейронного процессора, который выполняет операцию умножения векторов. Она принимает входной вектор и матрицу весов, чтобы вычислить взвешенную сумму входных данных.

2) Блоки памяти: Нейронный процессор использует различные виды блоков памяти для хранения весов, входных данных и выходных результатов.

3) Декодер перенаправляет данные между различными блоками памяти и матрицей умножения.

4) Контроллер буфера и обработки данных контролирует поток данных и выполнение операций в нейронном процессоре.

Механизм работы нейронного процессора основан на принципе работы искусственной нейронной сети. Он обрабатывает данные, передавая их через слои нейронов, каждый из которых выполняет определенную функцию. Входные данные проходят через слои, преобразуются и передаются дальше до тех пор, пока не достигнут выходного слоя. В процессе передачи данных происходит обучение нейронной сети, что позволяет ей улучшать свою способность предсказывать или классифицировать данные, рис. 2.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

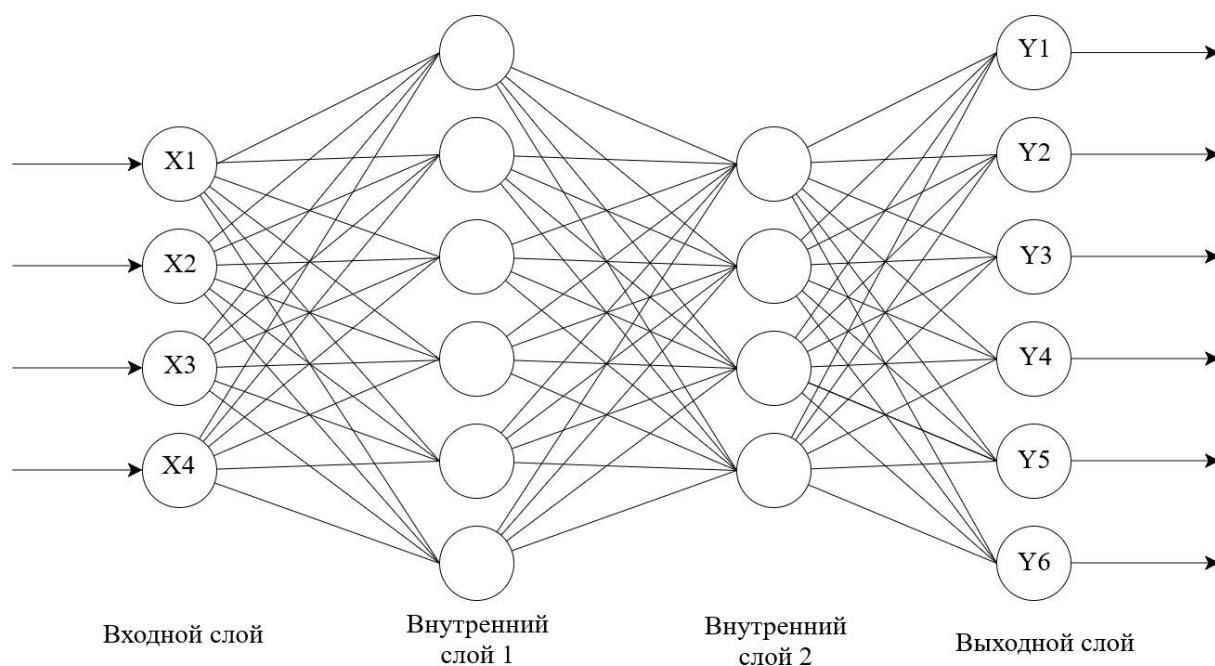


Рис. 2. Типовая структура сети.

В целом можно заметить сходство с теми же GPU. В основе лежит массив из множества процессорных юнитов. Это так называемый массив умножения-накопления, который содержит определенное число MAC юнитов. Эту аббревиатуру часто можно увидеть в описаниях параметров NPU-модулей.

Операции умножения-накопления лежат в основе рабочих нагрузок ИИ. В частности, для умножения матриц требуется две фундаментальных операции: умножение и сложение с аккумулярованием. Соответственно, чем больше число MAC-юнитов, тем выше производительность.

Блоки аппаратного ускорения ориентированы не только на умножение матриц, но и свертку, и/или потоковые операции. Проще говоря — выполнение множества относительно простых параллельных задач.

Основное направление исследования в повышении эффективности процесса тестирования релейной защиты, можно внедрить в систему программно-аппаратного комплекса нейросеть, с помощью которой при загрузке конфигурации шкафа релейной защиты в программное обеспечение для тестирования автоматически генерируется программа испытаний на основе алгоритмов. Это позволит существенно сократить время на подготовку к испытаниям и минимизировать вероятность человеческой ошибки при составлении программ тестов.

Кроме того, настройка характеристик релейной защиты без необходимости вручную задавать формулы проверки открывает новые возможности для автоматизации диагностики состояния оборудования. Нейросеть может обучаться на данных предыдущих испытаний, что позволит ей более точно предсказывать критические параметры оборудования и обеспечивать предиктивное обслуживание.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Рис. 3. Процесс реализации.

Процесс применения тестирования релейной защиты энергосистемы на основе алгоритма машинного обучения, рис. 3. Во-первых, он собирает информацию, относящуюся к релейной защите, такую как количество защит, уставки защит и т.д. Затем оценивается, достаточна ли собранная информация для алгоритма машинного обучения, и если объема данных недостаточно, то информация о релейной защите должна дополниться. Алгоритм непрерывно собирает данные; как только информации о релейной защите, требуемой алгоритмом, становится достаточно, запускается алгоритм машинного обучения для распознавания защит и получения алгоритма тестирования, извлечения характеристик отключения, необходимых для релейной защиты. Наконец, определяется, удовлетворяются ли условия параметров, и если ответ положительный формируя готовый сценарий проверки.

Энергетический сектор сталкивается с разнообразными проблемами, которые уже не могут быть адекватно решены только с помощью традиционных подходов и инструментов. Вычислительные возможности нескольких схем искусственного интеллекта оказались настоящими инструментами в обеспечении новых и эффективных способов решения многих существующих и

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

возникающих проблем, с которыми сталкивается сектор. В итоге, использование нейросети в тестировании релейной защиты является перспективным направлением, которое может значительно повысить эффективность и надежность работы систем электроснабжения.

Библиографический список

1. Zhenmin Z. Research on Intelligent Testing Method of Relay Protection Equipment based on Machine Learning Model / Z. Zhenmin , N. Wohu, S Baozhong, L Qiang // 2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). Китай. 2018. 148-152 с.

2. Крайнов К.Р. Интеграция интеллектуальных систем автоматического управления в энергосистемы: преимущества и недостатки / К.Р. Крайнов, // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник». Москва. 2023. 5148-5160 С.

3. Hastie T. The Elements of Statistical Learning, 2nd edition / Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. // Германия, 2009. – 533 с.

4. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. – М.: 2013. – 387 с

5. Макаров И.М. Интеллектуальные системы автоматического управления / И.М. Макаров, В.М. Лохина // Издательство ФИЗМАТЛИТ. Москва. 2001.

© Пестряев Д.А., Руссова Н.В., 2024

УДК 621.317

1.2. Применение накопителей энергии в локальных системах электроснабжения

Голобоков С.В., Михайлов С.А.,

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Дудин А.В., Ушаков К.С.,

Мордовский национальный исследовательский университет

им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Решением проблем современной энергетики, и в частности, электроэнергетики, является внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). При этом, традиционные источники энергии, такие как уголь, нефть и газ, при сжигании наносят вред для окружающей среды и их запасы ограничены. В мировой энергетике проводится планомерная работа по снижению выбросов парниковых газов и борьбой с глобальным изменением климата.

Сектор альтернативных источников энергии, включая солнечные, ветровые и гидроэлектростанции активно развивается в 21 веке. Однако ВИЭ имеют ряд недостатков, которые не позволяют выполнить простую замену традиционных источников энергии. Нестабильность производства энергии не обеспечивает бесперебойность электроснабжения. Мощность ВИЭ зависит от природных

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

условий, таких как ветер, солнечный свет или поток воды. Из-за этого производство энергии может быть нестабильным и изменчивым.

Главной проблемой, препятствующей широкому внедрению ВИЭ, является отсутствие эффективных способов хранения, невозможность запасания произведенной энергии в промышленных масштабах [1]. В периоды времени с благоприятными погодными условиями мощность генерации может превышать потребности в несколько раз. Однако для поддержания баланса в энергосистеме ее приходится ограничивать. В периоды с неблагоприятной погодой мощность ВИЭ снижается, в энергосистеме возникает дефицит мощности.

Чтобы обеспечить устойчивость энергосистемы и надежность электроснабжения потребителей необходимо запастись электроэнергией, произведенную ранее, в промышленных масштабах. Для электростанции со среднесуточной мощностью около 10 МВА необходимо иметь запас электроэнергии на 3 суток простоя, примерно 720 МВтч. Для решения этих проблем активно развиваются различные системы накопления электроэнергии [2].

Системы накопления электроэнергии используют различные принципы – электрические, механические, тепловые, пневматические и гидравлические. Электрические накопители основаны на аккумуляторных батареях. Запасаемая мощность одного аккумулятора не превышает 1,5 кВтч. Другим недостатком является низкое напряжение – 12, 24 или 48 В. Батарейные системы являются популярными в электроснабжении жилых домов, так как они компактны и легки в установке. Но решить глобальные проблемы энергетики они не могут.

Тепловые аккумуляторы могут работать на промышленных объектах, запастись энергией в больших масштабах. Но преобразование тепловой энергию в электрическую идет с низким КПД. Кроме того длительное хранение неизбежно связано с потерями и снижает их эффективность. В настоящее время тепловые аккумуляторы в промышленности для электроснабжения не используются.

Наиболее широкое распространение получили гидравлические системы, гидроаккумулирующие электростанции. Станции способны запастись энергией в виде массы воды и хранить ее длительное время. Величина запасаемой мощности может достигать тысяч МВтч. Недостатком является значительная территория, наличие реки, рельеф местности, ограничения по погодным условиям, высокая стоимость. Гидроаккумулирующие станции более подходят к энергосистемам, чем к локальным объектам ВИЭ [2].

Одним из перспективных направлений стали суперконденсаторы, которые применяются в системах накопления электроэнергии. Суперконденсаторы – это уникальные устройства, которые способны накапливать и хранить энергию при очень высокой плотности энергии [3]. Они обладают высокой энергоемкостью и способностью быстро заряжаться и разряжаться, что делает их идеальными для использования в различных устройствах большой мощности.

Российский производитель «TITAN POWER SOLUTION» предлагает суперконденсаторную систему накопления энергии, модель ССНЭ-М-9.2-920 [4].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Согласно проспекта, емкость одного блока составляет 9.2 Ф, номинальное напряжение 920 В. Объем запаасаемой энергии составляет 4,5 МДж, выдаваемый объем до снижения напряжения наполовину равен 3,4 МДж или 0,8 кВтч. Высокомощный емкостный накопитель для систем хранения и рекуперации энергии позволяет наращивать ёмкости и напряжение. Имеется возможность последовательного подключения блоков в модули до 1500 В. Область применения – сети предприятий с технологией SMART GRID И MICROGRID.

Автономная система электроснабжения предприятия построена на солнечной электростанции (СЭС) с установленной мощностью 32 кВт. Установленная мощность приемников на предприятии 8 кВт, среднесменная мощность 2,5 кВт. Продолжительность рабочей смены 10 часов. Ночью мощность не превышает 200 Вт. Суточный объем потребления электроэнергии равен 30 кВтч, в месяц необходимо 900 кВтч. Предприятие удалено от централизованных сетей. Резервирование выполняется дизель-генератором мощностью 16 кВт.

В качестве базового элемента генерации приняты современные солнечные панели «Silasolar-400vt», производства компании «Solar-e» КНР. Для солнечных панелей удельная мощность при освещенности 1000 Вт/м² равна 400 Вт [1]. Мощность СЭС зависит от площади, которую занимают солнечные панели. В сельской местности СЭС может располагаться на пастбищах на территории сельского поселения. Для подключения к сети 220 В применен инвертор с входным напряжением 345 В.

Для получения такого напряжения 8 солнечных панелей включены в линейку последовательно. Каждая панель в пике выдает ток 10 А. Для увеличения тока СЭС принято 10 линеек, общее число солнечных панелей равно 80. Для средних широт в нашей стране солнечная активность снижается и пиковая мощность уменьшается до 360 Вт/м² [5]. С учетом конструктивной установки панелей, транспортных коридоров и размещения объектов на территории СЭС средняя сменная мощность в центре Европейской части России не превышает 200 Вт/м².

Мощность солнечных панелей зависит от уровня солнечной радиации, будет изменяться в течение светового дня, времени года и погодных условий. На рис. 2 представлен суточный график инсоляции для средних широт в летний период и эффективная мощность на поверхности солнечной панели, закрепленной под углом 45⁰ к горизонту, в направлении панелей на юг [5].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

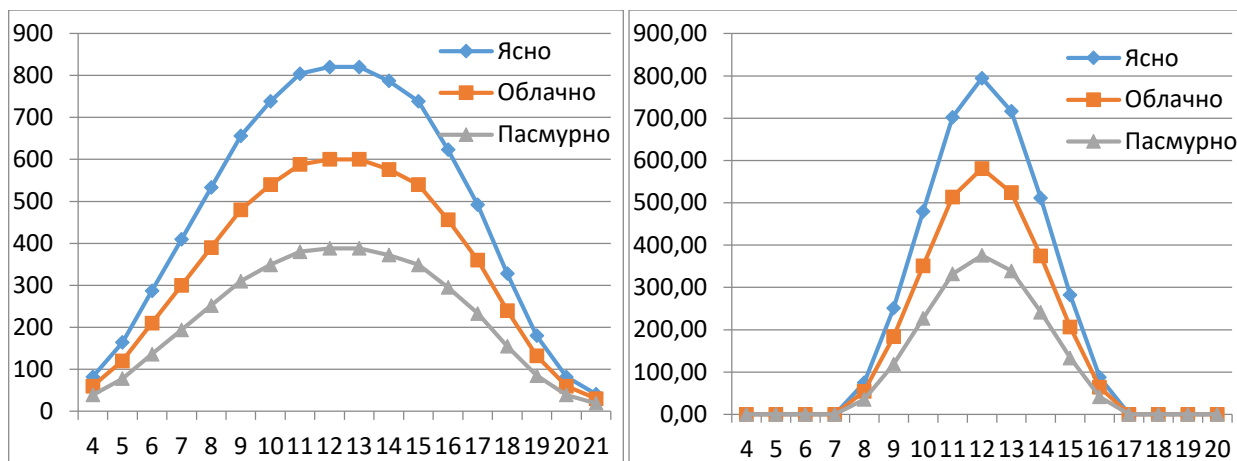


Рис. 1. Суточный график инсоляции и мощности облучения панелей в Вт/м².

Анализ графиков показывает, что максимальная мощность летом, в пасмурную погоду меньше пиковой в 2 раза. Мощность инсоляции зимой, в ясную погоду, также меньше летнего максимума почти в 2 раза. Максимальная мощность будет генерироваться в полдень, в течение времени не более часа. В остальные часы светлого времени суток мощность генерации всегда ниже максимальной. Время работы СЭС будет меньше продолжительности светового дня на 4-5 часов.

Для выбора числа и мощности солнечных панелей, подбора накопителей и оптимизации структуры СЭС разработана математическая модель [5]. Величины, относящиеся к ясной погоде, имеют индекс 1, облачная погода – индекс 2, пасмурная погода – индекс 3. Выработка электроэнергии СЭС за месяц равна их сумме. Результаты расчета выдаваемого тока, генерируемой мощности, суточных и месячных объемов выработки электроэнергии представлены в таблице 1 и 2.

Анализ полученных данных показывает, что среднесменная мощность СЭС летом составляет 90 кВт, - зимой 31 кВт. Суммарный объем выработки в летний месяц 2650 кВтч, в зимний – 765 кВтч, в среднем за год – 1620 кВтч. Дефицит генерации зимой 135 кВтч, которые будут получены от резервного источника.

При расчете объемов генерации использованы статистические данные для Поволжья, в модели принято ясных дней в летний месяц – 5, облачных – 15, пасмурных 10. Зимой соответственно 3 дня погода была ясной, 12 облачной и 13 пасмурной. Три дня шел снег, генерация СЭС близка к нулю. Генерация в летний месяц превышает расход электроэнергии почти в 3 раза. В зимний месяц наблюдается дефицит, примерно 15% от месячного потребления. Расход электроэнергии зимой и летом принят одинаковым.

Таблица 1. Мощность и объем выработки электроэнергии за месяц летом

t	I_1	I_2	I_3	P_1	P_2	P_3	W_1	W_2	W_3
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

ч	A	A	A	кВт	кВт	кВт	кВтч	кВтч	кВтч
8	7,05	5,23	3,41	2,43	1,80	1,17	12,13	26,99	11,73
9	23,86	17,5	11,36	8,21	6,02	3,91	41,04	90,30	39,08
10	45,68	33,41	21,59	15,71	11,49	7,43	78,57	172,40	74,27
11	67,05	49,09	31,59	23,07	16,89	10,87	115,33	253,30	108,67
12	75,91	55,45	35,91	26,11	19,07	12,35	130,57	286,12	123,53
13	68,41	50	32,27	23,53	17,20	11,10	117,67	258,00	111,01
14	48,86	35,68	22,95	16,81	12,27	7,89	84,04	184,11	78,95
15	26,82	19,77	12,73	9,23	6,80	4,38	46,13	102,01	43,79
16	8,41	6,14	3,86	2,89	2,11	1,33	14,47	31,68	13,28
Всего				127,99	93,66	60,43	639,93	1404,91	604,30

Таблица 2. Мощность и объем выработки электроэнергии за месяц зимой

t	I_1	I_2	I_3	P_1	P_2	P_3	W_1	W_2	W_3
ч	A	A	A	кВт	кВт	кВт	кВтч	кВтч	кВтч
10	17,57	12,37	7,44	6,04	4,26	2,56	18,13	51,08	35,85
11	25,79	18,18	10,89	8,87	6,25	3,75	26,61	75,05	52,46
12	29,20	20,54	12,38	10,04	7,06	4,26	30,13	84,78	59,64
13	26,31	18,52	11,13	9,05	6,37	3,83	27,15	76,44	53,59
14	18,79	13,21	7,91	6,46	4,55	2,72	19,39	54,55	38,11
15	10,32	7,32	4,39	3,55	2,52	1,51	10,65	30,23	21,14
Всего				44,02	31,01	18,63	132,07	372,13	260,79

Дальнейшее наращивание мощности солнечных панелей экономически нецелесообразно [5], поскольку ввиду неблагоприятных погодных условий гарантировать бесперебойное электроснабжение с любым числом панелей невозможно. Критическим периодом для выбора числа и мощности солнечных панелей будет зимний период. Объем генерации снижается ввиду падения инсоляции и сокращения светового дня. Также сказывается ненастная погода.

При выборе емкости накопителя следует учитывать распределение ясных, облачных и пасмурных дней в течение месяца. По статистическим данным ненастная погода в среднем длится 3-4 дня. Однако аномальные изменения погоды могут приводить к простою СЭС на срок более недели. В этом случае емкости накопителя на весь срок не хватает и потребуется резервный генератор.

Для расчета числа дней отключения приемников выполнено моделирование расхода и зарядки накопителя. Расчеты выполнены для накопителей с емкостью 50, 80 и 100 кВтч. Поскольку емкость одного блока составляет 0,8 кВтч, для построения модулей с заданными емкостями понадобится 62, 100 и 125 блоков. При расчетах в модели учитывалось, что в начало месяца модули выходят с полной зарядкой. Графики заряда накопителей представлены на рис. 2.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

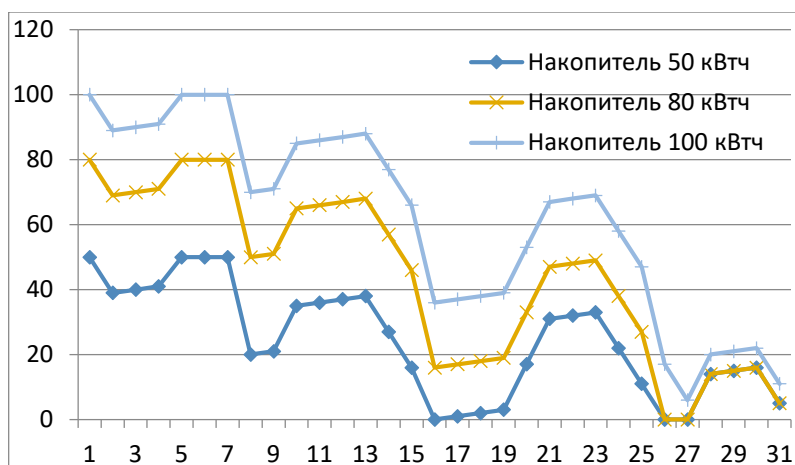


Рис. 2. Энергия накопителя, полностью заряженного в начале месяца

Суточный баланс энергосистемы равен разности объемов генерации и потребления электроэнергии. Суточный баланс может быть как положительным, так и отрицательным. Остаточный заряд накопителя получается путем сложения заряда на начало суток с суточным балансом. Если суммарный заряд превышает емкость накопителя, значит в течение суток была избыточная генерация. Заряд берется равным полной емкости накопителя. Если в текущих сутках заряд получился с минусом, значит объемов генерации и остаточного заряда для покрытия нагрузок не хватило. Заряд накопителя берется равным нулю. В этом случае для питания нагрузки включается резервный генератор.

Анализ графиков показывает, что заряд накопителя 50 кВтч в течение месяца три раза выходил в ноль. Трое суток мощностей СЭС и накопителя для питания нагрузок было недостаточно. Накопитель 80 кВтч отключался 2 раза. Емкости накопителя 100 кВтч для питания нагрузок достаточно, отключения в течение месяца не было. При этом 3 дня в начале месяца все накопители были заряжены. СЭС покрывала мощность нагрузок, заряжала накопитель и могла выдавать большую мощность, но ее генерация была ограничена отсутствием нагрузки.

На практике полностью заряженный накопитель будет только летом, когда мощность генерации СЭС избыточна. В летние месяцы отключение нагрузки вследствие разряда накопителя маловероятно, часть солнечных панелей может быть отключена. Для проверки бесперебойности электроснабжения с частичной зарядкой накопителя были выполнены расчеты для накопителя, заряженного наполовину. Графики зависимостей представлены на рис 3.

На всех трех графиках видна тенденция ступенчатого снижения остаточного заряда. В неблагоприятный период в середине месяца наблюдается отключение накопителей 50 и 80 кВтч, а в конце месяца – отключение всех трех накопителей. Если остаточный заряд накопителя в начале месяца будет менее половины, число отключений увеличится. В конце месяца графики совпадают, на частоту отключения емкость накопителя не влияет. Для системы электроснабжения выбран накопитель емкостью 50 кВтч. В условиях дефицита мощности зимой полностью закрыть провалы генерации ни один накопитель не способен.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

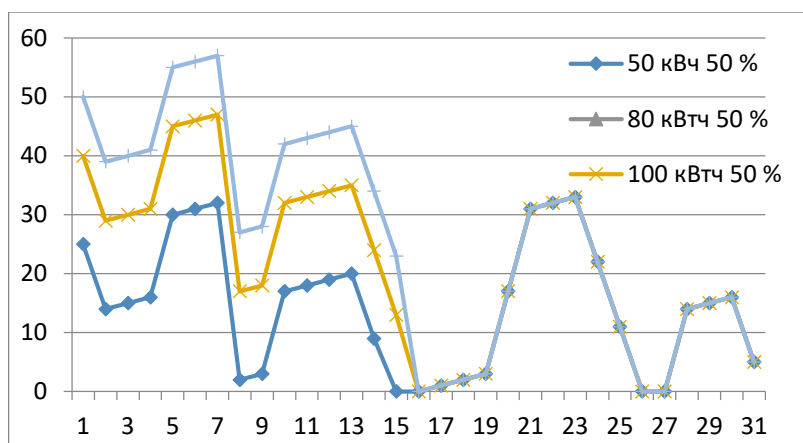


Рис. 3. Энергия накопителя, заряженного в начале месяца наполовину.

В США был проведен удачный эксперимент по использованию накопителя на суперконденсаторах [3] в солнечной электростанции, питающей кампус университета. Но пока широкого применения для сглаживания пиков нагрузки системы хранения электроэнергии на основе суперконденсаторов не получили.

Выводы

СЭС с накопителем обеспечивает электроснабжение объектов круглые сутки. Расчет на модели показал, что применение накопителей 100 кВтч снижает число отключений нагрузки в течение месяца в неблагоприятные дни. Установленная мощность СЭС выбирается по зимнему режиму и превышает расчетную нагрузку 5 раз. Увеличение емкости накопителя свыше 50 кВтч неэффективно. В будущем суперконденсаторы могут стать обязательной частью современных энергосистем и заменят традиционные аккумуляторы. Накопители электроэнергии позволят увеличить энергоэффективность и устойчивость энергосистем.

Библиографический список

1. Проектирование распределительных сетей солнечной электростанции. Агеев В.А., Голобоков С.В., Тихомирова А.А., Клейменов А.В. В сборнике: Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Материалы Международной научно-практической конференции. Саранск, 2023. С. 177-188.
2. Васильев А. Накопители энергии для эффективной работы энергосистемы. – URL: <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/5399/> (дата обращения 10.08.2024). - Текст: электр.
3. Графеновый суперконденсатор. – URL: <http://congeniator.com/революция-суперконденсаторов/> (дата обращения 02.08.2024). – Текст: электр.
4. ССНЭ-М-9.2-920 Суперконденсаторная система накопления энергии. – URL: <http://www.titanps.ru> (дата обращения 20.05.2024). - Текст: электр.
5. The Complex Optimized of the Solar Power Plant V.Goryachev, S.Golobokov, A. Michaylov Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future".- 24 March 2022. - URL: <https://dx.doi.org/10.2991/aer.k.220308.011>

© Голобоков С.В., Михайлов С.А., Дудин А.В., Ушаков К.С., 2024

УДК 621.3.048

**1.3. Интеллектуальный прибор для диагностики энергетического
оборудования**

Валюк А.С. студент

науч. руководитель: Галиева Т.Г.

Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Российская Федерация

В современном мире все больше отраслей и инфраструктуры полагаются на сложное энергетическое оборудование. Поэтому эффективная диагностика и мониторинг становятся важнее прежде. Традиционные методы проверки и диагностики могут быть трудоемкими, дорогостоящими и рискованными. Но благодаря новым технологиям, мы можем предложить интеграцию контактных и бесконтактных диагностических систем.

Важность мониторинга состояния энергетического оборудования в условиях повышенной нагрузки и быстрого развития технологий неоспорима. Это позволяет оперативно реагировать на проблемы, планировать профилактические мероприятия и повышать эффективность работы энергосистем [1, с.545].

Неконтактные системы, использующие такие технологии, как инфракрасная термография и акустический мониторинг, предлагают удаленный мониторинг и мониторинг в реальном времени без физического контакта. Эти системы обеспечивают непрерывный мониторинг, раннее обнаружение разломов и предсказательное обслуживание, тем самым повышая надежность оборудования и сокращение времени простоя [2, с.15].

Предлагаем прибор для определения технического состояния энергетического оборудования подстанций с использованием ультразвуковых датчиков. Эти датчики расположены по периметру подстанций и синхронизированы между собой. В лаборатории КГЭУ мы провели эксперимент, используя ультразвуковой прибор - NL камеру, для обнаружения дефектов изоляторов. Мы использовали разбитый стеклянный высоковольтный изолятор и бездефектный изолятор, подавая на них напряжение 9 кВ с помощью АИД70М. Измерения с помощью камеры проводились на расстоянии 2 м от объектов исследования. Мы обнаружили, что интенсивность разряда увеличивается с течением времени и может привести к полному разрушению изоляции. На основе нашего анализа, рекомендуется произвести ремонт или замену поврежденных компонентов, чтобы предотвратить возможное полное разрушение изоляции (Рисунок 1,2) [3-4].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Рис. 1. Проведенные исследования

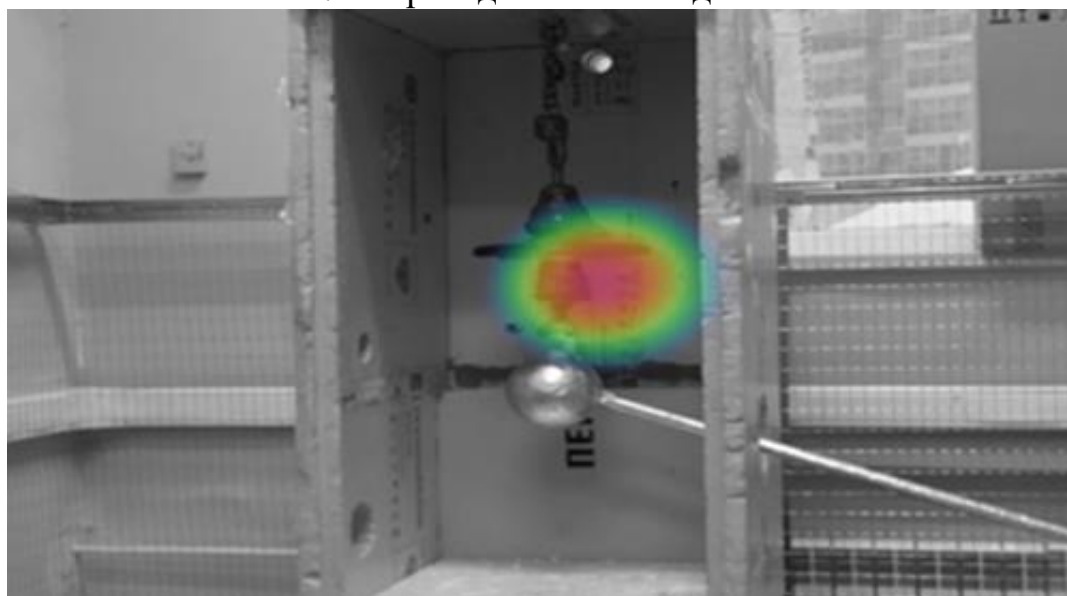


Рис. 2. Установка лабораторного стенда

Интеллектуальный прибор для контактной и бесконтактной диагностики энергетического оборудования с предиктивным анализом с использованием ультразвуковых датчиков, решает проблему оперативного и точного обнаружения дефектов и неисправностей в энергетическом оборудовании. Потенциальные потребители, такие как энергетические компании, инженерные службы и технические специалисты, сталкиваются с необходимостью регулярной проверки и обслуживания оборудования, чтобы предотвратить аварии и повысить эффективность работы системы. Использование данного продукта позволит им проводить более точную и надежную диагностику, что в свою очередь поможет избежать непредвиденных простоев и значительно сэкономить время и ресурсы на ремонте и замене оборудования [5-6].

Данный прибор имеет следующие преимущества:

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Высокая точность диагностики: Использование ультразвуковых датчиков позволяет обнаруживать даже мельчайшие дефекты и неисправности в энергетическом оборудовании, что способствует оперативному выявлению проблем.

2. Предиктивный анализ: Программное обеспечение проекта позволяет анализировать данные и делать предиктивные прогнозы отказов оборудования, что помогает предотвращать аварийные ситуации и планировать профилактические работы.

3. Удобство использования: Компактный и портативный дизайн прибора делает его удобным для использования на месте работы, что повышает эффективность процесса диагностики.

4. Облачное хранилище данных и удаленный мониторинг: Возможность подключения к облачным сервисам позволяет хранить данные, а также осуществлять удаленный мониторинг состояния оборудования, что обеспечивает оперативную реакцию на возможные проблемы.

5. Экономия времени и ресурсов: Благодаря возможности проведения как контактной, так и бесконтактной диагностики с использованием ультразвуковых датчиков, процесс проверки оборудования становится более быстрым и эффективным, что экономит время и ресурсы предприятия.

Актуальность и значимость создания интеллектуального прибора для контактной и бесконтактной диагностики энергетического оборудования с предиктивным анализом очевидна из-за нескольких ключевых факторов:

1. Повышение надежности и безопасности: Точная диагностика состояния энергетического оборудования позволит оперативно выявлять потенциальные проблемы и предотвращать аварии, что приведет к снижению вероятности отказов и повышению безопасности работы.

2. Экономическая эффективность: Предиктивный анализ позволит оптимизировать расходы на техническое обслуживание и ремонт оборудования, так как позволит планировать работы заранее и избегать неожиданных поломок.

3. Увеличение производительности: Благодаря возможности мониторинга оборудования в реальном времени и оперативному реагированию на возникающие проблемы, производственные процессы могут быть более стабильными и эффективными.

Известные аналоги применяют только один вариант диагностики: контактный или бесконтактный. Более того многие не проводят предиктивный анализ и не выдают заключения о дальнейших действиях (таблица 1) [7].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Таблица 1 – Сравнение аналогов

Прибор	Возможность бесконтактной и контактной работы	Датчик фазы	Определение технического состояния оборудования в реальном времени
NL Camera	-	-	+
Разрабатываемый интеллектуальный прибор	+	+	+
Ultraprobe	-	-	-
DIM-Loc	-	-	-

Результаты для предиктивного анализа используются на основе собственных экспериментов, а также на основе готовых данных для анализа: для бесконтактного метода используется стандарт ПАО «Россети» «Локализация дефектов и измерение уровня разрядной активности в высоковольтном оборудовании акустическим методом с помощью ультразвуковых детекторов»; для контактного анализа используются данные из монографии Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования (Наука, 2007).

Конструктивные особенности проекта включают в себя:

1. Использование ультразвуковых датчиков высокой чувствительности для обнаружения дефектов и неисправностей в энергетическом оборудовании.
2. Разработка специализированного программного обеспечения для анализа полученных данных и предиктивного прогнозирования возможных отказов.
3. Создание компактного и портативного устройства, обеспечивающего удобство использования на месте работы.
4. Возможность подключения к облачным сервисам для хранения и анализа данных, а также для удаленного мониторинга состояния оборудования.

Таким образом, проект представляет собой инновационное решение, которое сочетает в себе передовые технологии для точной диагностики энергетического оборудования с возможностью предиктивного анализа, что позволяет повысить надежность и безопасность работы оборудования. Прибор объединяет передовые технологии ультразвуковой диагностики с возможностями предиктивного анализа, что позволяет оперативно выявлять проблемы в энергетическом оборудовании и предотвращать аварийные ситуации.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Библиографический список

1. Хохлов А.В., Воркунов О.В., Афанасьева Т.И. Анализ современных методов и средств диагностики изоляторов воздушной линии электропередачи // Вестник современных исследований. 2018. Т. 20, № 5-3. – С. 545–547.
2. Вдовико В.П. Методология системы диагностики электрооборудования высокого напряжения // Электричество. – 2010. – № 2. – С. 14-20.
3. Мордкович А.Г., Туркот В.А. Проблемы и перспективы применения систем мониторинга и оперативной диагностики трансформаторного оборудования // Сборник докладов IX Международного симпозиума «Электротехника 2030», Москва, 2007 г. – С. 7.
4. Загоскин Р.И., Гук А.А. Опыт эксплуатации систем мониторинга высоковольтного оборудования на объектах ПАО «ФСК ЕЭС» // Энергия единой сети. – 2016. – № 5 (28). – С. 48-54.
5. Овсянников, А.Г. Частичные разряды и диагностирование оборудования высокого напряжения / А.Г. Овсянников. – Новосибирск: монографии НГТУ, 2023. – 255 с.
6. Русов, В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В.А. Русов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 368 с.
7. СТО «Системы и устройства диагностики состояния оборудования подстанций и ЛЭП»: дата введения 2009-20-07. – Москва: НП «ИНВЭЛ», 2009. – 183 с.

© Валюк А.С., 2024

УДК 629.35

1.4. Влияние электромобилей на инфраструктуру города Казань

Дюндина В.П., Хуснутдинов А.Н.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Электромобили стремительно меняют облик современного транспорта, представляя собой экологически чистую альтернативу традиционным автомобилям с двигателями внутреннего сгорания. В последние годы мы наблюдаем значительное увеличение их популярности, что вызывает необходимость адаптации и развития транспортной инфраструктуры. В этой статье мы рассмотрим, как электромобили влияют на транспортную инфраструктуру города и какие изменения нам стоит ожидать в будущем.

1. Рост популярности электромобилей

Причины Популярности

-Экологичность: электромобили не выделяют выхлопных газов, что значительно снижает уровень загрязнения воздуха.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

-Экономичность: благодаря более низкой стоимости электроэнергии по сравнению с топливом и уменьшенным затратам на обслуживание, электромобили становятся более экономически выгодными.

-Технологический прогресс: улучшение аккумуляторных технологий увеличивает запас хода электромобилей и снижает время зарядки.

Влияние на Рынок

Согласно данным международного энергетического агентства, количество электромобилей на дорогах мира превысило 10 миллионов в 2020 году и продолжает расти. Автопроизводители активно инвестируют в развитие электромобилей, что делает их доступнее для широкой аудитории. [1]

2. Развитие зарядной инфраструктуры

Рост числа электромобилей требует создания обширной сети зарядных станций, чтобы обеспечить удобство использования и снять беспокойства о запасе хода.

Доступность зарядных станций: ключевой фактор, влияющий на принятие электромобилей. Увеличение числа станций снижает риск остаться без заряда.

Скорость зарядки: современные технологии позволяют значительно сократить время зарядки, что делает электромобили более привлекательными для потребителей.

Виды зарядных станций

Медленная зарядка (Level 1): использует стандартные бытовые розетки и подходит для ночной зарядки дома.

Ускоренная зарядка (Level 2): требует установки специального оборудования и используется как в домашних условиях, так и на общественных станциях.

Быстрая зарядка (Level 3/DC Fast Charging): позволяет заряжать аккумуляторы за короткий промежуток времени и устанавливается на магистралях и в местах высокой проходимости.

Инновации в Зарядных Технологиях

Беспроводная зарядка: разрабатываются технологии, позволяющие заряжать автомобили без использования кабелей, что увеличивает удобство использования.

Интеллектуальные сети: системы управления зарядкой, которые оптимизируют потребление энергии и снижают нагрузку на электросеть. [2]

3. Влияние на Городскую Инфраструктуру

Переосмысление городского пространства

Электромобили стимулируют изменение подходов к планированию городских пространств.

Экологически чистые зоны: города разрабатывают зоны с ограничением въезда автомобилей с ДВС, продвигая использование электромобилей.

Зелёные транспортные решения: совмещение электромобилей с общественным транспортом и велосипедной инфраструктурой для создания устойчивых транспортных систем.

Интеграция с умными городами

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Электромобили становятся частью концепции умных городов, где технологии используются для улучшения качества жизни.

Датчики и IoT: использование датчиков и интернета вещей для мониторинга транспортных потоков и оптимизации дорожного движения.

Системы управления транспортом: интеграция электромобилей в системы управления движением, включая каршеринг и автономные автомобили. [3]

4. Экологические и экономические влияния.

-Уменьшение углеродного следа: электромобили помогают снизить выбросы углерода и улучшить качество воздуха в городах, что способствует борьбе с изменением климата.

-Возобновляемые источники энергии: сочетание электромобилей с возобновляемыми источниками энергии делает транспортную систему более устойчивой.

-Постепенное снижение зависимости от нефти: переход на электромобили способствует уменьшению потребления ископаемых видов топлива.

Экономические перспективы

-Развитие электромобильной индустрии создаёт новые возможности для экономического роста и занятости.

-Новые рабочие места: появление новых рабочих мест в сфере производства электромобилей и зарядной инфраструктуры.

-Инвестиции в исследования и разработки: усиление инвестиций в технологические инновации и развитие аккумуляторных технологий.

Электромобили играют важную роль в трансформации транспортной инфраструктуры, предлагая экологически чистую и экономически выгодную альтернативу традиционным транспортным средствам. Их распространение требует адаптации городской инфраструктуры и развития зарядных сетей, а также стимулирует развитие новых технологий и экономических возможностей. Будущее транспорта зависит от нашей готовности принять эти изменения и создать устойчивую транспортную систему, которая будет отвечать вызовам времени. [4]

Электромобили оказывают значительное влияние на городской транспорт, и это влияние можно рассмотреть с различных аспектов:

1. Снижение выбросов.

2. Шумовое загрязнение: электромобили работают тише, чем традиционные автомобили с ДВС, что способствует снижению уровня шума в городах. Это может улучшить условия жизни и сделать улицы более комфортными для пешеходов и велосипедистов.

3. Инфраструктура: появление электромобилей требует развития зарядной инфраструктуры. Это может привести к созданию новых зарядных станций, что изменит городской ландшафт и потребует новых подходов к планированию городской инфраструктуры.

4. Государственная политика: многие города внедряют программы по стимулированию использования электромобилей, включая налоговые льготы,

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

субсидии на покупку и доступ к выделенным полосам движения. Это может ускорить переход на электрический транспорт.

5. Экономические аспекты: электромобили могут снизить затраты на топливо для пользователей, но также могут потребовать инвестиций в новые технологии и зарядные станции. Это может повлиять на экономику городского транспорта и вызвать изменения в тарифной политике. [5]

6. Инновации и технологии: развитие электромобилей стимулирует инновации в области аккумуляторов, автономного вождения и других технологий, что может привести к дальнейшим изменениям в городской транспортной системе.

7. Изменение транспортных потоков: с ростом популярности электромобилей могут измениться маршруты и модели передвижения. Например, увеличение использования каршеринга и такси на электротранспорте может снизить общее количество автомобилей на дорогах. [6]

Аспект изменения транспортных потоков очень интересен и может быть рассмотрен со стороны внедрения электрического городского общественного транспорта. В настоящее время город Казань внедряет в свои системы все больше электробусов, но на старые маршруты.

Можно рассмотреть новые маршруты, которые будут пользоваться большим спросом и уменьшать загруженность остальных автобусов. Одним из таких маршрутов может стать этот: Казань2-Казань1-Тукая-Ометьево-Дубравная-Аэропорт. Он будет разделяться на 2 разных маршрута: №1 (Казань2-Казань1-Тукая-Ометьево) показан на рис.1 и №2 (Ометьево-Дубравная-Аэропорт) представлен на рис.2, пересадочное время между ними будет со льготной оплатой. Эти пункты очень связаны между собой, так как автовокзалы, железнодорожные вокзалы, аэропорт и остановка междугороднего такси требуют возможности быстрого и комфортного перемещение между собой.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

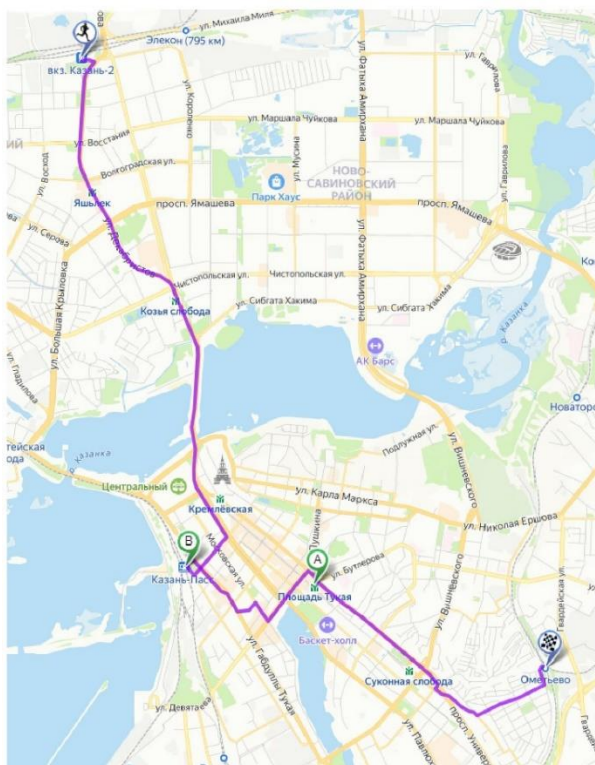


Рис. 1. «Маршрут № 1»

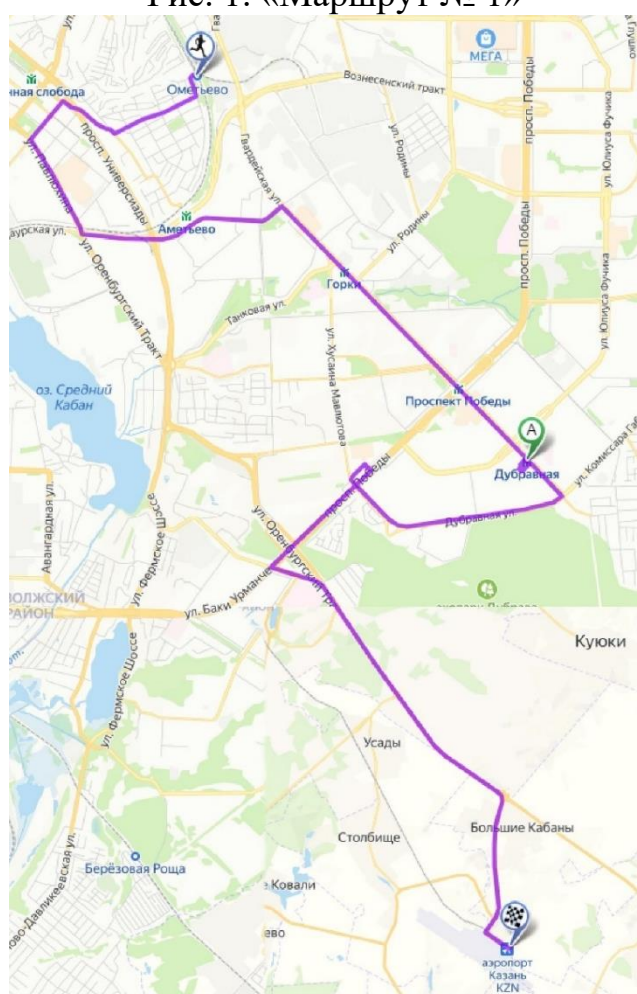


Рис. 2. «Маршрут № 2»

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

В целом, электромобили могут значительно изменить облик городского транспорта, сделав его более устойчивым и экологичным.

Библиографический список

1. Аухадеев А.Э., Павлов П.П., Соловьева А.П., Фандеев Д.В., Современная эколого-антропологическая методология развития городского электрического транспорта // Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: настоящее и будущее: материалы III Международной научно-практической конференции. – Казань, 2014. – С. 36-39.

2. Вильданов И.И. Источник питания электромобилей / И.И. Вильданов, А.Н. Хуснутдинов // Тинчуринские чтения – 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 444-446.

3. Максимов А.Н. Городской электротранспорт: Троллейбус: Учебник для нач. проф. образования / А.Н. Максимов. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 256 с.

4. Строганов В.И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография / В.И. Строганов, В.Н. Козловский. – М.: МАДИ, 2014. – 264 с.

5. Хуснутдинов А.Н. Повышение эффективности работы энергосистемы на основе развития зарядной инфраструктуры электромобилей / А.Н. Хуснутдинов, П.С. Лазарев, Р.А. Марданшина, О.З. Тоиров // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2022 (МНТК «ИМТОМ-2022»): Материалы XI Международной научно-технической конференции, Казань, 08 декабря 2022 года. Том Часть 1. – Казань: Акционерное общество «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий», 2022. – С. 319-323.

6. Ютт В.Е., Строганов В.И. Электромобили и автомобили с комбинированной энергоустановкой. Расчет скоростных характеристик: учеб. пособие / М.: МАДИ, 2016. – 108 с.

© Дюндина В.П., Хуснутдинов А.Н., 2024

УДК 04.77

1.5. Применение цифровых технологий в smart grid

Заирова Д.И., Сандаков В.Д.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Электроэнергетическая отрасль готова к переходу от централизованной сети, контролируемой производителями, к менее централизованной и более интерактивной с потребителями. Переход к интеллектуальным сетям обещает изменить всю бизнес-модель отрасли и её отношения со всеми заинтересованными сторонами, включая коммунальные предприятия, регулирующие органы, поставщиков энергетических услуг, поставщиков технологий и средств автоматизации и всех потребителей электроэнергии [1].

В качестве автоматизированной и распределённой сети передачи электроэнергии «умная» сеть будет характеризоваться двусторонним потоком электроэнергии и информации и сможет отслеживать всё — от электростанций до предпочтений клиентов и отдельных приборов. Она объединяет в себе преимущества распределённых вычислений и коммуникаций для передачи информации в режиме реального времени и мгновенного балансирования спроса и предложения на уровне устройств.

«Умная» электросеть использует цифровые технологии для повышения надёжности, безопасности и эффективности электроэнергетической системы. Из-за большого количества заинтересованных сторон и их различных точек зрения ведутся споры о том, что такое «умная» электросеть, и каждый участник делает акцент на том, что ему важно. Ниже приведены области, в которых «умная» электросеть представляет собой разумное разделение электроэнергетической системы, охватывающее все аспекты «умной» электросети [3].

Региональные и национальные режимы координации. Для экономичной и надежной работы электрической системы существует ряд взаимосвязанных иерархических функций координации, которые включают независимых системных операторов (ISO), региональных операторов передачи (RTOS), операции на рынке электроэнергии и т.д. Элементы интеллектуальных сетей в этой области включают данные измерений для определения состояния и работоспособности системы и предлагают координирующие действия для повышения эффективности, надёжности, соблюдения экологических требований или реагирования на сетевые сбои.

Технология распределённых энергетических ресурсов (DERs). Эта область включает в себя интеграцию распределённых источников энергии, накопителей и ресурсов, связанных со спросом, для участия в работе электросистемы. Ожидается, что потребительские товары, такие как интеллектуальные устройства и электромобили, станут важными компонентами этой области, как и возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергия.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Элементы интеллектуальных сетей на уровне распределения включают автоматизацию подстанций, динамические ограничения, координацию реле и связанные с ними датчики, коммуникацию и скоординированные действия. Элементы на уровне распределения включают балансировку нагрузки фидеров, переключение конденсаторов и расширенное измерение, например считывание показаний счетчиков, включение и отключение удаленного обслуживания, а также шлюзы для реагирования на спрос.

Информационные сети и финансы. Следует отметить, что информационные технологии и повсеместные коммуникации являются краеугольными камнями Smart grid. Хотя требования к информационным сетям, то есть возможности и производительность, будут разными в разных областях, их атрибуты, как правило, выходят за рамки областей применения. Примеры включают функциональную совместимость и простоту интеграции компонентов автоматизации, а также проблемы кибербезопасности. Более того, экономическая и инвестиционная среда для приобретения Smart grid является жизненно важной частью прогресса внедрения.

Smart grid (SG) - это интеллектуальная электрическая сеть следующего поколения, которая оптимизирует энергоэффективность для внедрения информационных технологий в существующую сеть и обмена информацией в режиме реального времени между поставщиками электроэнергии и потребителями.

Кроме того, интеллектуальная сеть — это интеграция электрической и информационной инфраструктур, а также внедрение автоматизации и информационных технологий в нашу существующую электрическую сеть. Она предоставляет комплексные решения, которые повышают надёжность энергоснабжения, эксплуатационные характеристики и общую производительность, увеличивают энергоэффективность и сокращают выбросы углекислого газа, а также позволяют потребителям управлять энергопотреблением и экономить деньги, не отказываясь от привычного образа жизни. Интеллектуальная сеть — это решение, которое может оптимизировать интеграцию возобновляемых источников энергии и способствовать их более широкому распространению.

Интеллектуальная сеть обладает множеством функций и преимуществ.

Поддержка реагирования на спрос: это дает пользователям автоматизированный способ снизить свои счета за электроэнергию, указывая им, как использовать электронные устройства с низким приоритетом, когда цены ниже.

Управление нагрузкой: общая нагрузка электросети непостоянна и меняется с течением времени. В ситуациях большой нагрузки интеллектуальная сетевая система может посоветовать потребителям временно снизить потребление энергии.

Децентрализация производства электроэнергии: децентрализованная или распределенная сетевая система позволяет отдельному пользователю

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

производить электроэнергию на месте, используя любой доступный ему подходящий метод.

Более быстрое восстановление электроснабжения после сбоев в подаче электроэнергии, более эффективная передача электроэнергии и более широкое использование крупномасштабных систем возобновляемой энергетики — всё это преимущества интеллектуальных сетей.

Сокращение расходов на управление и эксплуатацию для коммунальных предприятий и, в конечном счёте, снижение расходов на электроэнергию для потребителей, уменьшение пикового спроса, что поможет снизить тарифы на электроэнергию, а также более эффективное использование систем генерации электроэнергии, принадлежащих клиентам, — вот некоторые из отмеченных преимуществ.

«Умная сеть» может выявлять хищения электроэнергии и сбои в работе оборудования: некоторые сети «умных сетей» выполняют двойную функцию. Они включают в себя усовершенствованные системы учёта, которые в сочетании с различным программным обеспечением могут использоваться для выявления хищений электроэнергии и, в качестве исключения, для определения мест, где произошли сбои в работе оборудования. Это в дополнение к их основным функциям, таким как измерение времени использования электроэнергии и избавление от необходимости снимать показания счётчиков вручную.

В настоящее время перебои в подаче электроэнергии, такие как отключение электроэнергии, могут привести к эффекту домино - последовательности сбоев, которые могут повлиять на банковское дело, трафик, безопасность и коммуникации. Это особый повод для беспокойства зимой, когда домовладельцы могут остаться без тепла. Более умная сеть повысит отказоустойчивость нашей электроэнергетической системы и обеспечит ее лучшую готовность к чрезвычайным ситуациям, таким как землетрясения, сильные штормы, террористические атаки и мощные вспышки на солнце. Благодаря возможности двустороннего взаимодействия интеллектуальная сеть позволит автоматически изменять маршрут при возникновении сбоев в работе оборудования. Это помогло бы уменьшить количество отключений и ограничить последствия, когда они все-таки происходят [2].

В случае отключения электроэнергии технологии «умных» сетей позволят выявлять и изолировать сбои в подаче электроэнергии, предотвращая их до того, как они приведут к масштабным отключениям. Новые технологии также помогут обеспечить быстрое и стратегически правильное восстановление электроснабжения после чрезвычайной ситуации, оперативно перенаправляя электроэнергию. Более того, «умные» сети позволят эффективнее использовать генераторы электроэнергии, принадлежащие клиентам, для выработки электроэнергии, когда она недоступна от коммунальных служб. Сочетание этих «распределённых энергетических ресурсов» помогло бы сообществу обеспечить работу полицейского участка, медицинского центра, телефонной сети, продуктового магазина и светофоров во время чрезвычайных ситуаций.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Интегрированная коммуникация

Эти технологии позволяют интеллектуальным электронным устройствам и пользователям взаимодействовать как единая система. Это включает в себя двусторонние, полностью интегрированные высокоскоростные технологии, которые сделали бы возможным обмен энергией и информацией в режиме реального времени. Это помогло бы оптимизировать использование активов, надежность и безопасность системы. Открытая архитектура создала бы среду plug-and-play, которая позволила бы компонентам grid слушать, разговаривать и взаимодействовать. Вот несколько примеров отдельных технологий в этой области: Wi-Fi, контроллер one cycle control, усовершенствованное зарядное устройство под нагрузкой и усовершенствованные защитные реле.

Передовые методы управления

В эту категорию включены технологии, которые позволяют контролировать компоненты энергосистемы, облегчая быструю диагностику и реагирование на любое событие. Три категории технологий в этой категории - это аналитические инструменты (высокоскоростные компьютеры и программные алгоритмы), распределенные интеллектуальные агенты (системы управления) и операционные приложения (такие как SCADA, реагирование на спрос и автоматизация подстанций). С помощью методов программирования искусственного интеллекта компания Fujian power grid в Китае разработала систему защиты обширной территории, которая способна быстро точно рассчитать стратегию управления и реализовать ее. Программное обеспечение для мониторинга и управления стабильностью напряжения (VSMC) использует метод последовательного линейного программирования на основе чувствительности для надежного определения оптимального решения для управления [5].

Расширенные компоненты

Эти технологии играют важную роль в изучении поведения энергосистемы. Основой для этих технологий являются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в следующих областях: сверхпроводимость, силовая электроника, химия, материалы и микроэлектроника. Устройства следующего поколения будут использовать на практике последние достижения в области сверхпроводимости, материалов, микроэлектроники, силовой электроники и хранения энергии. Это позволит улучшить диагностику в реальном времени, повысить надёжность и плотность мощности. К технологиям этой категории относятся:

-кабели, трансформаторы, усовершенствованные или интеллектуальные переключатели

-микросети — это локальные электросети, которые при необходимости могут функционировать независимо от основной электросети

-«умные» приборы, совместимые с электросетями, такие как кондиционеры, сушильные машины, стиральные машины и водонагреватели, которые могут приостанавливать работу в ответ на ценовые сигналы

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Зондирование и измерение

Эти технологии улучшат измерения в энергосистеме, позволят выявлять проблемы и реагировать на них. Они оценивают состояние оборудования и целостность сети, а также поддерживают усовершенствованные защитные реле. Они предотвращают хищение электроэнергии и избавляют от необходимости рассчитывать показания счётчиков. Они упрощают выбор потребителей и реагирование на спрос, а также помогают устранять перегрузки. К технологиям, относящимся к этой категории, относятся системы мониторинга большой площади, усовершенствованные микропроцессорные счётчики (интеллектуальные счётчики), усовершенствованные кабели и переключатели, анализ/измерение электромагнитных сигналов, динамическая оценка линий электропередачи, инструменты учёта времени использования и ценообразования в реальном времени, цифровые защитные реле и радиотехнологии с обратным рассеянием.

Улучшенные интерфейсы и поддержка принятия решений

Во многих ситуациях время, затрачиваемое операторами на принятие решений, сводится к секундам. В результате современная сеть потребует бесперебойного широкого использования инструментов и приложений в режиме реального времени, которые позволяют сетевым операторам и менеджерам быстро принимать решения. Поддержка принятия решений с улучшенными интерфейсами улучшит процесс принятия решений человеком на всех уровнях сети. Вот некоторые примеры технологий из этой категории: цифровые симуляторы в реальном времени для оценки и тестирования систем электроснабжения и программные инструменты для проверки работоспособности системы электроснабжения.

Smart Grid представляет собой модернизированную сеть электроснабжения, которая объединяет в себе комплексные инструменты маркетинга, контроля, информационные технологии и средства коммуникации. Основными компонентами Smart Grid являются цифровые управляющие системы, коммуникационные сети, умные счетчики, распределенные системы мониторинга и управления.

Одним из ключевых элементов Smart Grid является применение цифровых коммуникационных сетей, которые обеспечивают обмен информацией в реальном времени между всеми элементами сети, включая генерирующие источники, распределительные сети и конечных потребителей. Это позволяет обнаруживать и корректировать аварийные и уязвимые участки сети, минимизируя потери и риски аварийных ситуаций.

Цифровые технологии улучшают автоматизацию процессов управления и мониторинга энергосетей. Использование интеллектуальных систем управления, таких как системы телемеханики и автоматизированной релейной защиты, позволяет оперативно реагировать на изменения в сети и предотвращать аварии. Цифровые устройства телемеханики и микропроцессорные терминалы обеспечивают точный контроль и управление электрическими устройствами.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Smart Grid позволяет потребителям активно участвовать в работе сети через специальные веб-решения, которые позволяют анализировать их потребление энергии и оптимизировать ее использование. Двухстороннее взаимодействие между энергокомпаниями и потребителями обеспечивается через коммуникационные сети, что позволяет регулировать потребление энергии в зависимости от текущего спроса и предложения.

Применение цифровых технологий в Smart Grid приводит к значительному увеличению эффективности и устойчивости энергосистем. Сюда относятся повышение надежности энергоснабжения, увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ), снижение энергетических потерь и уменьшение воздействия на окружающую среду.

Одним из важных аспектов Smart Grid является обеспечение кибербезопасности. Поскольку система состоит из множества девайсов и частей, интегрированных в общую платформу через коммуникационные связи, она может быть уязвима к внешним атакам. Поэтому энергокомпаниям необходимо обеспечить безопасность своих коммуникационных каналов и данных о потребителях[4].

Применение цифровых технологий в Smart Grid представляет собой значительный шаг вперед в модернизации энергосетей. Интеграция цифровых коммуникационных сетей, автоматизация процессов управления и мониторинга, двухстороннее взаимодействие между энергокомпаниями и потребителями, а также обеспечение кибербезопасности – все эти аспекты способствуют повышению эффективности, надежности и устойчивости энергосистем. Переход к Smart Grid не только улучшает качество электроэнергии, но и способствует развитию низкоэмиссионных технологий, таких как электромобили, и увеличению использования возобновляемых источников энергии. Таким образом, цифровые технологии играют ключевую роль в формировании будущей энергетической инфраструктуры.

Библиографический список:

1. Smart Grid или умные сети электроснабжения [Электронный ресурс]. URL: http://www.eneca.by/ru_smartgrid/ (Дата обращения 16.10.2024)
2. Игнатичев А.В, Ледин С.С. Развитие промышленных стандартов внутри- и межсистемного обмена данными интеллектуальных энергетических систем // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2020. – № 10. – С. 39–43.
3. Костров Д. «Умные сети электроснабжения» (smart grid) и проблемы с кибербезопасностью // Информационная безопасность [Электронный ресурс]. URL:<http://www.itsec.ru/articles2/in-ch-sec/umnye-seti-elektrosnabzheniya-smart-grid-i-problemy-s-kiberbezopasnostyu> (Дата обращения 16.10.2024)
4. Гаврилович Е.В. «Умные сети» Smart Grid — перспективное будущее энергетической отрасли России / Е.В. Гаврилович, Д.И. Данилов, Д.Ю. Шевченко. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2021. —

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

№ 28.2 (132.2). — С. 55-59. — URL: <https://moluch.ru/archive/132/36972/> (дата обращения: 16.10.2024).

5. Умные сети и интеллектуальные энергетические системы. – URL: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhenie/290-intellektualnye-seti> (дата обращения: 16.10.2024).

© Заирова Д.И., Сандаков В.Д., 2024

УДК 621.311.4-52

1.6. Цифровые двойники на цифровых подстанциях

Разжевалов С.А., Сандаков В.Д.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Технологический прогресс позволил осуществлять мониторинг и контроль строительных операций и активов дистанционно. Цифровые двойники, основанные на вычислительном моделировании, позволили создать цифровую карту физических сооружений. Исследования цифровых двойников (ЦД) для проектов энергетических объектов получили широкое распространение в отрасли. Несмотря на то, что с годами число таких приложений увеличилось, обзор их применения был немногочисленным. В данной статье проводится систематический обзор применения цифровых двойников в строительстве с использованием контент-анализа. Среди отмеченных преимуществ Цифровых двойников - возможность повысить вовлеченность и сотрудничество, снизить строительные и эксплуатационные расходы, уменьшить количество человеческих ошибок, автоматизировать потребление энергии, управлять активами на протяжении всего их жизненного цикла и применять мониторинг состояния конструкций. Они также позволяют собирать в режиме реального времени данные о состоянии актива, его истории, потребностях в обслуживании и обеспечивают интерактивную платформу для управления активом.

Цифровой двойник предполагает организацию потока данных от реального объекта к цифровому и наоборот (например, данные, поступающие от датчиков, установленных на оборудовании). и наоборот (например, данные, поступающие с датчиков, установленных на оборудовании). Таким образом, изменение состояния реального объекта определяет изменение состояния цифрового объекта и, наоборот, изменение состояния цифрового объекта также приводит к изменению состояния реального объекта. состояние реального объекта.

Работа цифровых подстанций заключается во внедрении интеллектуальных систем управления, формирование надежных и гибких интеллектуальных приборов учета электрической энергии и автоматизированных центров обработки данных. На традиционных подстанциях различные подсистемы используют разные протоколы и информационные модели. Для передачи аналоговых данных между оборудованием на таких станциях используются медные кабельные связи. Для функций защиты, измерения, учета, контроля

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

качества должны быть построены индивидуальные системы измерения и информационного взаимодействия, что значительно усложняет реализацию системы и увеличивает ее стоимость.

Цифровая подстанция – это относительно новый тренд в энергетике. На данный момент существует несколько стандартизированных реализаций цифровых подстанций, которые между собой отличаются степенью этой самой цифровизации, т.е. качественным и количественным составом микроэлектронных и микропроцессорных устройств, которые участвуют в преобразовании, передаче и распределении электроэнергии, а так же в схемах автоматизации управления и защит.

В качестве основы любой цифровой подстанции лежит классическое подстанционное устройство, включающее в себя силовые трансформаторы, коммутационные аппараты и распределительные устройства.

Цифровые двойники на цифровых подстанциях используются для улучшения управления, мониторинга и оптимизации работы энергосистем. Вот несколько ключевых причин их применения:

- **Повышение надежности и безопасности.** Цифровые двойники позволяют в реальном времени отслеживать состояние оборудования подстанции, выявлять потенциальные проблемы и прогнозировать отказы. Это помогает предотвратить аварии и минимизировать риски для персонала и оборудования.

- **Оптимизация обслуживания и планирования.** Используя данные от сенсоров и симуляции, цифровые двойники могут прогнозировать необходимость технического обслуживания, что позволяет проводить его по мере необходимости, а не по расписанию. Это снижает затраты на обслуживание и продлевает срок службы оборудования.

- **Моделирование и тестирование.** Цифровые двойники позволяют тестировать различные сценарии работы подстанции и анализировать их последствия без вмешательства в реальную инфраструктуру. Это особенно важно при внедрении новых технологий или обновлении системы, где важно избежать простоев и аварий.

- **Анализ и прогнозирование нагрузки.** Цифровые двойники могут анализировать данные о нагрузке в реальном времени и прогнозировать потребности в электроэнергии, что позволяет подстанции работать более эффективно и с меньшими потерями.

- **Умное управление и интеграция с возобновляемыми источниками энергии.** В современных энергосистемах возрастают объемы использования возобновляемых источников, которые требуют более сложного управления. Цифровые двойники помогают интегрировать эти источники, оптимизировать их работу и балансировать систему.

- **Повышение прозрачности и улучшение мониторинга.** Цифровые двойники позволяют оператору получить полное представление о состоянии подстанции и всех её элементов, а также выявлять аномалии на основе данных в реальном времени.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Интегрируя в трансформаторы специализированные цифровые необслуживаемые датчики и полевые контроллеры, можно представить трансформатор как объект в модели IEC 61850. Для реализации общеизвестных методов диагностики трансформатора цифровому двойнику необходимы датчики: температуры верхнего слоя масла, влажности и газосодержания масла, токов утечки вводов, положения РПН, уровня масла в расширительном баке, датчик влажности силикагеля в осушителе, реактивные и газовые реле, датчик положения отсечного клапана, датчик контроля уровня, коммуникационные модули. Цифровой двойник должен уметь выполнять расчетные и диагностические задачи, например, сравнение контролируемых параметров с уставками или нормативными значениями, расчет температуры наиболее нагретой точки, расчет перегрузочной способности трансформатора.

Анализ возможностей технологии цифровых двойников для силовых трансформаторов, используемых в цифровых подстанциях, демонстрирует не только их целесообразность, но и необходимость внедрения таких решений для повышения надежности работы не только силовых трансформаторов, но и всей подстанции в целом. Кроме того, цифровые двойники играют важную роль в интеллектуализации процессов управления и мониторинга. Они позволяют интегрировать данные с различных сенсоров и систем, обеспечивая более глубокий анализ и принятие обоснованных решений на основе больших данных. Это создает возможности для автоматизации процессов и улучшения взаимодействия между различными компонентами энергосистемы. В конечном итоге, применение цифровых двойников ускоряет цифровую трансформацию в области электроэнергетики. Это позволяет не только повысить уровень надежности и эффективности, но и способствует переходу на новую технологическую платформу, которая включает в себя интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивными сетями. Эти системы способны самостоятельно адаптироваться к изменяющимся условиям, оптимизируя распределение электроэнергии и улучшая качество предоставляемых услуг.

Таким образом, использование цифровых двойников в сфере электроэнергетики является важным шагом к созданию более устойчивых, эффективных и интеллектуальных энергетических систем, которые смогут справляться с вызовами будущего, такими как рост потребления энергии и интеграция возобновляемых источников. Это не только улучшает качество обслуживания клиентов, но и способствует устойчивому развитию энергетической инфраструктуры в целом.

Применение новых цифровых технологий, таких как систем измерения, управления и передачи данных, позволит радикально пересмотреть структуры и средства обеспечения надежности защиты силового оборудования, сократить время обслуживания оборудования и повысить эффективность. Рассмотренные выше преимущества цифровых подстанций, показывают высокий потенциал развития данной технологии построение подстанций электрических сетей.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Библиографический список

1. Чижма С.Н. Цифровые подстанции: учебное пособие / С.Н. Чижма, А.И. Захаров. — Калининград: БФУ им. И. Канта, 2022. — 80 с. — ISBN 978-5-9971-0704-8. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система.
2. Корольков А.А. Цифровые подстанции / А.А. Корольков, Т.М. Черникова. — Текст: электронный // РОССИЯ МОЛОДАЯ. — 2021. — № 021314. — С. 1-4. <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/021314.pdf> (дата обращения: 11.10.2024)
3. Гаврилов Ф.В. Основные преимущества и недостатки цифровой электрической подстанции / Ф.В. Гаврилов. — Текст: электронный // Теория и практика современной науки. — 2019. — № 6. — С. 169-172. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35691306> (дата обращения: 12.10.2024). — Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
4. Власенко С.А. Информационнотехническое обеспечение цифровой подстанции: учебное пособие / С.А. Власенко, И.В. Игнатенко, Е.Ю. Тряпкин. — Хабаровск: ДВГУПС, 2022. — 107 с. (дата обращения: 20.10.2024)
5. Пенский О.Г. Математические модели цифровых двойников: учебное пособие / О.Г. Пенский. — Пермь: ПГНИУ, 2019. — 157 с. — ISBN 978-5-7944-3267-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система.» (Пенский О.Г. Математические модели цифровых двойников: учебное пособие / О.Г. Пенский. — Пермь: ПГНИУ, 2019. — ISBN 978-5-7944-3267-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. (дата обращения: 23.10.2024).

© Разжевалов С.А., Сандаков В.Д., 2024

УДК 621.313

1.7. Разработка высокочастотного модуля-приемника для мониторинга изоляции на подстанциях

Якупов Н.М.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Аннотация. В данной работе описывается разработка микроконтроллерного модуля-приемника для мониторинга изоляции на подстанциях (ПС). Был использован тюнер R820T, который может быть использован для приема и анализа радиочастотных сигналов, связанных с состоянием изоляции воздушных линий электропередач (ВЛЭП). К повреждениям или перекрытию изоляторов в большинстве случаев приводит длительное воздействие частичных разрядов (ЧР) на изоляцию вследствие дефектов, загрязнения и увлажнения.

В современных электрических сетях обеспечение надежности и безопасности эксплуатации оборудования становится особенно актуальным. Ключевым

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

аспектом здесь является мониторинг состояния изоляции, который влияет как на долговечность оборудования, так и на безопасность работы персонала. Изоляция электрических сетей и оборудования подвергается различным негативным факторам, таким как старение, перегрузки, неблагоприятные климатические условия и механические повреждения, что может привести к аварийным ситуациям [1].

Современные достижения в области микроэлектроники и программного обеспечения открывают новые горизонты для разработки эффективных средств диагностики и мониторинга. Микроконтроллеры, благодаря своей компактности, низкому энергопотреблению и высокой функциональной гибкости, идеально подходят для создания специализированных модулей, предназначенных для мониторинга и диагностики в реальном времени.

В процессе мониторинга изоляции применяются различные системы и приборы, такие как тюнер R820T, который способен принимать и анализировать радиочастотные сигналы, связанные с состоянием изоляции электрического оборудования. Системы мониторинга, такие как MDR-3/UHF, позволяют оперативно оценивать техническое состояние изоляции обмоток статоров высоковольтных машин. Также существуют системы для контроля кабельных линий, например, CDM-30, которая может постоянно отслеживать до 30 кабельных линий под рабочим напряжением [2].

Таким образом, мониторинг состояния изоляции является важным элементом обеспечения безопасности и надежности электрических сетей и оборудования. Применение современных технологий и приборов позволяет эффективно контролировать и диагностировать состояние изоляции, предотвращая аварийные ситуации и обеспечивая безопасность работы персонала.

Целью данной работы стало создание микроконтроллерного модуля-приемника для мониторинга изоляции на подстанциях. Для разработки данного модуля были поставлены следующие задачи:

- 1) изучение существующих промышленных модулей-приемников;
- 2) ознакомление с системой автоматического проектирования Altium Designer;
- 3) разработка принципиальной схемы устройства;
- 4) создание печатной платы устройства.

Промышленные модули-приемники играют ключевую роль в системах автоматизации и мониторинга различных процессов, включая мониторинг состояния изоляции на подстанциях. Промышленные модули-приемники можно классифицировать по нескольким признакам, таким как тип передаваемых данных, способ их передачи, архитектурные особенности и функциональные возможности. Основные категории включают:

- 1) Аналоговые и цифровые приемники: Аналоговые приемники обрабатывают непрерывные сигналы, тогда как цифровые — дискретные. Современные решения часто используют цифровые технологии из-за их высокой точности и помехоустойчивости [3];

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

2) Проводные и беспроводные модули: Проводные модули передают данные по физическим каналам связи (например, Ethernet, RS-485), тогда как беспроводные используют радиочастотные каналы (Wi-Fi, Zigbee, LoRa);

3) Интегрированные и модульные системы: Интегрированные системы объединяют приемник и обработчик данных в одном устройстве, а модульные системы позволяют гибко наращивать функциональность путем добавления новых модулей.

Software-Defined Radio – программно-определяемый радиоканал. Радиопередатчик и/или радиоприемник, использующий технологию, позволяющую с помощью программного обеспечения устанавливать или изменять рабочие радиочастотные параметры, включая, в частности, диапазон частот, тип модуляции или выходную мощность, за исключением изменения рабочих параметров, используемых в ходе обычной предварительно определенной работы с предварительными установками радиоустройства, согласно той или иной спецификации или системы [4].

Целью такой схемы является радиоприемник или радиопередатчик произвольных радиосистем, изменяемый путем программной переконфигурации (отсюда происходит альтернативное наименование таких систем — программно-конфигурируемые):

1) передача широкополосного сигнала с радиоприемника в компьютер. Ширина обрабатываемой полосы может быть от 48 кГц (звуковая карта ПК) до 50 МГц (сверхбыстрый АЦП с передачей сигнала по Gigabit Ethernet или USB3.0);

2) демодуляция сигнала — все то, что «обычный» радиоприемник (АМ, FM, фильтры и пр.) делает в «железе» — в SDR делается на компьютере, математическими алгоритмами. Сам радиоприемник, конечно, все равно нужен, но только его «половина» — та часть, которая, собственно, принимает радиосигнал.

Для разработки приемника требуется выбрать тюнер, а также антенну к нему.

Тюнер R820T представляет собой высокопроизводительный радиочастотный приемник, широко используемый в системах SDR. Он является популярным радиочастотным приемником, используемом в основном в USB-устройствах SDR. Тюнер поддерживает широкий диапазон частот от 24 МГц до 1,7 ГГц и широко используется любителями радиосвязи, инженерами и исследователями.

Микросхема R820T содержит АЦП, цифровой процессор, USB-интерфейс, а также узлы COFDM-демодулятор и фильтры (рис. 1).

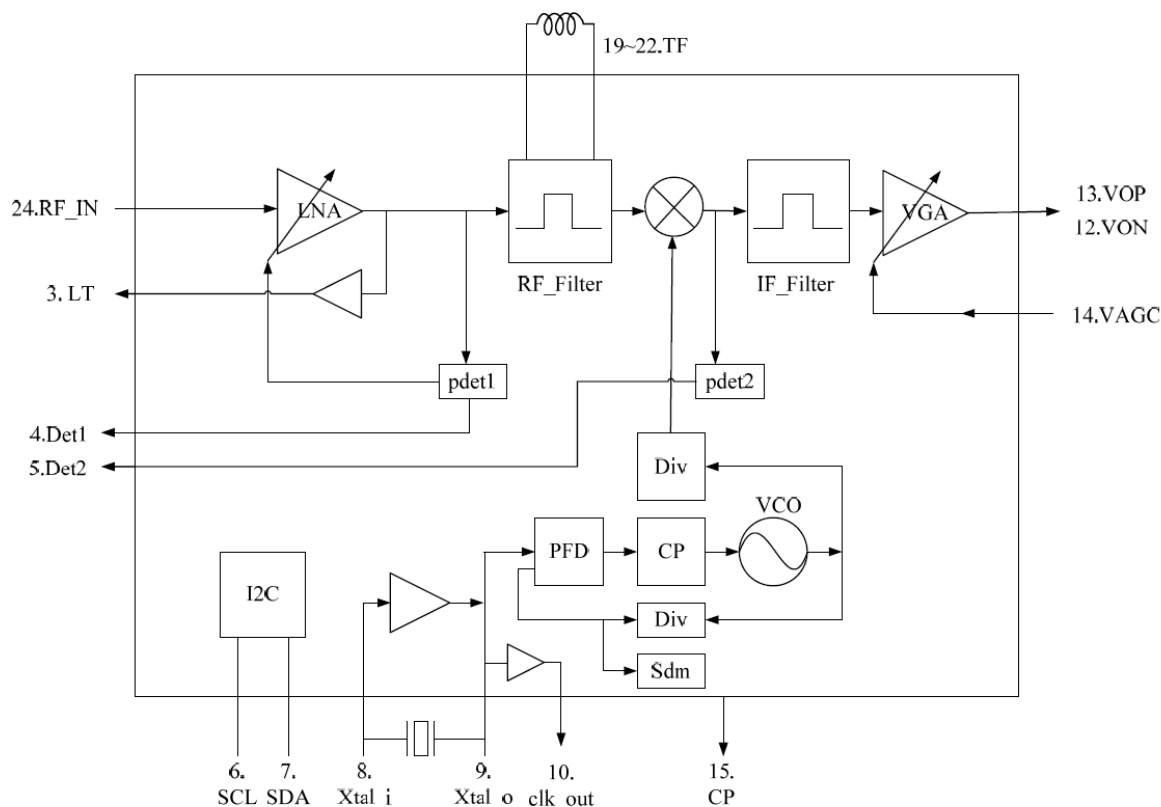


Рис. 1. Структурная схема R820T

Штыревая антенна 800 МГц — это тип антенны, предназначенный для приема и передачи радиосигналов в диапазоне частот около 800 МГц. Этот тип антенны широко используется в различных телекоммуникационных приложениях, таких как мобильная связь, беспроводные сети и системы безопасности [5].

Антенна имеет следующие характеристики:

диапазон частот: 868-915 МГц;

номинальное сопротивление - 50 Ом;

максимальная входная мощность - 50 Вт;

коэффициент усиления - 3 dBi;

КСВ - $\leq 1,5$.

Преимущества:

Простота установки и использования. Штыревая антенна легко монтируется и не требует сложных настроек;

Компактные размеры. Компактная конструкция позволяет устанавливать антенну в ограниченных пространствах;

Надежность. Прочные материалы и простая конструкция делают антенну устойчивой к внешним воздействиям, таким как ветер и осадки;

Широкий угол охвата. Штыревая антенна обеспечивает всенаправленное излучение, что позволяет ей покрывать большие площади без необходимости точной ориентации.

Применение:

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Мобильная связь. Используется операторами сотовой связи для обеспечения стабильного сигнала в зонах покрытия;

Беспроводные сети. Применяется в различных системах беспроводной передачи данных, включая Wi-Fi и LoRaWAN;

Системы безопасности. Устанавливается в системах видеонаблюдения и контроля доступа для обеспечения бесперебойной связи с удаленными устройствами;

Транспортные средства. Широко используется в автомобильной и морской связи для передачи данных и голосовой связи.

Разработку устройства будем производить в системе автоматического проектирования Altium Designer.

После изучения документации была разработана принципиальная схема устройства в среде автоматического проектирования Altium Designer (рис. 2)

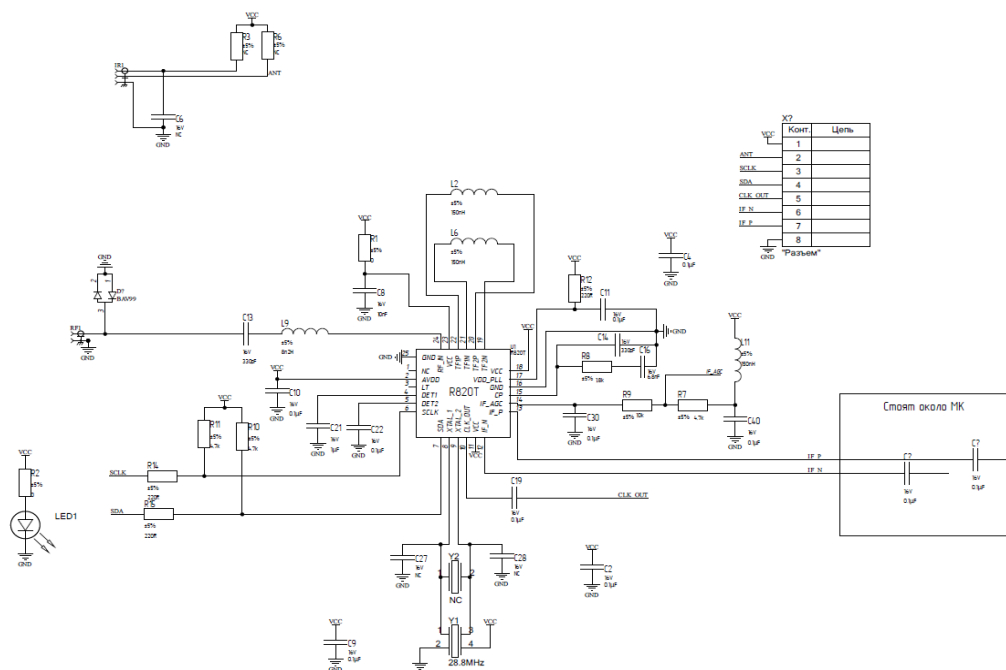


Рис. 2. Принципиальная схема прототипа

В результате был разработан и реализован промышленный модуль-приемник, обладающий высокой надежностью и производительностью. Он обладает широким диапазоном функциональных возможностей и совместим со множеством промышленных установок. Произведен выбор лучших микроконтроллеров и периферийных компонентов, удовлетворяющих требованиям надежности, точности и энергоэффективности. Разработана электрическая схема модуля-приемника, включающая в себя все необходимые элементы для корректной работы устройства.

В будущем планируется провести дальнейшие исследования и оптимизацию модуля для улучшения его энергоэффективности и снижения затрат на производство.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Библиографический список

1. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс]: учебник для вузов 11-е изд. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 736 с. Доступ из ЭБС «Лань».
2. Скорняков В.А. Общая электротехника и электроника [Электронный ресурс]: учебник для вузов 2-е изд. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 176 с. Доступ из ЭБС «Лань».
3. ALTIUM: [сайт]. URL: <https://www.altium.com/ru/documentation/altium-designer/creating-the-pcb-footprint-ad> (дата обращения: 17.09.2023)
4. Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В. Разработка и исследование схемы измерения тока утечки при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 145-155.
5. ЗНАК-Комплект: [сайт] URL: <https://www.znakcomplect.ru/poleznosti/example/kak-pravilno/texnika-bezopasnosti-pri-proizvodstve-pechatnyx-plat.html> (дата обращения 11.09.2023)

© Якупов Н.М., 2024

УДК 621.31

1.8. Цифровизация учета электроэнергии: интеллектуальные счетчики и их влияние на потребление энергии

Васильева И.С.

ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический университет»

В последние годы цифровизация затронула практически все сферы жизни, и электроэнергетика не стала исключением. Одним из наиболее заметных проявлений этого процесса стало внедрение интеллектуальных счетчиков, которые пришли на смену традиционным аналоговым устройствам учета электроэнергии. Интеллектуальные счетчики, или "умные счетчики", играют ключевую роль в управлении энергопотреблением, обеспечивая более точные данные о расходе ресурсов и создавая возможности для оптимизации энергопотребления как для потребителей, так и для энергетических компаний. В данной статье мы рассмотрим, как цифровизация учета электроэнергии через внедрение интеллектуальных счетчиков влияет на потребление энергии, какие преимущества и вызовы это несет.

«Цифровая энергетика представляет собой важный этап в эволюции энергетической отрасли, в которой традиционные системы уступают место современным цифровым технологиям. Эта трансформация включает в себя внедрение смарт-технологий, Интернета вещей, искусственного интеллекта и других инновационных подходов для оптимизации производства, распределения и потребления энергии» [1].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Интеллектуальные счетчики — это электрический прибор, используемый для измерения потребляемой электроэнергии и других электрических параметров системы электроснабжения. По сути, это разновидность счётчика электроэнергии, оснащенная более передовыми измерительными и коммуникационными технологиями измерения. Это позволяет значительно упростить и автоматизировать процессы сбора и анализа данных о потреблении. Помимо базовых функций учета, такие счетчики могут отслеживать параметры качества электроэнергии, фиксировать пики потребления и даже сигнализировать об авариях или неполадках в сети. Как отмечается в исследовании Alahakoon и Yu, «интеллектуальные счетчики играют важную роль в будущем энергосистем, предоставляя более точные данные и открывая новые возможности для управления энергопотреблением» [2].

Рассмотрим преимущества интеллектуальных счетчиков для потребителей. Для потребителей польза умных счетчиков тоже очевидна: путь от визита технического сотрудника до взгляда строителя на его работу был не такой большой как кажется. Во-первых, потребители могут получать более четкое понимание того, как именно они используют электроэнергию вне дома или с работы. Используя веб-интерфейсы или мобильные приложения, они могут почти в реальном времени отслеживать показание своего учета и корректировать свои привычки. «Данные, получаемые от интеллектуальных счетчиков, могут способствовать более эффективному использованию энергии и экономии средств» [3]. Это, в свою очередь, помогает снизить издержки на электроэнергию, так как становится легче обнаружить неэффективные источники потребления или исключить энергозастойные устройства.

Во-вторых, интеллектуальные счетчики помогают автоматизировать процесс учета и исключают необходимость ежемесячных визитов сотрудников энергокомпаний для снятия показаний. Все данные передаются автоматически, что делает процесс более прозрачным и оперативным. Устраняются человеческие ошибки, возникающие при ручном вводе данных, и снижается вероятность споров между потребителями и поставщиками энергии.

Если говорить о влиянии на энергетические компании и энергосистему, то для энергетических компаний внедрение интеллектуальных счетчиков - это путь к более эффективному управлению энергосистемами. Один из ключевых плюсов - возможность лучше прогнозировать потребление энергии и управлять нагрузкой на сеть. В режиме реального времени компании могут видеть, когда и где возникает пик нагрузки, и принимать меры для ее перераспределения или коррекции. Как указывают Gungor и его коллеги, «интеллектуальные счетчики обеспечивают ключевую информацию для управления сетевыми ресурсами и помогают улучшить стабильность энергосистемы» [4]. Это помогает снизить износ оборудования, избежать перегрузок и аварийных отключений.

Также важно отметить, что с помощью данных от умных счетчиков энергетические компании могут разрабатывать индивидуальные тарифные предложения для разных категорий потребителей. Например, многотарифные

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

системы учета, когда плата за электроэнергию зависит от времени суток, позволяют стимулировать потребителей переходить на использование электроэнергии в менее загруженные часы. Это способствует равномерному распределению нагрузки на энергосеть и оптимизирует генерацию электроэнергии.

Интеллектуальные счетчики играют значительную роль в снижении углеродного следа. По словам Chen и его коллег, «использование интеллектуальных счетчиков позволяет снизить потери энергии и оптимизировать процессы производства и распределения энергии, что имеет позитивное влияние на экологию» [5]. За счет повышения энергоэффективности и сокращения потерь электроэнергии уменьшается необходимость в дополнительных объемах выработки энергии, особенно от источников, работающих на ископаемом топливе. Когда энергопотребители начинают сознательно относиться к своим расходам, это напрямую влияет на снижение общего объема выбросов парниковых газов. Кроме того, интеллектуальные системы учета позволяют интегрировать возобновляемые источники энергии (солнечные панели, ветрогенераторы) в энергосистему на более высоком уровне. Потребители могут продавать излишки электроэнергии в сеть, и интеллектуальные счетчики автоматически фиксируют этот процесс, что делает энергосистему более гибкой и устойчивой к колебаниям. Как указывают Zhou и Li, «интеллектуальные счетчики играют важную роль в интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему, помогая создавать более устойчивые и гибкие сети» [6].

Несмотря на то, что интеллектуальные счётчики электроэнергии имеют ряд преимуществ, о которых говорилось выше, у них также есть определённые недостатки и ограничения. Ниже перечислены некоторые из основных недостатков интеллектуальных счётчиков электроэнергии.

Основной проблемой является конфиденциальность пользователей. Поскольку мы знаем, что интеллектуальный счётчик собирает все данные о системе энергоснабжения потребителя. Некоторые пользователи могут настороженно относиться к установке "умных" счетчиков из-за опасений по поводу конфиденциальности или предполагаемой сложности работы с новыми технологиями. Поэтому необходима работа по информированию и разъяснению преимуществ этих систем. Далее, требуется значительное финансирование для замены старого оборудования и модернизации инфраструктуры. Для энергокомпаний это может стать серьезным вызовом, особенно в регионах с ограниченными ресурсами. Также есть риск угрозы кибербезопасности. Интеллектуальные системы, связанные с интернетом, потенциально уязвимы для хакерских атак. Это создает риск утечки данных или манипуляций с показаниями счетчиков. Поэтому развитие соответствующих мер безопасности и защиты информации - одно из главных направлений для энергетических компаний и регуляторов.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Таким образом, цифровизация учета электроэнергии через внедрение интеллектуальных счетчиков представляет собой значительный шаг вперед в управлении энергопотреблением и оптимизации работы энергосистем. Умные счетчики не только повышают точность и прозрачность учета электроэнергии, но и способствуют снижению затрат и улучшению экологии за счет более осознанного использования ресурсов. Однако процесс внедрения требует внимательного подхода к вопросам безопасности и инвестиций в инфраструктуру. В будущем именно эти технологии могут стать основой для построения более устойчивых и энергоэффективных энергосистем, что особенно важно в условиях глобальных вызовов энергоперехода и борьбы с изменением климата. Безусловно, интеллектуальные счётчики электроэнергии помогают потребителям точно понимать, как расходуется энергия. Они помогают нам экономить энергию и сокращать расходы на оплату счетов. Кроме того, интеллектуальные счётчики электроэнергии сокращают расходы, связанные с ручным снятием показаний.

Библиографический список

1. Баланов А.Н. Цифровая энергетика. Системы управления, интеграция, оптимизация, прогнозирование спроса: учебное пособие для вузов / А.Н. Баланов. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 408 с.
2. Alahakoon D., Yu X. Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey / IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2018. — Vol. 12, No. 1. — 436 с.
3. Wang J., & Xu J. The Role of Smart Meters in Shaping Future Energy Markets / Energy Economics. — 2018. — Vol. 74. — 440 с.
4. Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Buccella C., Cecati C., & Hancke, G.P. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards / IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2011. — Vol. 7, No. 4. — 539 с.
5. Chen S., Zhang Z., & Wang Y. Cybersecurity in Smart Grids: Challenges and Solutions / IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — 139 с.
6. Zhou Q., & Li K. Integration of Renewable Energy into Smart Grids Using Advanced Metering Infrastructure / Renewable Energy. — 2021. — Vol. 165. — 89 с.

© Васильева И.С., 2024

УДК 621.31

1.9. Развитие интеллектуальных электроэнергетических систем в России

Муртазин А.Р., Сандаков В.Д.

Казанский государственный энергетический университет

В современном мире можно заметить тенденцию развития различных технологий, жизнь обычного человека сложно представить без использования множества бытовой, и не только техники, которая в несколько раз упрощает выполнение разных задач. Но также мы сталкиваемся с проблемами их производства и обеспечением их электроэнергией для работы для большого количества людей в России. Для того, чтобы генерировать такой важный ресурс, в современной России активно развивается важная инфраструктурная отрасль как электроэнергетика. Благодаря работе множества станций по всей стране поступает электроэнергия и тепло. Так же развитие данной отрасли крайне важно для экономики страны.

В России для обеспечения электроэнергии по всей стране, с возможностью хранения и создания данного ресурса, существует Единая энергетическая система. Единая энергетическая система (ЕЭС) России (Бывшая ЕЭС СССР) – это совокупность объединенных энергосистем (ОЭС), соединенных межсистемными связями, охватывающая значительную часть территории страны, при общем режиме работы и имеющая диспетчерское управление [1]. В настоящий момент в России данный тип системы используется повсеместно, и обеспечивает электроэнергией всю территорию страны и обладает самым большим централизованным энергообъединением.

Основная задача единой энергетической системы заключается в разработке стабильного, скоростного и безопасного снабжения электроэнергией для обеспечения нужд страны на территории России. Данный тип обеспечения обладает рядом преимуществ в сравнении с другими видами. Единая энергетическая система настраивается и обслуживается с единого центра управления. Благодаря мощным линиям электропередач сильно возрастает скорость и безопасность передачи электроэнергии на большие расстояния, что увеличивает эффективность использования. На территории страны обеспечивается подача ресурса во все районы и населенные пункты, где может наблюдаться недостаток и адаптируются переизбыток в некоторых крупных городах с помощью выравнивания графиков потребления электроэнергии. Единая энергетическая система также позволяет сокращать мощность работы на электростанциях, снизить резервные возможности и, благодаря выравниванию, более разумно использовать сырье для обеспечения работы станций, что позволяет сократить расходы, в том числе и на строительство и развитие станций.

Но с развитием России и возникновению таких глобальных проблем как спад экономики, экономические кризисы, реформы и прочие, новые технологии не

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

получали достаточного финансирования и возможности развития, из-за чего в данном отрасли появились серьезные проблемы. Основным причиной спада возможностей электроэнергетики оказался недостаток финансирования, из-за чего поставлялось более дешевое и старое оборудование, чем это было необходимо. Недостаток финансирования так же повлиял на возможности новых разработок в сфере повышения технологического уровня производства и повышения эффективности, быстродействия и рациональности использования и обеспечения электроэнергии. Основные виды сырья повысились в цене, в следствии чего стали хуже показатели работоспособности производства энергии. При этом формирование в России комплекса «интеллектуальных сетей» в различных отраслях экономики закономерно ведет к созданию нового системно-структурного образования, которое можно назвать межотраслевым гридкластером, так как оно будет иметь черты и компьютерного кластера, и системы распределенных вычислений (grid) [2].

В следствии снижения эффективности данной отрасли, было принято решение Правительством РФ о выстраивании энергетической стратегии до 2030 года, в котором описано необходимость развития технологических возможностей систем, для более правильного использования ресурсов. Главной задачей стало создание Интеллектуальных электроэнергетических систем. Формально термин Smart Grid был оформлен в 2007 году в законодательном акте об энергетической независимости и безопасности США. Так была названа технология модернизации национальной электроэнергетической системы с целью защиты, контроля и оптимизации энергопотребления всех элементов и участников сети» [3]. Главной целью данной технологии является упрощение работы с распределением электроэнергии до конечных потребителей. Таким образом управляющие смогут благодаря одному, или нескольким, компьютерам принимать участие в процессах обеспечения, настройки и передачи электроэнергии. Это помогает решать задачу с экологией, так как из-за высокого загрязнения часто станции находятся далеко от населенных пунктов. Конечный потребитель сможет получать то количество энергии, что ему нужно, понижая риск аварийных ситуаций, каких-либо колебаний напряжения в сети и повышение качества энергетического ресурса.

Необходимость появления новых технологий является следствием попытки решения нескольких глобальных проблем. Нынешние станции слишком дорогие и не удобные в работе, так как технологии используемые технологии устарели и не могут обеспечивать должное внимание развивающимся системам. Современные компьютеры же позволят обеспечивать уровень качества и учитывать все необходимые данные используемые в системе. Устаревшее оборудование тяжело в обслуживании и улучшении, что иногда ведет к отрицательным результатам производства. Необходим полностью новый подход для усовершенствования работы, станции смогут развиваться своевременно и снизиться количество ресурсов потраченных на их доработку и улучшение. Так же необходимость в улучшении и внедрении интеллектуальных систем

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

обусловлена с быстро растущими тенденциями в развитии компьютерных технологий и систем управления, что говорит нам о нецелесообразности использования устаревшего оборудования. Попытка внедрения абсолютно нового оборудования и обеспечению возможности их реализации даст множество функциональных возможностей и улучшению характеристик станций, в связи чего повышение качества, быстродействия и эффективности работы каждой из них.

Главные задачи интеллектуальных систем заключаются в автоматизации изменений и адаптации к различным как и внешним, так и внутренним изменениям, система должна уметь прогнозировать и изменять параметры для более высокой эффективности. Так же в будущем такие системы могут обладать возможностью самообучения на основе анализа результатов и получением информации от управляющих системы. Огромную долю внедрения данных технологий является более удобный и понятный интерфейс для человека. Необходимость иметь множество хорошо обученных специалистов сильно затрудняет работу станций и экономически невыгодно. Основная причина развития интеллектуальных систем, это возможность более стабильной работы в условиях неизвестного будущего.

Появление интеллектуальных энергосистем – это новый этап в развитии систем энергообеспечения потребителей, предоставляющая новые возможности благодаря повышенной оперативности и гибкости систем, возможностью управлять с одного устройства и изменять режимы работы. Для клиентов повысится качество обслуживания и они в конечном итоге получат столько ресурса, сколько им изначально было необходимо. Данные системы просто интегрировать через общую электрическую сеть и общий электрический режим любых типов объектов производства.

Основной инновацией новой технологии стало разработка и внедрение цифровых подстанций. Цифровая подстанция – это подстанции, помогающие централизовать все процессы и принятие решений. На сегодняшний день концепция цифровой подстанции для железнодорожного транспорта требует серьезной проработки, так как она должна учитывать существующий опыт применения цифровых технологий обмена информацией на объектах России [4]. Современные технологии позволяют вместо множества панелей и прочих инструментов работы с станциями централизовать все процессы на промышленные компьютеры, благодаря которым ведется работа с ними. Координированная работа подстанций обеспечивается наличием иерархической системы центров управления (ДЦ и ЦУС), осуществляющих управление процессами функционирования и эксплуатации электрических сетей региона [5]. Данное устройство позволяет в режиме реального времени управлять, отслеживать и получать информацию о каждом отдельном оборудовании в системе, что повысит качество и эффективность починки различных элементов, качество распределения ресурсов и упростит работу на ней. Так же можно строить

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

целые модели в реальном времени и просматривать огромные цепи питания и прочего для получения полной картины, в целях дальнейшего развития систем.

Внедрение данных систем в структуру России является сложной организационной задачей. Необходимо поставить или обновить энергетическое оборудование на территории энергетической станции, а так же интегрировать новые системы управления всеми процессами и subprocessами предприятия. Но благодаря данным изменениям, предприятие сможет добиться повышение автоматизации, улучшение скорости реакции на возникновение каких либо изменяющих факторов и решение их, повышение автоматизации станции, в следствии использования новой системы контроля и управления всех технических устройств на предприятии, повышение интеллектуальности на всех уровнях систем управления функционированием энергосистемы и рыночными операциями, в следствии чего сотрудники могут прогнозировать условия изменения и предпринимать решения по управлению заранее. При этом старое оборудование должно не просто заменяться аналогичным или технически прогрессивным – необходимо обеспечить возможность его встраивания в «энергетический интернет», сделать его активной частью новых систем управления технологическими процессами и экономическими взаимодействиями от локального до национального уровня [6]. Повышение безопасности также является одной из главных причин принятия данного решения. Удобство все просматривать и управлять с одного устройства и визуализировать модель всей цепи в целом, позволяет быстро находить неполадки на системе и предотвращать возможные поломки на станциях, которые могут привести к серьезным последствиям.

В современной России пока не так активно внедряются интеллектуальные системы, так как это сложный и затратный процесс. Для начала следует начинать не сразу с постройки логики на крупных предприятиях и станциях, следует делать переход от потребителей и локальных систем энергоснабжения, создавая распределенные кластеры новой энергетики. Внедрение данного рода систем идет медленно, так как для выстраивания такой крупной отрасли требуется много времени, и начинать сразу с крупных изменений на крупных станциях без подготовки может привести к ухудшению ситуации и к крупным потерям.

Таким образом, развитие интеллектуальных сетей, это один из важных этапов в истории энергетики. Внедрение таких систем является главной целью модернизации станций по всей России и является актуальной проблемой решения множества глобальных проблем, повышения стабильности, эффективности и удобства использования как и для сотрудников, так и для конечных пользователей. Результатом решения данных проблем поможет снизить потребление всей энергии примерно на 45%. Развитие национальной экономики и в следствии повышения качества и скорости работы новых систем, развитие всех промышленных отраслей.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Библиографический список

1. Баширова Э.М. Интеллектуальные системы управления и обеспечения безопасности в электроэнергетических комплексах: учебное пособие / Э.М. Баширова, И.Г. Хуснутдинова. — Уфа: УГНТУ, 2020. — 47 с. — ISBN 978-5-7831-2047-3. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/245171> (дата обращения: 16.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Баширов М.Г. Интеллектуальные средства и системы управления и защиты электрических сетей: учебное пособие / М.Г. Баширов, Э.М. Баширова, И.Г. Юсупова. — Уфа: УГНТУ, 2021. — 65 с. — ISBN 978-5-7831-2160-9. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/322787> (дата обращения: 16.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Манусов В.З. Применение методов искусственного интеллекта в задачах управления режимами электрических сетей Smart Grid: монография / В.З. Манусов, Н. Хасанзода, П.В. Матренин. — Новосибирск: НГТУ, 2019. — 240 с. — ISBN 978-5-7782-3911-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152225> (дата обращения: 16.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Власенко С.А. Информационнотехническое обеспечение цифровой подстанции: учебное пособие / С.А. Власенко, И.В. Игнатенко, Е.Ю. Тряпкин. — Хабаровск: ДВГУПС, 2022. — 107 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/339542> (дата обращения: 16.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Валеев И.М. Концепция управления цифровыми подстанциями будущего: учебное пособие / И.М. Валеев, В.Г. Макаров. — Казань: КНИТУ, 2019. — 152 с. — ISBN 978-5-7882-2587-6. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/166160> (дата обращения: 16.10.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
6. Веселов Ф.В. Интеллектуальная энергосистема России как новый этапразвития электроэнергетики в условиях цифровой экономики / Ф.В. Веселов, В.В. Дорофеев // Энергетическая политика. No 5. 2018.

© Муртазин А.Р., Сандаков В.Д., 2024

УДК 004.942

1.10. Использование цифровых двойников в энергетике

Сандаков В.Д., Ятова А.С.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

В современном мире одной из ключевых является тенденция на развитие и внедрение цифровых технологий в различные сферы жизни и деятельности людей. Энергетический сектор не является исключением, энергетика, как и другие области деятельности, терпит изменения и усовершенствования.

Применение технологий цифровых двойников становятся важным инструментом для повышения эффективности и устойчивости энергетических систем. Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели физических объектов и процессов, что позволяет проводить их анализ, мониторинг и оптимизировать в реальном времени. Это особенно важно в свете растущих потребностей в энергетических ресурсах, необходимости интеграции возобновляемых источников энергии и повышения надежности и безопасности электросетей.

Современные глобальные проблемы, такие как изменение климата, ограниченность полезных ресурсов, увеличение последствий углеродного следа требуют от энергетического сектора адаптации к новым условиям. Цифровизация процессов, включая внедрение цифровых двойников, открывает новые горизонты для управления энергетическими системами, позволяя минимизировать затраты, улучшать качество обслуживания и обеспечивать безопасность эксплуатации.

Кроме того, актуальность темы усиливается в свете глобальных трендов, таких как переход к умным сетям и развития концепции «умных городов». Цифровые двойники играют ключевую роль в этих инициативах, обеспечивая интеграцию данных и технологий для создания более эффективных и устойчивых энергетических систем. Исследование и внедрение цифровых двойников в энергетике не только способствует оптимизации текущих процессов, но и формирует основу для инновационного развития сектора в будущем.

Таким образом, изучение применения цифровых двойников в энергетике представляет собой важную и актуальную тему, которая имеет важное значение как для научного сообщества, так и для практиков в области энергетики.

Целью данной работы является исследование применения технологии цифровых двойников в энергетическом секторе.

В рамках статьи будут рассмотрены следующие вопросы:

1. Определение концепции цифрового двойника;
2. Применение цифровых двойников в энергетике;
3. Преимущества использования цифровых двойников;
4. Вызовы и ограничения использования цифровых двойников;
5. Перспективы развития технологий цифровых двойников в энергетике.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Определение концепции цифрового двойника. Для более полного раскрытия темы обратимся к некоторым определениям термина «Цифровой двойник».

Цифровые двойники – это виртуальные модели реальных объектов, систем или процессов, которые с точностью воссоздают их поведение в цифровой среде[1].

Цифровой двойник – это цифровое представление физического актива, связанных с ним процессов, систем и информации[2].

Цифровой двойник – Динамическое виртуальное представление физического объекта или системы в течение всего жизненного цикла с использованием данных в режиме реального времени для понимания, изучения и рассуждения[3].

В приведенных определениях мы можем выделить следующие общие свойства:

- Это цифровая копия какого-либо объекта;
- Существует одновременно с физическим объектом;
- Передает и использует данные в реальном времени.

Используя выделенные общие черты сформулируем собственное определение цифрового двойника. Цифровой двойник – это цифровая копия какого-либо физического объекта, которая существует одновременно с физическим объектом, передает и использует данные с физического объекта в режиме реального времени.

Когда мы рассматриваем цифровой двойник в контексте применения в энергетике, в качестве физического объекта мы подразумеваем электростанции, подстанции и другие объекты, используемые в энергетике.

На сегодняшний день применение цифровых двойников в энергетике в России находится на начальной стадии. Для развития данной технологии необходимо ее глубокое изучение и инвестиции.

Некоторые компании применяют технологию цифровых двойников для модернизации отдельных процессов. Так, например, компания General Electric использует цифровые двойники газовых турбин, включающих цифровую модель самой турбины, базу знаний, блок аналитики, с помощью которого определяется текущее состояние турбины, а также прогнозируются показатели ее работы[4].

В 2016 г. Компанией Fingrid был реализован проект создания цифрового двойника ELVIS (Electricity Verkko Information System)[5]. Проект цифрового двойника заключался в создании адаптера, представляющего интерфейс между двумя стандартизованными программными продуктами. Адаптер считывает данные в ГИС и переводит в считываемый ПО PSS SINCAL. Автоматическое преобразование данных помогает пользователю создавать точную модель распределительной сети за короткое время. Раньше, чтобы смоделировать одну область среднего напряжения занимало около 500 ч. После реализации проекта благодаря автоматическому преобразованию данных создание более точной модели сети такого же размера занимает максимум 3 ч.

Главной целью цифровых двойников – уменьшение аварийности, повышение эффективности бизнес-процессов, предотвращение технологических рисков. По

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

мнению экспертов и участников рынка, следствием масштабного внедрения искусственного интеллекта в энергетике в перспективе может стать снижение конечных цен на отопление и горячую воду для потребителя и сокращение операционных расходов для энергокомпаний[6].

Преимущества использования цифровых двойников в энергетике:

1. Оптимизация процессов: цифровые двойники позволяют моделировать и анализировать процессы в реальном времени, что способствует более эффективному управлению ресурсами;

2. Предсказание и предотвращение сбоев: с помощью цифровых двойников можно прогнозировать возможные неисправности и аномалии в работе оборудования, что позволяет проводить профилактическое обслуживание и минимизировать время простоя;

3. Интеграция возобновляемых источников энергии: цифровые двойники помогают управлять переменными нагрузками, связанными с возобновляемыми источниками энергии, обеспечивая стабильность и надежность электросетей;

4. Улучшение обслуживания клиентов: анализ данных, получаемых от цифровых двойников, позволяет компаниям лучше понимать потребности клиентов и предлагать более персонализированные и качественные услуги;

5. Снижение углеродного следа: оптимизация процессов и переход на более чистые источники энергии с использованием цифровых двойников помогает снизить выбросы парниковых газов и достигать экологических целей;

6. Разработка новых бизнес-моделей: цифровые двойники открывают возможности для создания инновационных бизнес-моделей, что может привести к новым источникам дохода;

7. Анализ больших данных: цифровые двойники позволяют обрабатывать большие объемы данных, что способствует более обоснованному принятию решений и разработке эффективных стратегий;

8. Повышение конкурентоспособности: компании, внедряющие цифровые двойники, могут быстрее адаптироваться к изменениям на рынке и улучшать свои позиции по сравнению с конкурентами;

9. Улучшение безопасности: с помощью цифровых двойников можно моделировать различные сценарии и оценивать риски, что позволяет повысить уровень безопасности как для персонала, так и для оборудования;

10. Снижение затрат на обучение: виртуальные модели могут использоваться для обучения сотрудников, что снижает затраты на обучение и повышает квалификацию персонала без необходимости в реальных испытаниях.

В целом, применение цифровых двойников в энергетике способствует созданию более устойчивой, эффективной и инновационной отрасли, готовой к вызовам будущего.

Вызовы и ограничения использования цифровых двойников в энергетике. Несмотря на очевидные преимущества и потенциал использования цифровых двойников в энергетическом секторе, их внедрение и использование имеют

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

некоторые сложности и ограничения, которые необходимо учитывать для успешной реализации. Мы выделим самые крупные недостатки:

1. Техническая сложность внедрения технологии: создание и поддержка цифровых двойников требуют значительных технических ресурсов и экспертизы. Необходимость интеграции различных систем, данных и технологий может вызвать сложности, особенно в устаревших инфраструктурах;

2. Данные и их качество: эффективность цифровых двойников напрямую зависит от качества и полноты данных, на которых они основаны. Сбор, обработка и анализ больших объем данных могут быть затруднены из-за отсутствия стандартизации, несовместимости систем и проблем с доступностью данных;

3. Кибербезопасность: Цифровые двойники, как и любые другие цифровые технологии, могут стать мишенью для злоумышленников, что ставит под угрозу безопасность данных и функционирование энергетических объектов;

4. Экономические затраты: Внедрение и поддержка цифровых двойников требует значительных инвестиций в технологии, обучение персонала и модернизацию инфраструктуры;

5. Сопротивление изменениям: Внедрение цифровых технологий часто сталкивается с сопротивлением со стороны сотрудников и руководства, которые могут быть не готовы к изменениям в рабочем процессе;

6. Регуляторные и правовые аспекты: Энергетический сектор подвержен строгому регулированию, и внедрение цифровых двойников может потребовать пересмотра существующих норм и стандартов. Необходимость соблюдения законодательства может замедлить процесс интеграции новых технологий[7].

Таким образом, для успешного внедрения цифровых двойников в энергетический сектор необходимо преодолеть указанные вызовы и ограничения, что потребует комплексного подхода, включающего технические, экономические и организационные меры.

Внедрение цифровых двойников в энергетический сектор представляет собой важный шаг к созданию более эффективной, устойчивой и инновационной энергетической системы. Эти технологии не только способствуют оптимизации процессов и снижению затрат, но и имеют большое значение в интеграции возобновляемых источников энергии, что особенно актуально в условиях глобальных проблем, связанных с изменением климата Земли.

Цифровые двойники позволяют прогнозировать сбои, улучшать обслуживание и разрабатывать новые бизнес-модели, что в свою очередь повышает конкурентоспособность энергетических компаний. Кроме того, они позволяют снизить углеродный след, способствуя достижению экологических целей и переходу к более устойчивым формам энергии.

Таким образом, не смотря на сложности и ограничения внедрения и использования цифровых двойников в энергетике, их применение открывает новые возможности для развития энергетического сектора, позволяя не только улучшить производительность, но и обеспечить более безопасное и

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

экологически чистое будущее для людей. Энергетические компании, которые активно интегрируют эти технологии в свою деятельность, смогут не только адаптироваться к изменениям, но и стать лидерами в энергетическом секторе.

Библиографический список

1. Картер, Д. Синтез данных и цифровые двойники / Д. Картер. — Москва: 2024. — 221 с. — Текст: непосредственный.
2. Золотарева, А. Ф. Реализация государственной политики инноватизации в муниципальных образованиях: монография. / А.Ф. Золотарева, А.А. Степанов, М.В. Рыбин. — 2-е изд. — Москва: Дашков и К, 2021. — 234 с. — Текст: непосредственный.
3. Bolton R.N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms //Journal of Service Management. – 2018. – Т. 29. – №. 5. – С. 776-808.
4. What is a digital twin. — Текст: электронный // IBM: [сайт]. — URL: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (дата обращения: 20.10.2024).
5. Никитина Е.В., Полуэктов А.Н., Кох С. Цифровой двойник для электрических сетей // Энергетическая политика. 2019. №. 4(46). С. 32-36
6. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЭС, ТЭЦ, ПГУ, ГТУ – СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ. — Текст: электронный // Национальное бюро информатизации: [сайт]. — URL: <https://nbiservice.ru/energy/sozдание-cifrovih-dvoinikov/> (дата обращения: 21.10.2024).

© Сандаков В.Д., Ятова А.С., 2024

СЕКЦИЯ II. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

УДК 621.316.925.1

2.1. Релейная защита: от традиционных методов к Smart Grid

Мусин И.Х., Гарфиев И.Б., Сандаков В.Д.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

В настоящее время объекты электроэнергетики нуждаются в модернизации и развитии, а также в оптимизации структуры электрогенерирующих мощностей. Это свидетельствует о том, что устаревшие устройства, задействованные в генерации, передаче, трансформации и потреблении электроэнергии будут постепенно заменяться более современными аналогами. Релейная защита является важным элементом электроэнергетического комплекса и, следовательно, также требует модернизации [1]. Эта статья рассматривает традиционные устройства релейной защиты и их более современные аналоги защиты, с акцентом на внедрение современных технологий в релейную защиту и их влияние на эффективность и надежность энергетических систем.

Традиционные системы релейной защиты основывались на электромеханических, полупроводниковых и статических устройствах. У одних устройств при срабатывании происходит замыкание или размыкание физических контактов, тогда как у других изменяется выходное значение в ответ на изменение входного. Устройства релейной защиты и автоматики являются основными компонентами электрических сетей, отвечающими за мониторинг и защиту от различных аварийных ситуаций. Эти системы сыграли важную роль в развитии электроэнергетической отрасли, обеспечивая надежность и безопасность функционирования энергетических систем.

Электромеханические реле были первыми устройствами, применяемыми в системах релейной защиты. Логика их работы основана на электромеханических взаимодействиях между током, проходящим через катушку, и механическими элементами, такими как якоря и контакты.

Они имеют следующие характеристики:

- Простота конструкции: эти устройства отличались простой конструкцией, что способствовало их высокой надежности и длительному сроку службы.
- Ограниченная скорость срабатывания: из-за наличия механических подвижных частей скорость их реакции была относительно низкой.
- Низкая избирательность и точность: Возможность точной настройки защитных параметров были ограничены, что снижало их эффективность в сложных электрических сетях.

Основные компоненты этих реле включают:

1. Катушка: это обмотка провода, через которую проходит электрический ток, создавая магнитное поле. При подаче тока в катушку формируется магнитное поле, которое приводит в движение подвижные элементы реле.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

2. Якорь: подвижный элемент, который перемещается под воздействием магнитного поля, созданного катушкой. Якорь соединен с контактами и отвечает за их замыкание или размыкание.

3. Контакты: механические элементы, которые могут замыкаться или размыкаться в зависимости от положения якоря. Контакты бывают различных конфигураций, таких как нормально разомкнутые (NO) и нормально замкнутые (NC).

4. Пружины: эти элементы возвращают якорь в исходное положение после отключения управляющего сигнала, обеспечивая восстановление контактов.

Позже появились статические реле, которые использовали полупроводниковые компоненты вместо механических частей. Это привело к улучшению характеристик релейной защиты.

Преимущества статических реле заключаются в следующем:

- Увеличенная скорость срабатывания: Отсутствие механических компонентов позволило значительно ускорить реакцию на аварийные ситуации.

- Повышенная точность и стабильность: Полупроводниковые элементы обеспечивают более высокую точность и стабильность работы устройства.

- Расширение функциональные возможности: Статические реле способны выполнять более сложные функции, такие как дифференциальная защита и защита от несимметричных токов.

Основные компоненты статических реле включают:

1. Полупроводниковые элементы: это ключевые компоненты, такие как транзисторы, диоды и тиристоры, которые выполняют функции переключения и управления током. Они обеспечивают высокую скорость реакции и надежность работы.

2. Измерительные цепи: Эти цепи предназначены для мониторинга параметров электрических сигналов, таких как ток, напряжение и частота. Они обеспечивают точные измерения, необходимые для активации защитных функций.

3. Схемы обработки сигналов: Эти схемы обрабатывают данные, полученные от измерительных цепей. Они могут включать аналоговые и цифровые схемы, которые выполняют функции фильтрации, усиления и анализа сигналов.

4. Логические элементы: используются для принятия решений на основе обработанных данных. Логические элементы определяют, когда необходимо активировать защитные функции или передать сигналы на другие устройства.

5. Интерфейсы связи: Эти компоненты обеспечивают взаимодействие статического реле с другими системами управления и мониторинга. Они могут включать порты для подключения к SCADA-системам или другим устройствам автоматизации.

6. Питание: Статические реле требуют источника питания для функционирования полупроводниковых элементов и логических схем. Обычно используется низковольтное питание.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Однако эти системы имели свои ограничения, такие как медленная реакция на изменения в сети и низкая точность. В большинстве случаев они не могли обеспечить необходимую гибкость для интеграции с новыми технологиями, такими как возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и распределенные энергетические ресурсы [2].

С переходом к цифровым технологиям, релейная защита стала более эффективной и надежной, так как начали использовать цифровую (микропроцессорную) технику. Данное явление объясняется, прежде всего, значительными преимуществами цифровой релейной защиты по сравнению с электромеханическими и электронными системами. Эти преимущества включают:

- Повышение аппаратной надежности и уменьшение массы и размеров устройств благодаря значительному сокращению количества используемых блоков и соединений (одно микропроцессорное устройство обычно выполняет функции, для которых ранее требовалось несколько устройств).

- Улучшение удобства обслуживания и возможность сокращения числа обслуживающего персонала.

- Расширение и повышение качества защитных функций, таких как чувствительность, селективность, статическая и динамическая устойчивость.

- Возможность непосредственной регистрации процессов и событий с последующим анализом возникших повреждений в энергосистеме.

- Принципиально новые возможности управления защитой и передачи информации от нее на географически удаленные уровни управления.

Помимо этого, цифровые системы позволяют:

- Увеличить точность: Современные микропроцессорные устройства обеспечивают более высокую точность измерений и быстродействие.

- Интеграцию с другими системами: Цифровизация позволяет интегрировать РЗА с системами управления и мониторинга, что улучшает общую эффективность работы электроэнергетических систем.

- Адаптацию к изменениям: Использование машинного обучения и искусственного интеллекта позволяет системам адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, что значительно повышает их надежность.

Основные компоненты этих реле включают:

1. Микропроцессор: Центральный элемент, который выполняет обработку данных и управление всеми функциями реле. Он отвечает за выполнение алгоритмов защиты и мониторинга состояния электрических параметров.

2. Измерительные преобразователи: Эти устройства преобразуют аналоговые сигналы (напряжение и ток) в цифровые данные, которые могут быть обработаны микропроцессором. Они обеспечивают точные измерения и защиту от помех.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

3. Схемы обработки сигналов: обрабатывают входные данные, выполняя фильтрацию и анализ сигналов. Это позволяет точно определять параметры работы защищаемого оборудования и выявлять аварийные ситуации.

4. Логические элементы: используются для принятия решений на основе обработанных данных. Они активируют защитные функции в зависимости от условий, заданных в алгоритмах.

5. Память: включает как оперативную, так и энергонезависимую память для хранения программного обеспечения, настроек защиты и данных о событиях. Энергонезависимая память позволяет сохранять настройки даже при отключении питания.

6. Интерфейсы связи: обеспечивают взаимодействие цифрового реле с другими устройствами и системами управления, такими как SCADA-системы. Это позволяет передавать данные о состоянии оборудования и получать команды на управление.

7. Дисплей и индикаторы: предоставляют пользователю информацию о состоянии реле, его работе и возможных ошибках. Дисплеи могут отображать графическую информацию о состоянии системы в реальном времени.

8. Кнопки управления: позволяют оператору настраивать параметры работы реле, а также запускать или останавливать определенные функции.

Цифровые системы РЗА обладают рядом преимуществ:

- Гибкость: Возможность быстро адаптироваться к новым условиям эксплуатации и изменяющимся требованиям.

- Экономия: Снижение затрат на обслуживание благодаря повышенной надежности и уменьшению времени простоя.

- Улучшенная селективность: Цифровые устройства способны более точно идентифицировать неисправности, что позволяет минимизировать влияние аварий на сеть.

Концепция Smart Grid предполагает использование высоких технологий для управления электроэнергетическими системами. В рамках этой концепции РЗА становится более интеллектуальной:

- Централизованные системы защиты: Разработка централизованных защит на базе высокопроизводительных вычислительных систем позволяет улучшить управление режимами работы электросетей.

- Интеграция ВИЭ: цифровые системы РЗА обеспечивают эффективное управление распределенными ресурсами, что особенно важно для интеграции возобновляемых источников энергии.

Цифровизация релейной защиты представляет собой важный шаг в развитии электроэнергетических систем. Переход от традиционных методов к современным цифровым решениям не только повышает надежность и эффективность работы РЗА, но также открывает новые возможности для интеграции возобновляемых источников энергии и адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Однако для успешного внедрения этих технологий

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

необходимо учитывать возникающие вызовы, такие как кибербезопасность и сложность управления.

Библиографический список

1. Марсаков И.А. Устройства релейной защиты в условиях модернизации объектов электроэнергетики / И.А. Марсаков. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2023. — № 29 (476). — С. 17-19. — URL: <https://moluch.ru/archive/476/104931/> (дата обращения: 23.10.2024).

2. Высоких Д.Д. ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2024. 6(123). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17692> (дата обращения: 23.10.2024).

3. Средства релейной защиты и автоматики: состояние и перспективы / [Электронный ресурс] // marketelectro.ru: [сайт]. — URL: <https://marketelectro.ru/content/sredstvareleynoyzashchity> (дата обращения: 23.10.2024).

4. Булычев Александр Витальевич, Васильев Дмитрий Сергеевич, Силанов Дмитрий Николаевич Двухуровневая цифровая система управления и релейной защиты для объектов распределительного сетевого комплекса 110/35/10 кВ // Вестник ЧГУ. 2019. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhurovnevaya-tsifrovaya-sistema-upravleniya-i-releynoy-zaschity-dlya-obektov-raspredelitelnogo-setevogo-kompleksa-110-35-10-kv> (дата обращения: 23.10.2024).

5. А. Тешебаев, З. Чынгызбек К., Борубаев И.Н. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ // ReFocus. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/releynaya-zaschita-i-avtomatizatsiya-elektroenergeticheskikh-sistem> (дата обращения: 23.10.2024).

© Мусин И.Х., Гарфиев И.Б., Сандаков В.Д., 2024

УДК 621.316.925

2.2. Влияние солнечных электростанций на работу релейной защиты Бернякович Е.А.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики

Введение

В настоящее время прогрессирует интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Функционал релейной защиты (РЗ) не рассчитан на внедрение солнечных электростанций (СЭС), т.к. станции имеют полупроводниковый инверторный преобразователь, от которого и происходят изменения в работе энергосистемы.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Для того, чтобы выявить соответствующие варианты настройки РЗ была поставлена цель: изучение и анализ возникающих проблем при работе релейной защиты в энергосистемах с солнечными электростанциями, а также поиск решений возникающих проблем.

Подходы к устранению ошибок работы РЗ

Основной проблемой в работе релейной защиты в сетях с СЭС являются инверторные преобразователи (ИП). Они используются в солнечных электростанциях для преобразования постоянного тока, получаемого от солнечных панелей, в переменный ток. Это позволяет использовать энергию, полученную от солнечных панелей, в электрических системах, которые работают на переменном токе.

Инверторные преобразователи также обеспечивают эффективное управление и контроль нагрузками, подключенными к СЭС, и обеспечивают безопасность и надежность работы всей системы. Однако, имеются и очень весомые проблемы РЗ в таких системах.

Основные требования к работе релейной защиты, такие как: селективность, чувствительность, быстрдействие, надежность, резервирование могут быть не выполнены. На это влияет работа самого инверторного преобразователя. Так как внутреннее сопротивление ИП намного выше сопротивления внешней сети, то для наружной системы он выступает как источник энергии.

Также, токи подпитки КЗ в значительной мере зависят от метода подключения инверторного преобразователя к сети. Еще одной отличительной чертой солнечных электростанций с ИП является возможность как выдачи, так и потребления мощности из сети, в зависимости от режимов генерации и электропотребления в узлах. Данное условие может привести к образованию реверсивных потоков электроэнергии в распределительной сети [1].

На данный момент, принцип работы РЗ основывается на использовании источника электроэнергии, у которого внутреннее сопротивление близко к нулю. Соответственно, применение ИП сразу же заводит в тупик, ведь значение тока подпитки КЗ на выходе ИП близки к рабочему току и практически не меняются на протяжении всего переходного процесса [2]. Данный факт приводит к снижению чувствительности токовых защит.

Максимальная токовая защита (МТЗ) и токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП) напрямую основаны на контроле величины тока. При установке их в сети, где имеется СЭС, предсказать характер изменения токов в фазах при коротком замыкании (КЗ) в зоне действия защиты невозможно. Для защиты линий электропередачи (ЛЭП) в сложных сетях от замыканий на землю должны быть использованы органы направления мощности нулевой и(или) обратной последовательности. В случае использования данного органа, возможны проблемы срабатывания РЗ из-за действия инвертора, который снижает уровень тока КЗ. Это подтверждает 14-шинная схема (рис.1). С её помощью была смоделирована аварийная ситуация, когда двухфазное КЗ происходит в конце линии, в районе установки СЭС.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

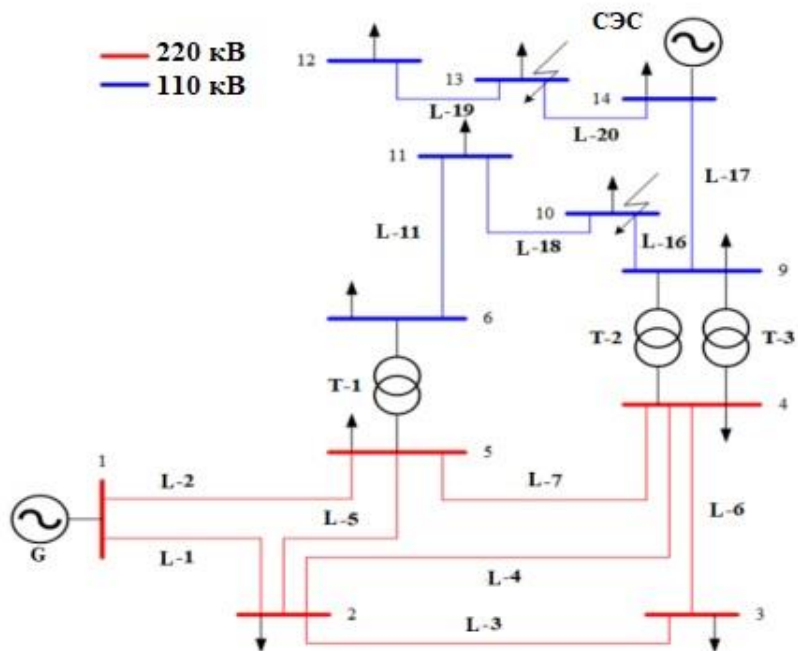


Рис. 1. Тестовая схема ЭЭС для исследований

На рис. 2 показаны изменения протекания тока короткого замыкания (зеленая кривая подразумевает собой ток короткого замыкания, синяя прямая – ток срабатывания защиты). С увеличением мощности солнечной электростанции, величина КЗ, протекающего по ЛЭП, уменьшается. Таким образом, релейная защита, установленная со стороны шин 9, не будет эффективна, т.к. величина КЗ будет меньше тока срабатывания защиты. Данный опыт подробно описывается в статье [3].

При использовании дистанционной защиты (ДЗ), которая основывается на контроле величины сопротивления до места повреждения, можно получить некорректный результат, опять же, из-за влияния инверторов на токи и напряжения в переходном процессе.

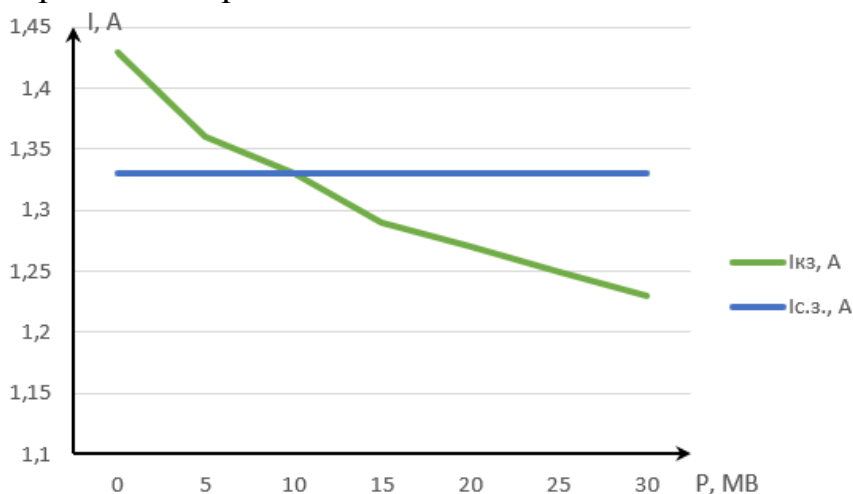


Рис. 2. Влияние СЭС на срабатывание релейной защиты

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Дифференциально-фазная защита линии (ДФЗ) подразумевает сравнение фаз токов, поступающих с двух концов системы. Сравняются фазы токов как прямой, так и обратной последовательностей, соответственно случай подавления инвертором тока, при внутреннем коротком замыкании, приведет к ошибкам в работе защиты. Это говорит о том, что для линий электропередачи, подсоединенным к солнечным электростанциям, функционал работы дифференциально-фазной защиты становится менее эффективным.

Единственный вид РЗ, которому инвертор не препятствует в работе – это дифференциальная защита линии (ДЗЛ). Она основывается на контроле направления и величины векторов тока. При внутреннем коротком замыкании, вектора от двух источников будут сходиться к месту повреждения, а подпитка со стороны энергосистемы (ЭС) будет намного больше величины рабочего тока. Как было выяснено ранее, СЭС, в виде источника дополнительного подзаряда места КЗ, подает значение лишь приближенную к рабочему току. В любом случае, в полуконструкциях будет верный результат, не зависимо от управления значениями тока и напряжения со стороны ИП, что говорит о исправности работы защиты.

Первым делом, при решении основных проблем работы релейной защиты, возможно проведение дополнительных испытаний и дальнейшая перенастройка перед её установкой, чтобы исключить возможные ошибки.

В проекте [4] описан подход к созданию РЗ, который не требует вычисления параметров – метод оценки состояний. Однако анализ показал, что данный вариант работы требует множество измеряемых параметров и проверку по различным физическим законам, что делает его применение в ЭС сложным. Также не ясно, как учитывать погрешности измерительных трансформаторов. Эта версия требует радикальных изменений в системах защиты и замены уже установленных. Хотя уже существующие алгоритмы доказали свою эффективность и надежность в работе.

При применении дифференциальной защиты линии в качестве основной, рекомендуется использовать следующие параметры:

- для отстройки от симметричных повреждений аварийные значения токов прямой последовательности ($I_{v\text{ав}}$);
- для несимметричных повреждений – токи обратной последовательности (I_2).

Для обеспечения селективной работы защиты со стороны СЭС необходимо применять дополнительные меры, такие как использование данных с удаленного конца линии от питающей энергосистемы. При возникновении короткого замыкания за пределами защищаемой зоны, аварийные токи значительно превышают номинальные токи и могут быть использованы для определения направления к месту аварии относительно шин станции [5].

Заключение

В результате изучения проблем работы релейной защиты при установке их в систему с использованием солнечных электростанций, можно сделать выводы:

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

применение стандартного комплекта защит в ряде случаев не подходит для линий в районе установки СЭС, за исключением дифференциальной защиты линии.

Рассмотренные варианты решения устраняют недостатки работы ИП и позволяют использовать защиты с небольшой модернизацией. Случаи, где нет возможности провести оптоволокну или установку всей ДЗЛ, эффективным способом следует рассмотреть применение гибридных защит с РНМ для выявления направления перетоков аварийной мощности в системе.

Цель достигнута, найденное решение важной научной проблемы способно предотвратить несрабатывание или ложную работу релейной защиты при установке её в систему с солнечными электростанциями. Можно с уверенностью утверждать о необходимости разработки новых методов и инструментов для настройки РЗ для ЭЭС с СЭ, поскольку существующие подходы недостаточно гибкие, хоть и решает долю проблем.

Библиографический список

1. Илюшин П.В., Вольный В.С. Обзор методов решения проблемных вопросов функционирования устройств защиты в microgrid напряжением до 1 кВ с распределенными источниками энергии. Релейная защиты. №04, декабрь 2022, с.6-20.
2. G. Molina Zubiri, S. Lopez Barba, I. De La Fuente Del Castillo — 21, rue d'Artois, F-75008 PARIS — B5₂₀₄_2010 (Сборник докладов конференции CIGRE 2010)
3. M.V. Andreev, M.A. Denisov, A.S. Gusev, «Impact of Renewable Energy Sources on Relay Protection Operation», in international youth scientific conference “Heat and mass transfer in the thermal control system of technical and technological energy equipment” (HMTTSC 2019), vol. 2135, episode 1.
4. A. Sinclair, D. Finney, D. Martin and P. Sharma, IEEE Transactions on Power Delivery 32, 320–330 (2017)
5. Электроэнергия. Передача и распределение. Ежеквартальный выпуск № 4 (27), декабрь 2022. с. 40–44

© Бернякович Е.А., 2024

УДК 621.316

2.3. Релейная защита и управление режимами активных электрических сетей с распределённой малой генерацией

Осинцев А.А.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»
г. Новосибирск, Россия

К числу основных трендов в развитии мировой энергетики относится децентрализация производства электроэнергии с выработкой её на электрических станциях малой мощности в составе промышленных кластеров, работающих как в составе электрических сетей существующих энергосистем, так и в удаленных районах, образующих изолированные энергосистемы малой мощности [1, 2].

Основными причинами такой децентрализации являются:

- стремление крупных потребителей к энергетической независимости;
- ограничения на подключение новых нагрузок ко многим узлам с запертыми мощностями существующих сетей;
- желание развивать периферийные зоны крупных агломераций с малой плотностью населения и большой удаленностью от существующих источников тепловой и электрической мощности;
- развитие удаленных территорий с экономической нецелесообразностью сооружения протяженных электрических связей с сетями централизованного энергоснабжения.

Приведенные причины вынуждают отказаться от гегемонии концепции централизованного развития и управления режимами электроэнергетических систем, дополнив ее возможностями и потенциалом децентрализованного развития и управления [3-7].

Сооружаемая малая генерация и объекты на ее основе интегрируются в существующие распределительные электрические сети или образуют новые электрические сети с распределенной малой генерацией, работающие изолированно или преимущественно изолированно. Такие сети, при насыщении их множеством объектов с малой генерацией, превращаются, в так называемые, активные распределительные электрические сети, представляющие собой энергосистемы нового типа, хотя и относительно малой мощности, но с большим количеством распределенной генерации. Их особенность заключается не только в специфике и разнообразии используемого генерирующего оборудования, экономической и технической нецелесообразности использования «классических» технологий и систем управления режимами, но и в многообразии интересов собственников оборудования по его использованию при осуществлении общего электрического режима, участии в различных системных услугах, обеспечивающих качество и надежность энергоснабжения потребителей.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

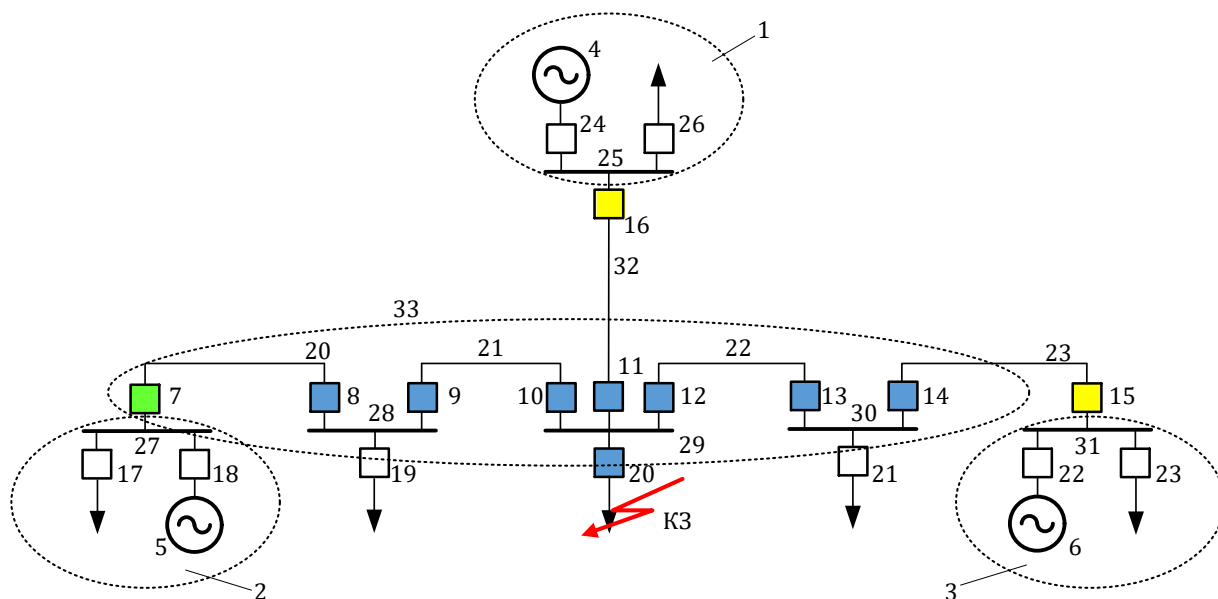
Перспективным для таких объектов становится отказ от централизованного диспетчерского, режимного и противоаварийного управлений с переходом к децентрализованному мультиагентному, не использующему иерархию, предоставляющему большую свободу в принятии решений для достижения собственных целей разным субъектам при осуществлении общего режима сети. Здесь под децентрализованной мультиагентной системой управления понимается мультиагентная система управления, функционирующая путем взаимодействия интеллектуальных агентов одного уровня без обмена информацией между ними, использующих локальную информацию о состоянии объекта управления, где агент – это сущность (лицо, автоматика и пр.), действующая по поручению (в интересах и по правилам) какого-либо субъекта (потребителя, предприятия и пр.).

В фокусе децентрализации управления рассмотрим одну из системных задач – управление работой активных электрических сетей в аварийном и послеаварийном режимах. В рамках решения поставленной задачи необходимо обеспечить быстрое действие, чувствительность и селективность релейной защиты (РЗ) при коротких замыканиях (КЗ) в сетях с объектами малой генерации, а также способность противоаварийного разделения сети на сбалансированные энергозоны с последующим восстановлением нормального режима.

Для решения поставленной задачи необходимо, в первую очередь, обеспечить управляемый распад активной электрической сети на части с последующим восстановлением её целостности. Предлагаемое решение рассмотрим на примере участка электрической сети, представленной на рис. 1. При возникновении КЗ на нагрузке (20) образуется зона сети с аварийными отклонениями параметров (33), например, происходит снижение напряжения прямой последовательности или повышение напряжения обратной последовательности до уровня, при котором невозможно существование нормального режима. Для района электрической сети с генерацией (2), находящейся в зоне пониженного напряжения автоматика опережающего сбалансированного деления опережающим образом отключает этот район (2) от сети, воздействуя на выключатель (7).

Все локальные устройства РЗ, реагирующие на отклонение напряжений прямой и обратной последовательности, в зоне сети с КЗ (33) без учета селективности действуют на отключение соответствующих выключателей, а именно устройства РЗ, установленные на ЛЭП (20,21,22,23,32) и действующие на сетевые выключатели (8,9,10,11,12,13,14), и устройство РЗ, установленное на фидере нагрузки (20), так как по фидеру протекает аварийный ток КЗ.

В целом, можно резюмировать, что происходит разделение сети на три активных части (1,2,3) и две пассивных части (шины 28,30). Пассивная нагрузка на шинах (29) не участвует в восстановлении, так как там возникло повреждение. Управляемый распад осуществлен.



**Рис. 1. Пример коммутационного состояния участка электрической сети
после возникновения короткого замыкания**

Контроллеры генераторов (4,5,6) по факту снижения напряжения запускают согласованное низкочастотное регулирование частоты и напряжения в пределах допустимых диапазонов их изменения. Также по факту восстановления напряжения котроллерам сетевых выключателей разрешается включение в синхронизированных тактах времени на интервалах своего кванта времени.

В первом такте времени (при одном из вариантов распределения квантов времени их срабатывания в синхронизированном такте времени, представленного рис.2) последовательно включаются выключатели с односторонним напряжением – 7, следом 8, далее 9, после которого – 10. На выключателе 11 запускается улавливание выполнения условий синхронизации, т.к. напряжение появляется с двух сторон отключенного выключателя, далее включается 12, следом 13. На выключателе 14 запускается улавливание выполнения условий синхронизации, т.к. напряжение появляется с двух сторон отключенного выключателя. После появления напряжения на шине 29, на выключателе 20 срабатывает автоматическое повторное включение, но, ввиду, например, не устранившегося КЗ, выключатель отключается с ускорением, сохраняя включенное состояние остальных сетевых выключателей. На рис. 3 белым цветом выделены включенные в последовательном процессе восстановления целостности сети сетевые выключатели с односторонним нормальным напряжением перед включением. Красным – выключатели с разрывом связей между активными частями сети, на которых включение возможно только с улавливанием синхронизма. Серым цветом отмечены выключатели, состояние которых не менялось в процессе распада и восстановления.



Рис. 2. Вариант распределения срабатываний сетевых выключателей по квантам в такте времени

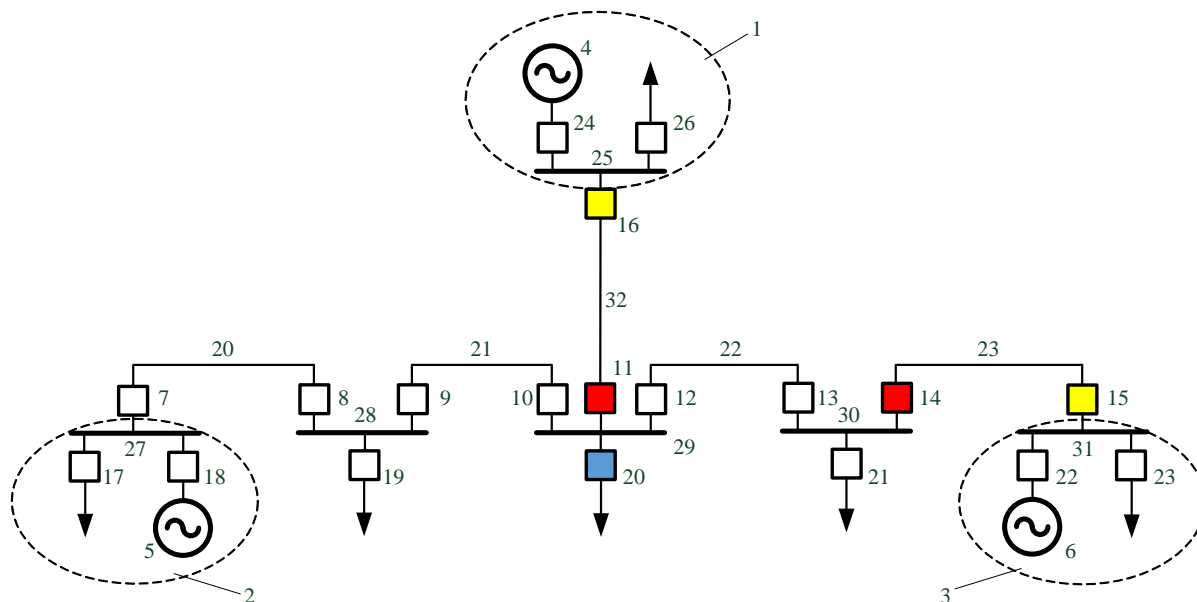


Рис. 3. Пример коммутационного состояния участка электрической сети после последовательного срабатывания сетевых выключателей с нормальным напряжением с одной стороны

Окончательное восстановление целостности сети осуществляется следующим образом: в результате согласованного низкочастотного регулирования частоты и напряжения на генераторах 4,5,6 в пределах допустимых диапазонов их изменения выполняются условия синхронизации, например, на выключателе 11. Происходит его включение, что приводит к возникновению параллельной работы генераторов 4,5 и проявлению затухающего переходного электромеханического процесса в токах генераторов. По факту возникновения частоты электромеханического процесса в токе контроллеры генераторов 4,5 прекращают согласованное низкочастотное регулирование частоты и напряжения в пределах допустимых диапазонов их изменения и переводят регуляторы возбуждения и мощности в состояние регулирования нормального режима сети.

После этого, в результате согласованного низкочастотного регулирования частоты и напряжения на генераторе 6 в пределах допустимых диапазонов их изменения выполняются условия синхронизации на выключателе 14. Происходит его включение, что приводит к возникновению параллельной работы генераторов 4,5,6 и затухающего переходного электромеханического процесса в токе генератора 6. По факту возникновения частоты электромеханического процесса в токе контроллер генератора 6 прекращает согласованное низкочастотное регулирование частоты и напряжения в пределах допустимых диапазонов их

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

изменения и переводит регуляторы возбуждения и мощности в состояние регулирования нормального режима сети.

Что касается согласованного низкочастотного регулирования частоты и напряжения, участвующего в процессе выполнения децентрализованной синхронизацией, то здесь подразумевается специальное синхронизирующее управление мощностью и возбуждением генераторов в зависимости от класса балансов активной и реактивной мощности в отделившейся части сети [8].

Процесс управления децентрализованной синхронизацией частей сети разбит на несколько этапов:

- выявление в каждой активной части сети квазиустановившегося послеаварийного режима;
- идентификация класса балансов активной и реактивной мощности в разделившихся частях сети;
- гармонизация частоты и напряжения в разделившихся частях сети;
- сканирование выполнения условий синхронизации в частях сети с балансами активной и реактивной мощности, а также на отделившихся электростанциях путем низкочастотного согласованного (гармонизированного) регулирования частоты и напряжения;
- включение сетевых коммутационных аппаратов, улавливающих выполнение условий синхронизации;
- выявление на электростанциях, включаемых на параллельную работу, признаков ее возникновения с прекращением сканирования условий синхронизации и переходом к нормальному регулированию напряжения и частоты.

Проведение экспериментов на физической модели ЭЭС прототипа децентрализованной системы управления активной электрической сети в аварийном и послеаварийном режимах, в том числе и с целью восстановления нормального режима подтвердило работоспособность предлагаемого решения.

Заключение

Развитие сетей с малой генерацией требует разработки специальных устройств, в том числе и децентрализованной системы управления активной электрической сети в аварийном и послеаварийном режимах, обеспечивающий управляемый распад на части и восстановление целостности нормального режима такой сети. Независимые системы управления объектами такой сети, по сути, становятся агентами мультиагентной системы, осуществляющими согласованное управление общим режимом.

В предлагаемом способе управления режимами сети «размываются» границы между РЗ и противоаварийной автоматикой, а совокупность всех устройств является распределённым интеллектуальным устройством. По своей сути, представленная мультиагентная система управления распадом на части восстановлением целостности нормального режима является системой распределенного искусственного интеллекта экспертного типа с центрами принятия решений по общим правилам.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Применимость предлагаемого способа управления распадом на части и восстановления нормального режима сети подтверждена на физической модели.

Библиографический список

1. Фишов А.Г. Технические и экономические аспекты создания минигридов и их интеграции с централизованным энергоснабжением // Энергетик. 2022. №4. С. 27-34.

2. Гежа Е.Н., Глазырин В.Е., Глазырин Г.Е., Ивкин Е.С., Марченко А.И., Семендяев Р.Ю., Сердюков О.В., Фишов А.Г. Системная автоматика для интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети // Релейщик, № 02(32)2018, с.24-31.

3. McArthur S.D.J. et al. Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications — Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges // IEEE Trans. Power Syst. 2007. Vol. 22, № 4. P. 1743–1752.

4. Nguyen T.-L. et al. Agent-based Distributed Event-Triggered Secondary Control for Energy Storage System in Islanded Microgrids - Cyber-Physical Validation // 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). IEEE, 2019. P. 1–6.

5. He S., Zong X. Multiagent-based Sampled-data Frequency Control of Microgrid with Additive Noise // 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020. P. 5110–5115.

6. Булатов Ю.Н., Шуманский Э.К. Мультиагентная система регулирования напряжения в электрических сетях с установками малой распределенной генерации // Труды Братского государственного университета. Серия Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 141–145.

7. Карджаубаев Н.А., Фишов А.Г. Децентрализованное мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6. С. 183–195.

8. Фишов А. Г. Синхронизация частей электрических сетей с распределёнными источниками энергии после аварийного или противоаварийного разделения / А.Г. Фишов, А.А. Осинцев, А.Х. Гуломзода // Электрические станции. – 2022. – № 11 (1096). – С. 21–29.

© Осинцев А.А., 2024

УДК 621.316

2.4. Совершенствование методов защиты распределительных сетей от однофазных замыканий на землю

Федосов Е.М., Сафин А.В.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Распределительные сети являются важным звеном современных электроэнергетических систем, от надёжной работы которых зависит бесперебойная работа большого числа потребителей. Наиболее частым видом повреждения в распределительных сетях 6-10 кВ является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), на долю которых приходится более 80 процентов всех повреждений. Традиционно, в нашей стране в сетях 6-35 кВ применяется система с изолированной нейтралью. В отличие от сетей с глухозаземлённой нейтралью, в сетях с изолированной нейтралью при ОЗЗ не возникает больших токов короткого замыкания, не искажается треугольник междуфазных напряжений, и работа сети с замкнувшейся на землю фазой допускается в течении времени, достаточного для выявления поврежденного элемента сети, перевода на другой источник питания и отключения.

Значительная часть ОЗЗ либо самоликвидируется в кратчайшее время, либо в течение минуты переходит в междуфазное короткое замыкание.

Процессы при замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью можно разделить на несколько типов:

- кратковременные пробои;
- ОЗЗ без дуги, «металлические»;
- ОЗЗ через переходное сопротивление;
- дуговые;
- обрывы ВЛ без длительного замыкания [7].

Большой части «устойчивых» замыканий предшествуют кратковременные нестабильные пробои изоляции от 1 до 20 миллисекунд, сопровождающийся бестоковой паузой (от 1 до 15 минут). Период от первого кратковременного пробоя до появления стабильного замыкания колеблется от 1 минуты до 8 дней и более.

Бездуговое ОЗЗ возникает при наличии надёжной электрической связи между поврежденной фазой и землей. В этом случае напряжение и ток нулевой последовательности можно рассматривать как синусоидальные волны с максимальной амплитудой. Бездуговое ОЗЗ является самым простым режимом работы с точки зрения защиты,

ОЗЗ через переходное сопротивление – соединение фазы с землей через неметаллический предмет (например, через деревянную часть конструкции, при падении провода на сухую землю и т.п.) иногда может привести к короткому замыканию с очень высоким контактным сопротивлением. При падении

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

проводов ЛЭП 35 кВ на песок было замечено, что сопротивление перехода изменилось примерно с 8 кОм до 6 кОм за несколько секунд.

Дуговое замыкание наблюдается при пробое изоляции фаз. При этом часто наблюдается «прерывистая» форма кривой тока в дуге. При замыкании на землю ток в реле защиты прерывается на некоторое время и содержит много высокочастотных составляющих.

При определенных обстоятельствах субгармонические составляющие могут появиться и в токах и напряжениях нулевой последовательности.

Большое количество высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности поврежденных и неповрежденных линий электропередачи могут привести к неселективному срабатыванию защиты. Например, в некоторых экспериментах ток нулевой последовательности неповрежденной линии электропередачи в несколько раз превышает собственный емкостной ток металлического короткого замыкания. Это объясняется тем, что высокочастотные составляющие напряжения нулевой последовательности (особенно создаваемые дугами) существенно «усиливаются» в емкостном токе ЛЭП из-за увеличения емкостного реактивного сопротивления пропорционально частоте. Поэтому ток в неповрежденной линии может значительно превышать емкостной ток, определяемый с помощью металлического ОЗЗ, который используется для расчета уставок защиты.

Иногда в сетях 6–35 кВ возникают неисправности, которые не вызывают постоянного протекания тока нулевой последовательности, но кажутся «соседними» к короткому замыканию, например, при обрыве линии воздушной линии электропередачи. Если кабель подвешен без контакта с опорой, то ток нулевой последовательности отсутствует и обычная защита от короткого замыкания не оказывает никакого эффекта. При тряске ветром цепь может ненадолго приблизиться к опоре, вызывая «клевок» защиты, но из-за малого времени действия этого ОЗЗ этого обычно не происходит. На поведение защиты от ОЗЗ также большое влияние оказывают конструкция сети, режим ее работы и конструкция линий электропередачи. Известно, что в процессы ОЗЗ на ВЛ и КЛ осуществляется по-разному.

Не смотря на то, что при ОЗЗ токи на землю относительно небольшие, и данный режим считается ненормальным, а не аварийным, при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью возникает ряд негативных последствий, к которым относятся:

- перенапряжения порядка 2,4 – 3,5 кратных по сравнению с фазным;
- возникновение феррорезонансных явлений, в результате которых выходят из строя трансформаторы напряжения;
- появление двойных замыканий на землю, что может привести к отключению вводов 6-10 кВ;
- разрушение железобетонных опор в результате перекрытия фазной изоляции на арматуру опоры, высыхание и увеличение сопротивления грунта;
- перегрев экрана кабелей из сшитого полиэтилена и пожар изоляции;

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

- межвитковые КЗ в статорах высоковольтных электрических машин и т.д.;

Согласно требованиям ПТЭ электрических станций и сетей [2], компенсация емкостного тока замыкания на землю дугогасящими реакторами должна применяться при емкостных токах, превышающих следующие значения:

- при номинальном напряжении сети 6 кВ - 30 А;

- при номинальном напряжении сети 10 кВ - 20 А;

Расчетные исследования процессов при ОЗЗ в совокупности и многолетний опыт эксплуатации сетей с компенсированным режимом работы сети, накопленным во всем мире позволяют говорить о недостатках режима заземления нейтрали через ДГР, таких как:

- повышение величины дуговых перенапряжений пропорционально росту расстройки компенсации;

- вероятность появления многоместных повреждений при длительном дуговом замыкании в сети;

- возможность перехода однофазного замыкания в двухфазное при значительной расстройке компенсации;

- вероятность сильных смещений нейтрали при недокомпенсации и появлении неполнофазных режимов;

- возможность сильных смещений нейтрали при настройке в резонанс в ВЛ ввиду несимметрии емкостей по фазам;

- сложность настройки селективности и чувствительности защит от ОЗЗ в связи с протеканием емкостного тока ОЗЗ по всем фидерам, присоединенным к секции с поврежденным фидером [3]

- вероятность электропоражения людей и животных при длительном существовании ОЗЗ.

Указанные недостатки компенсированного режима сети отчасти нейтрализуются переходом на такие режимы, как:

- резистивное заземление нейтрали через высокоомный резистор;

- заземление нейтрали сети через низкоомный резистор (низкоомное заземление нейтрали);

- комбинированное заземление нейтрали сети через дугогасящий реактор и высокоомный резистор.

Для определения оптимального режима заземления нейтрали сети 6 кВ в качестве объекта исследования в работе принята сеть 6 кВ подстанции 110/35/6 кВ ПО «УГЭС» ООО «Башкирэнерго» «Набережная».

Согласно исходным данным, измеренные значения емкостных токов в сети 6 кВ ПС «Набережная» составляют 57,5А на 1 секции шин и 61,7 А на 2 секции шин. Согласно ПТЭ, на подстанции принята компенсация емкостных токов с помощью дугогасящих реакторов. Среднее количество замыканий на землю и аварийных отключений в год в электрических сетях 6 кВ ПС «Набережная» с учетом смежных участков сетей 6 кВ – с 01.01.2022г. по 20.02.2023г. составляет 65 отключений.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Для оценки возможных перенапряжений при дуговых ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Набережная» с существующим режимом заземления нейтрали (заземление нейтрали через ДГР) были проведены исследования с помощью компьютерного моделирования в системе «Matlab» с дополнительным пакетом расширения Simulink, построена модель сети 6 кВ ПС «Набережная», представленная на рис. 1.

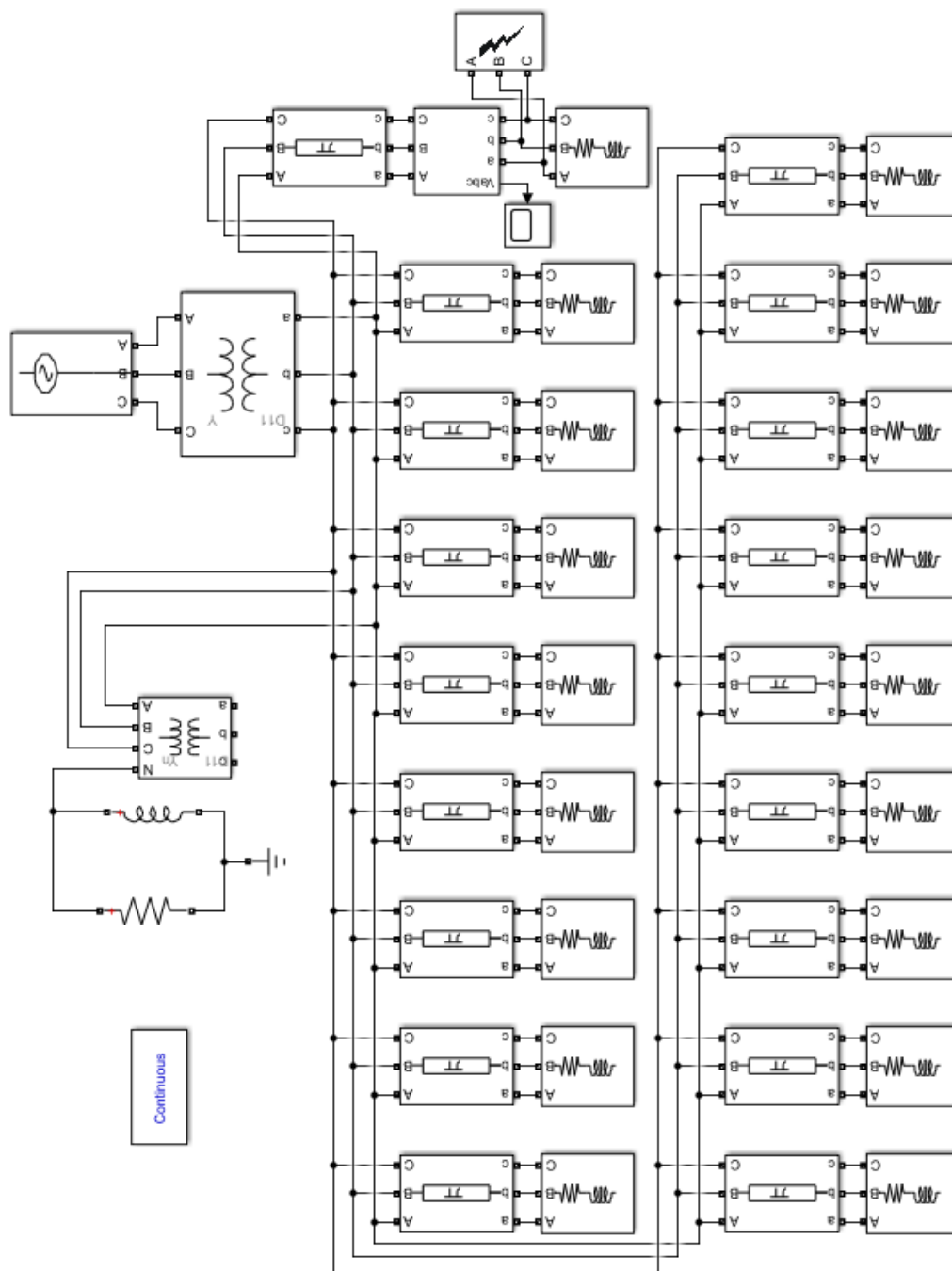


Рис. 1. Схема замещения ПС «Набережная»

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Результаты моделирования показали, что полученные с помощью модели токи ОЗЗ соотносятся с измеренными токами ОЗЗ в пределах погрешности не более 10%, что свидетельствует о достоверности модели.

Результаты расчета перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ при существующем режиме заземления нейтрали приведены на рис. 2

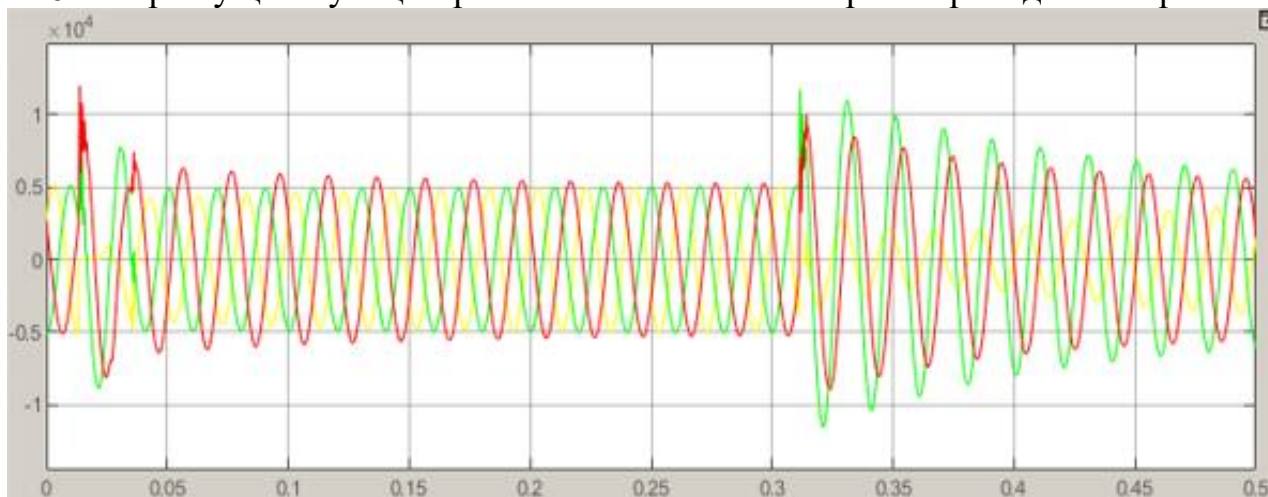


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на фазах в месте замыкания при ОЗЗ на фазе А в сети 1СШ 6 кВ ПС «Набережная» с ДГР в нейтрали при резонансной настройке

За счет колебательного характера переходного процесса, обусловленного перезарядом фазной емкости при зажигании и погасании дуги, максимум перенапряжений K_n после первого зажигания дуги достигает в месте замыкания $2U_{фmax}$. Последующие зажигания дуги происходят при ненулевом значении напряжения на нейтрали, в результате чего перенапряжения на здоровых фазах могут достигать $2U_{фmax}$ при замыканиях на 1СШ и 2СШ.

Таблица 1. Уровни перенапряжения при различных токах раскомпенсации

№ ячейки	7	11	37	85
I, A	2,51	3,85	4,79	3,79
K_n	2,41	2,48	2,7	2,56

Расчеты показали, что кратность перенапряжений при ОЗЗ на неповрежденных фазах возрастает до значения $2,7 U_{фmax}$.

В целях нейтрали был выбран режим комбинированной нейтрали. По результатам расчётов, добавление в существующую систему резистора, в диапазоне от 1090 до 1450 Ом и настройка ДГР на режим компенсации емкостных токов с точностью не хуже $\pm 5\%$ позволяет ограничить перенапряжения до уровня не более $2,35 U_{фmax}$ [4].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

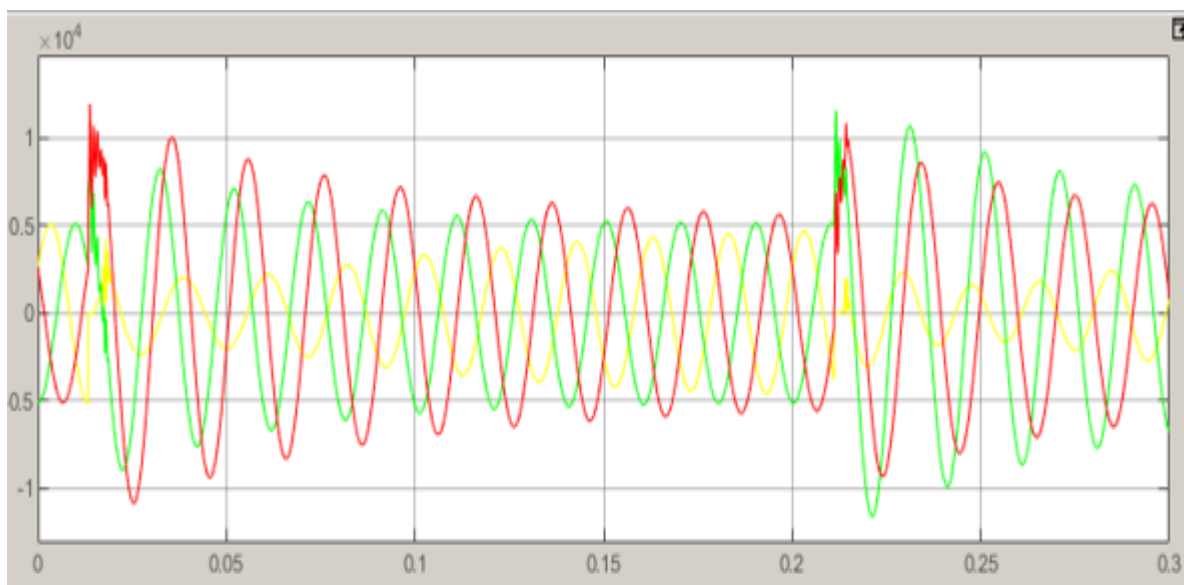


Рис. 3. Фазные напряжения сети 1СШ 6 кВ ПС «Набережная» при установке параллельно ДГР резистора с сопротивлением 1090 Ом, $K_{IT}=2,312$

На рис. 4 представлена кривая зависимости кратности перенапряжений от сопротивления резистора.

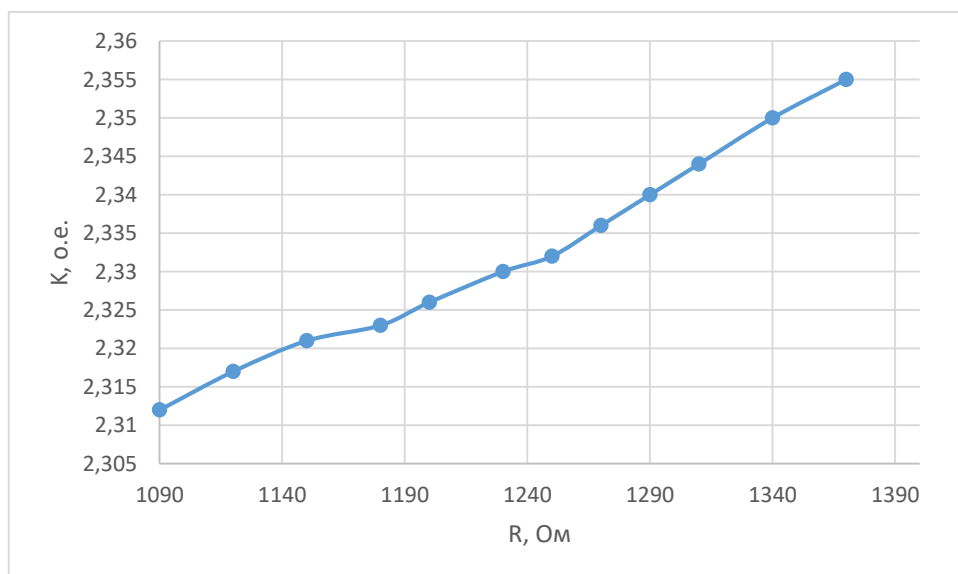


Рис. 4. Зависимость кратности перенапряжений от сопротивления резистора

На основании расчета переходных процессов при ОЗЗ в сети 6 кВ, запитанной от ПС «Набережная», при переходе к комбинированному режиму заземления нейтрали можно сделать следующие выводы: выполненные расчетные исследования переходных процессов при дуговых ОЗЗ в сети 6 кВ ПС «Набережная» с включением параллельно ДГР силовых резисторов показали, что при установке $R \leq 1250$ Ом достигается достаточно глубокое ограничение перенапряжений при дуговых ОЗЗ до уровня не более $2,332U_{\phi\max}$, не превышающего перенапряжений при первом пробое и относительно безопасного

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

для изоляции оборудования, испытываемого согласно существующим требованиям. Осциллограммы также свидетельствуют об отсутствии феррорезонансных явлений при дуговых замыканиях в сети с ДГР и резисторами с расчетными сопротивлениями [4].

Резисторы меньшего сопротивления (например, 1090 Ом) обеспечивают более глубокое ограничение перенапряжений, но также имеют более высокие массогабаритные показатели и являются более дорогостоящими, поэтому оптимальным является вариант использования резисторов типа РЗ-1250-48-6-УХЛ1 с сопротивлением 1250 Ом. Установка на каждой секции 6 кВ ПС «Набережная» резистора 1250 Ом также позволит ограничить перенапряжения до значений не более $2,33U_{фmax}$ при расстройках компенсации примерно до 9 % в каждой части сети 6 кВ.

Таким образом, для установки на каждой секции 6 кВ ПС «Набережная» необходимо использовать резистор сопротивлением 1250 Ом, рассчитанный на наибольшее рабочее напряжение 7,5 кВ, с допуском на сопротивление $\pm 10\%$ по ГОСТ 9664-74.

Библиографический список

1. Борковский С.О. Горева Т.С. Горева Т.И. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю // Фундаментальные исследования – 2014 – № 9(5) – С. 954-959 URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34996> (дата обращения: 21.10.2024)

2. Приказ Минэнерго России от 04.10.2022 N 1070 "Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и о внесении изменений в приказы Минэнерго России от 13 сентября 2018 г. N 757, от 12 июля 2018 г. N 548" (Зарегистрировано в Минюсте России 06.12.2022 N 71384)

3. Релейная защита энергетических систем: [учебное пособие для студентов техникумов электроэнергетических специальностей] / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. — Стер. изд. 1998 г. — Москва: Энергоатомиздат, 2007. — 798.

4. Сафин Артём Винерович. Исследование и совершенствование методов защиты распределительных сетей от однофазных замыканий на землю: выпускная квалификационная работа / Сафин Артём Винерович; УУНиТ, Кафедра электромеханики; научный руководитель Д.В. Максудов; консультант Е.М. Федосов. — Уфа, 2024. — 94 с. — 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. — магистратура. — Очная. — <URL:http://e-library.ufa-rb.ru/dl/VKR/2024/Safin_AV_PISH-ED-218M_13.04.02_Elektroenergetika_i_elektrotekhnika_06.2024_resized.pdf

© Федосов Е.М., Сафин А.В., 2024

УДК 621.3

2.5. Модель оптического трансформатора тока

Мирзаянов Р.Р., Вавилов В.Е., Миргалиев А.А., Бородин Д.С.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

В современных электрических сетях широко применяются традиционные (аналоговые) трансформаторы тока, которые сложно внести в единую сеть мониторинга. Они не отвечают современным стандартам и поэтому активно ведутся научные исследования в сфере оптических преобразователей. Благодаря исключению воздействия нагрузки во вторичной цепи, высокой линейности характеристик, устойчивости к внешним электромагнитным помехам, отсутствию резонанса, высокой безопасности, низким массогабаритным характеристикам, оптические трансформаторы тока (ОТТ) смогут продвинуть качество и безопасность энергосистемы. Поэтому оптические преобразователи необходимо совершенствовать для дальнейшего улучшения энергосистемы.

Активное внедрение ОТТ в связи с цифровизацией потребовало от исследователей разработки моделей. Однако наиболее полная модель так и не была представлена.

В литературе по моделированию оптических трансформаторов тока показано, что исследования, проведенные таким способом, различаются в зависимости от принципов работы системы. Некоторые исследования были сосредоточены только на моделировании оптических частей ОТТ, в то время как другие были направлены на разработку более совершенных алгоритмов управления.

Данная работа преследует следующие цели:

1. Рассмотреть и проанализировать существующие модели ОТТ.
2. Определить наиболее приближенный и полный вариант модели ОТТ.
3. Рассмотреть выбранный вариант модели ОТТ и создать план доработки.

Обзор моделей ОТТ

В исследовании [1] представлена методология разработки различных моделей аналогового выхода ОТТ. Представлены три типа моделей: аналоговая, цифровая и полная. Нас интересует полная модель.

Полная модель состоит из оптической части и электроники. Для моделирования оптических элементов использовался математический метод Джонса, а для электронной модели используется передаточная функция, основанная на частотной характеристике. Эти две модели объединены для получения полной модели. Обе модели основаны на программе, написанной в Matlab, и используются при моделировании энергосистемы в Simulink.

Блок-схема ОТТ NxtPhase показана на Рис. 1. Принцип работы ОТТ следующий. Свет от источника, главным образом светодиода (LED), попадает в волоконно-оптический поляризатор. Свет поляризуется и затем делится на две ортогонально поляризованные световые волны в поляризаторе. Далее свет попадает в чувствительную головку, которая включает в себя четвертьволновую

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

пластину, преобразующую две линейные ортогональные волны в круговые с правой и левой поляризацией соответственно. Эти две волны проходят через чувствительное волокно с разной скоростью. Разница в скоростях пропорциональна напряженности магнитного поля, направленного на чувствительное волокно. После прохождения в области измерения две волны отражаются от зеркала. Отражение приводит к смене или инверсии круговой поляризации двух волн, после чего они движутся в противоположном направлении относительно магнитного поля. Во время движения в обратном направлении две волны продолжают сохранять свои различия в скорости при возвращении через чувствительное волокно.

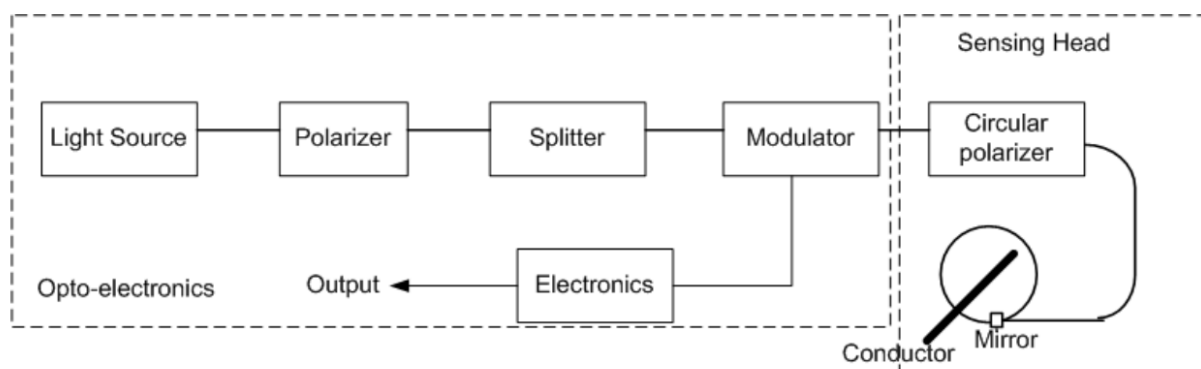


Рис. 1. Блок-схема ОТТ NxtPhase.

Результаты сравнения выходного (фазовый сдвиг в градусах) и входного сигналов (ток в амперах) показывают, что выходной сигнал пропорционален входному сигналу тока и имеет те же характеристики. Сравнение представлено на Рис. 2.

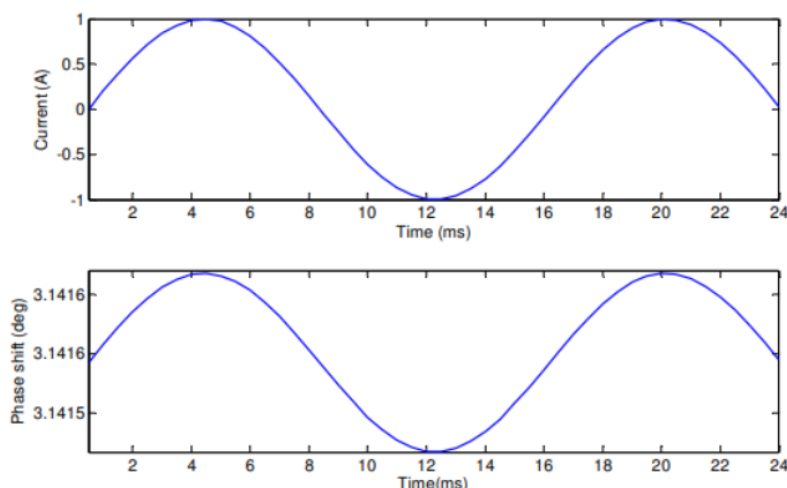


Рис. 2. Зависимость фазового сдвига и входного тока.

Поскольку оптическая часть системы не зависит от частоты, полученные характеристики применимы к электронике системы. Электроника включает блок обработки сигналов, который обрабатывает информацию, поступающую от

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

оптических частей, и генерирует выходной сигнал через схемы фильтров. Полученные частотные характеристики имеют аналогичные характеристики фильтра, поэтому они используются для моделирования электроники системы. Передаточная функция (которая может быть в s -области или z -области) представляет характеристики электроники и объединены с оптической моделью.

На Рис. 3 представлена полная разработанная модель и ее реализация в схемотехническом моделировании. Ток в цепи измеряется с помощью оптической модели, и электроника генерирует выходной сигнал, который сравнивается с сигналом входного тока. Сравнение показано на Рис. 4. Результаты, полученные автором, показывают, что модель ОТТ успешно воспроизводит входной ток.

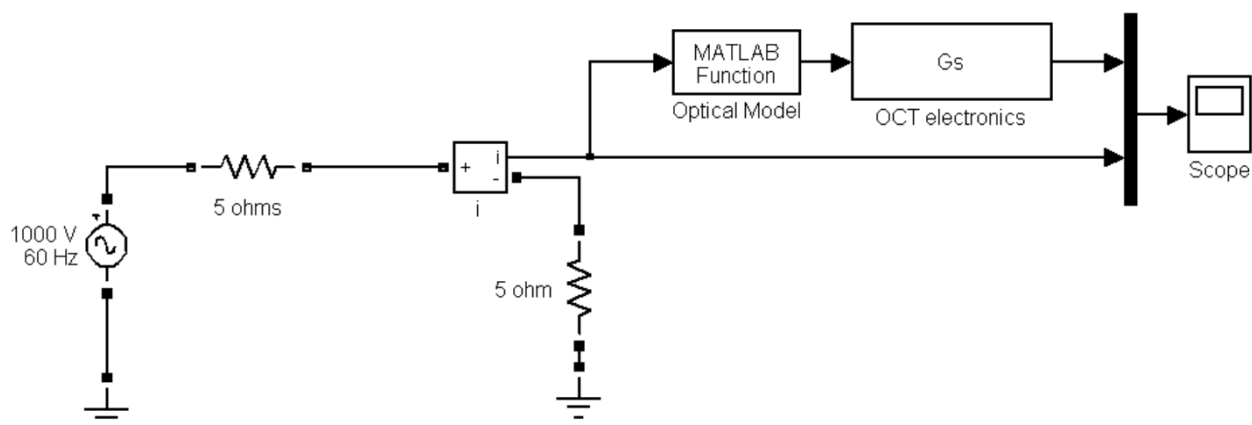


Рис. 3. Полная модель ОТТ.

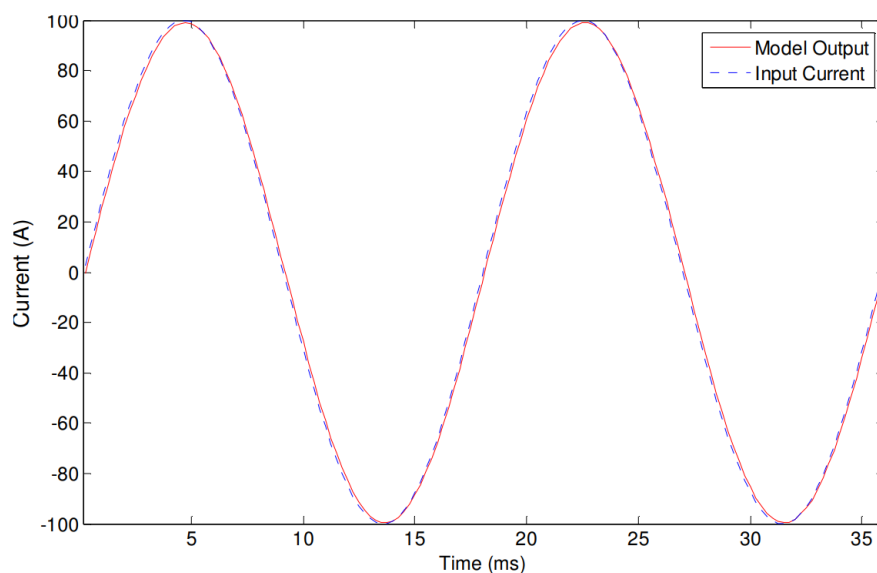


Рис. 4. Сравнение входного тока и выходного сигнала модели ОТТ.

Частотные характеристики полной модели были сравнены автором с экспериментальными данными. Максимальное отклонение в амплитуде составило 0.88%, а в фазе — 2.41%.

В работе [2] была разработана модель оптического трансформатора тока с использованием операционных усилителей. Для моделирования они

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

использовали выходной сигнал с низким энергопотреблением и данные о частотной характеристике из [3]. Основываясь на полученных частотных характеристиках, они определили коэффициенты передаточной функции методом кривой аппроксимации. График, полученный с помощью передаточной функции, практически совпал с экспериментальными значениями. Путем расчетов и использований функции в Matlab получили окончательную схмотехническую модель передаточной функции $H(s)$ на основе данных ОТТ (Рис. 5)

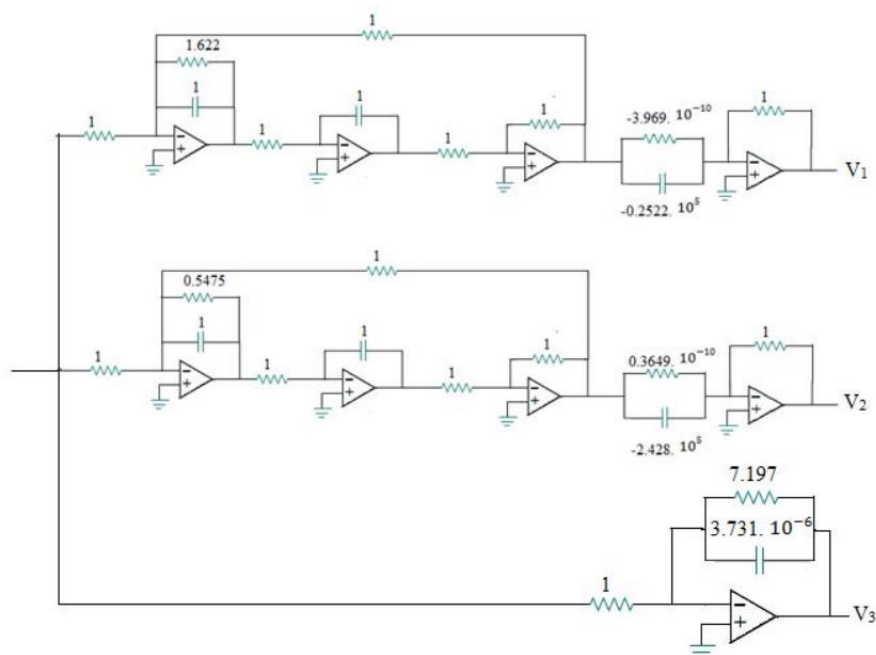


Рис. 5. Схмотехническая модель для $H(s)$.

Для имитационной модели авторами был разработан код в Matlab, который использовался для сравнения реальной модели ОТТ и разработанной передаточной функции. На рисунке 6 представлен сравнительный график, демонстрирующий схожесть между реальной и разработанной моделью.

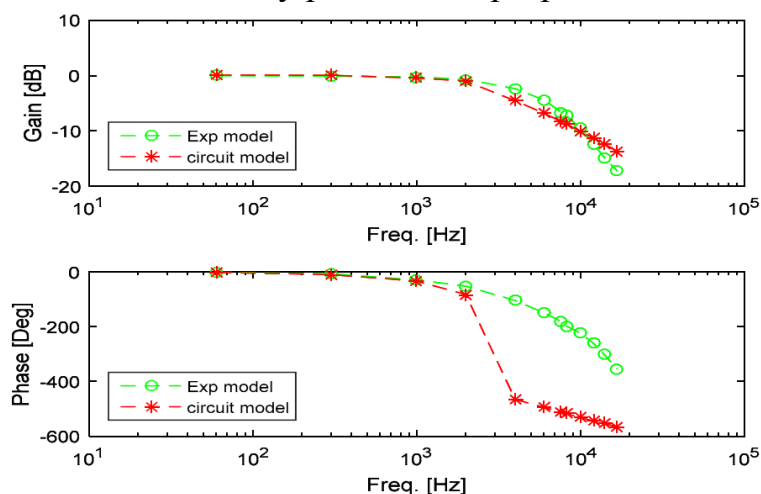


Рис. 6. График сравнения реальной модели ОТТ и моделирования ОТТ на основе операционного усилителя.

В работе [4] была разработана структурная модель ОТТ (Рис. 7). Авторами был проанализирован его механизм. Структурная схема основывается на математической модели.

Из-за механизма разомкнутого контура ОТТ не соответствует требованиям к точности измерений на практике. Выходом в данной ситуации является проектирование ОТТ как систему с замкнутым контуром. Авторы предложили адаптивное подавление шума (Рис. 8).

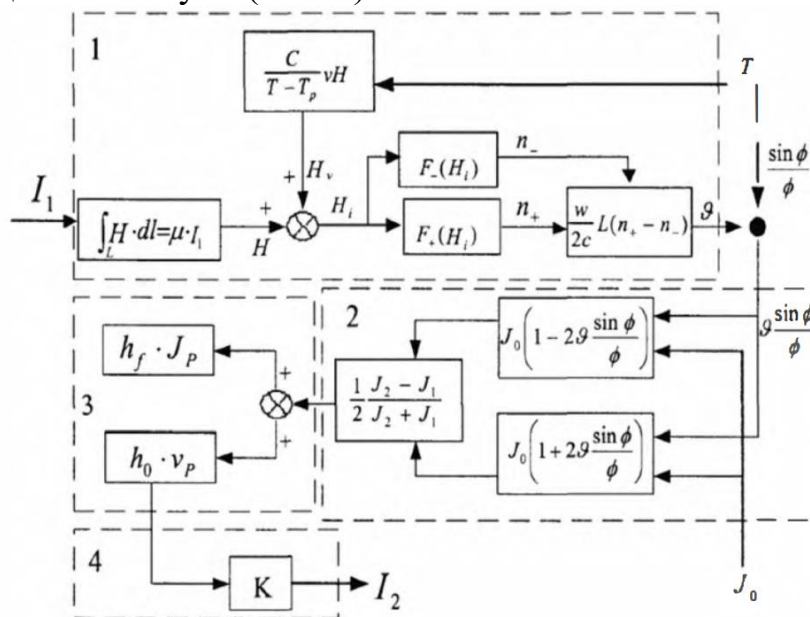


Рис. 7. Структурная схема ОТТ.

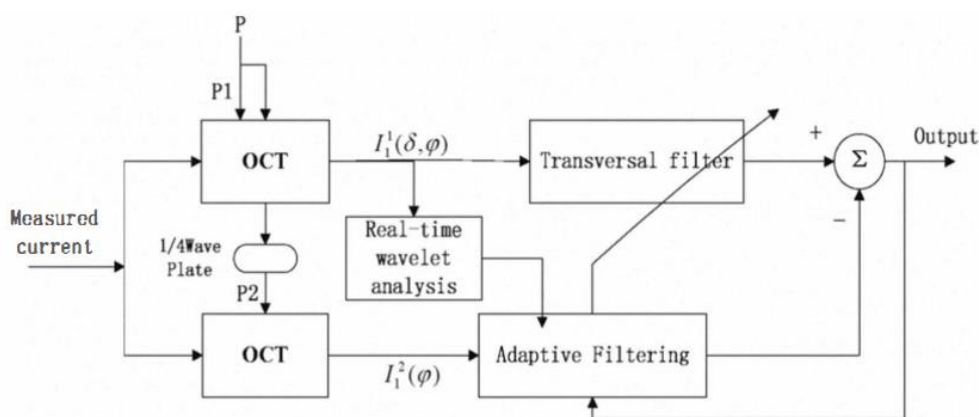


Рис. 8. Структурная схема ОТТ с независимым световым путем.

Система выполняет адаптивную коррекцию в реальном времени с помощью измерительного выхода оптического трансформатора тока с использованием адаптивной фильтрации. В результате авторами был реализован алгоритм адаптивной фильтрации в реальном времени, позволивший решить проблемы температурного воздействия на датчик.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

В работе [5] была построена оптическая модель ОТТ с открытым сердечником из стекла. С помощью программного обеспечения FEM и COMSOL была разработана геометрическая и функциональная модель. Используя адаптированные данные, полученные в ходе другой работы автора, была сформулирована полная оптическая модель в Matlab Simulink.

Автору удалось достичь точность соответствующий классу точности 0,2S. Испытания по вибрации показали значительные погрешности при измерении. Для устранения этого автор предлагает ОТТ с замкнутым сердечником или несколько ОТТ с открытым сердечником на фазу.

Опыты автора показали, что значительное расстояние от проводника сильно снижает воздействие первичного проводника и увеличивает процент погрешности измерения магнитных полей рассеяния. С этими рассеянными магнитными полями необходимо бороться либо путем компенсации в конструкции с открытым сердечником, либо путем применения ОТТ с закрытым сердечником.

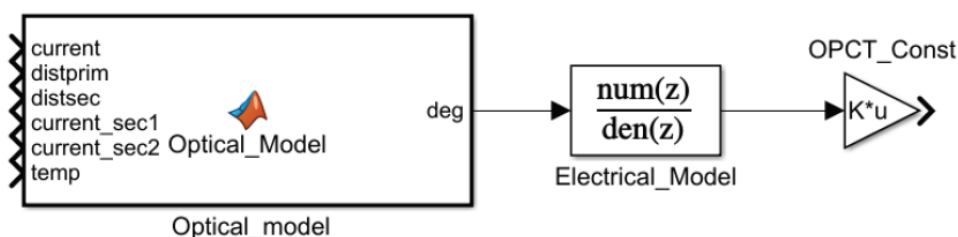


Рис. 9. Модель ОТТ, представленная в Simulink.

Из рассмотренных моделей наиболее полная и достоверная является работа S. Kucuksari. Она включает в себя как оптическую, так и электронную составляющую. Остальные же работы рассматривают эти части по отдельности и не имеют полной картины модели. Данная модель ОТТ была проверена также в Matlab Simulink и все результаты подтвердились.

Заключение

В данной работе были рассмотрены различные модели оптических преобразователей тока и решения, применяемые для реализации и моделирования ОТТ. Существует множество моделей оптической части, но мало электронной части. Были рассмотрены электрические схемы блоков электроники, которые работали как передаточная функция, позволяющие получить аналоговый выход. Недостатками ОТТ являются зависимость от расстояния, температуры, шума, вибрации и магнитных полей рассеивания, которые можно устранить разными методами. Так же к недостаткам можно отнести их дороговизну. Однако благодаря высокой точности, возможности работать в сложных условиях и многим другим преимуществам, ОТТ является актуальными и востребованными.

Так как, разработанные модели предназначены только для моделей с аналоговым выходом, необходимо разработать цифровой выход для оптического

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

преобразователя тока. Также можно проанализировать данные модели с помощью метода конечных элементов для получения более полной модели ОТТ.

Библиографический список

1. Kucuksari S., Karady G.: Complete model development for an optical current transformer. *IEEE Trans. Power Deliv.* 27(4), 1755–1762 (2012).
2. Ashraf H.M.; Abbas G.; Ali U. Modeling and Simulation of Optical Current Transformer using Operational Amplifiers. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Lahore, Pakistan, 2–4 March 2017.
3. M. Kezunovic, L. Portillo, G. Karady and S. Kucuksari, Impact of Optical Instrument Transformer Characteristics on the Performance of Protective Relays and Power Quality Meters, 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas, 2006, pp. 1-7.
4. G. Weina, H. Wenjie, Research of Optical current transformer's signal processing system, 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), Chengdu, 2010, pp. V5- 385-V5-388.
5. Oppegard, A.; Katoulai, M.K.; Oleinikova, I. Complete FEM-based model of a bulk-glass optical current transformer. In *Proceedings of the International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Eindhoven, The Netherlands, 5–7 September 2022.

© Мирзаянов Р.Р., Вавилов В.Е., Миргалиев А.А., Бородин Д.С.,
2024

СЕКЦИЯ III. ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

УДК 621.313.3

3.1. Применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в
объектах энергетики

Магоммедов Э.Ш., Коломенцева Д.А., Мойzych М.Е.
ЗАО «СуперОкс»

Ключевые слова: сверхпроводник, ВТСП, ТОУ, короткие замыкания, сверхпроводниковый кабель, линия электропередачи

Введение

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) – это материалы, позволяющие создавать новое оборудование для электроэнергетики с уникальными характеристиками и открывающими новые возможности для отраслей передачи и генерации электроэнергии. За последнее десятилетие ВТСП стал коммерчески доступным материалом (Рис. 1), что обеспечило возможность создания энергетического оборудования на его основе [1].

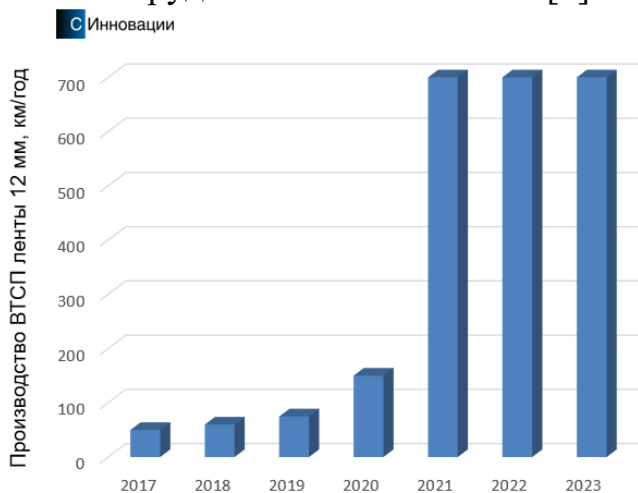


Рис. 1. Производительность ВТСП в компании С-Инновации за последние 10 лет выросла более чем в 10 раз.

ВТСП уже сейчас применяются в электроэнергетическом комплексе в виде различного оборудования для решения ряда задач, в частности:

- ВТСП-кабельные линии – для передачи электроэнергии;
- Токоограничивающие устройства на основе ВТСП (ВТСП ТОУ) – для повышения надежности электроснабжения, повышения устойчивости работы генерации, снижения токов короткого замыкания вблизи объекта установки ВТСП ТОУ (т.е. для снижения требований к стойкости прилегающего оборудования к коротким замыканиям);

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

В высокой степени готовности находятся технологии генерации электроэнергии с применением ВТСП:

- ВТСП-генераторы отличаются сниженными массогабаритными характеристиками в сравнении традиционными аналогами;
- ВТСП уже открыл новые возможности в исследованиях физики плазмы и термоядерного синтеза, что подтверждается стремительным увеличением проектов по созданию коммерческих термоядерных реакторов [2] (Рис. 2.), совпадающим с расширением доступности ВТСП.

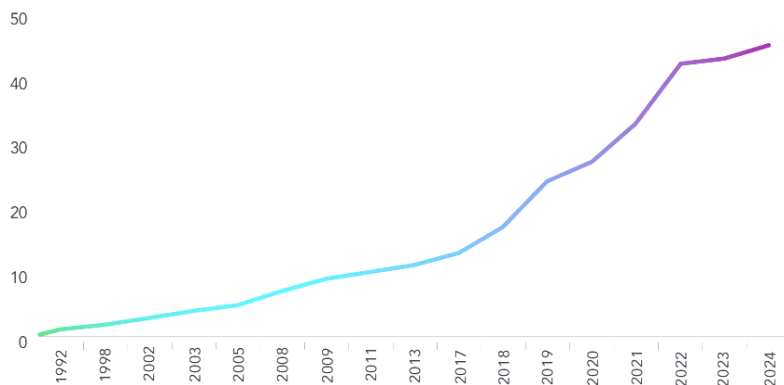


Рис. 2. Рост количества проектов по созданию коммерческого термоядерного реактора.

Основная часть

Обзор посвящен примерам применения ВТСП-оборудования в наибольшей степени технологической готовности, доступным в виде оборудования с установкой «под ключ»: токоограничивающим устройствам и кабельным линиям электропередачи.

Токоограничивающие устройства на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП ТОУ) позволяют быстро и эффективно ограничивать токи короткого замыкания и предназначены для защиты сетевого оборудования и кабельных линий (рис. 3).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

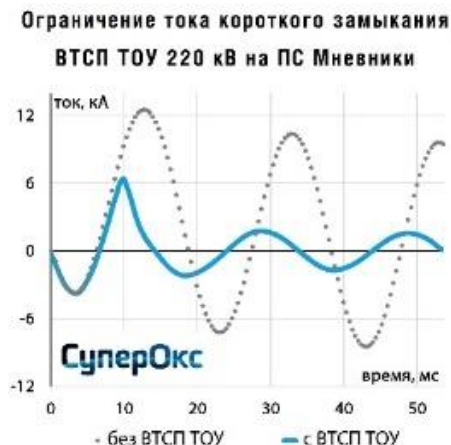


Рис. 3. Пример работы ВТСП ТОУ – осциллограмма ограничения тока короткого замыкания с применением ВТСП ТОУ 220 кВ на ПС Мневники в Москве.

В отличие от традиционных решений (токоограничивающих реакторов) ВТСП ТОУ обладает переменным сопротивлением, что позволяет снизить нагрузку на сеть в номинальном режиме (сопротивление устройства близко к нулю), а при возникновении коротких замыканий эффективно ограничить ток за счет мгновенного роста сопротивления.

На сегодняшний день более 20 ВТСП ТОУ были успешно изготовлены, испытаны и введены в эксплуатацию в сети [3, 4, 5], при этом ВТСП ТОУ с самой высокой номинальной мощностью (1200 А, 220 кВ) установлен в Москве на ПС 220/20 кВ Мневники (Рис. 4) и находится в непрерывной эксплуатации с 2019 года [6]. Ведется проектирование новых высоковольтных ВТСП ТОУ, включая устройство на 160 кВ в Китае [7] и 380 кВ в Европе [8].



Рис. 4. ВТСП ТОУ 220 кВ, ПС Мневники в Москве.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ВТСП ТООУ является нетиповым инновационным устройством, однако в работе [9] показано, что возможно изготовить устройство, соответствующее существующим отраслевым стандартам [10, 11, 12] на токоограничивающие реакторы (как ближайший аналог), что позволяет подходить к проектированию установки этого оборудования как к типовым энергообъектам. Основные характеристики подобных устройств, соответствующих стандартам, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры ВТСП ТООУ

Номинальное напряжение	6, 10, 35, 110, 220 кВ
Номинальная частота сети	50 Гц
Тип (класс)	Резистивное, индуктивное
Номинальный ток	250, 400, 630, 1000, 1200, 1600 А
Ток электродинамической стойкости	3 - 6 кВ – 8 кА
	10 - 35 кВ – 9 кА
	110 - 220 кВ – 29 кА
Полное сопротивление в номинальном режиме	Не более 0,1 Ом
Сопротивление	0,4 - 6,6 Ом
Термическая стойкость	3 с
Время восстановления после КЗ при протекании номинального тока	Не более 5 минут

Применение ВТСП ТООУ является экономически обоснованным решением. Показательной является оценка стоимости замыкания ранее разорванной транзитной линии в Москве с учетом выполнения мер для сохранения стабильности электросети. При замыкании транзита повышается надежность сети, но в то же время растут токи короткого замыкания. Это приводит к необходимости либо замены всех выключателей, у которых наблюдается превышение номинальных значений отключаемого тока, либо использованию ограничивающего токи короткого замыкания ВТСП ТООУ. Замыкание транзитной линии с применением ВТСП ТООУ обходится на 39-409 млн долларов дешевле по сравнению с заменой выключателей [13], [14].

Характеристики ВТСП ТООУ также позволяют использовать это оборудования для защиты непрерывных производств от просадок напряжения при внешних коротких замыканиях, а также для повышения устойчивости работы генераторного оборудования.

Сверхпроводящие кабели могут применяться в плотной городской застройке для передачи больших токов с низкими потерями. Отдельным преимуществом является возможность передавать большую мощность на низком напряжении и высоком токе (свыше 2кА), что упрощает и удешевляет окружающую кабель энергетическую инфраструктуру.

На текущий момент в мире установлено более десяти кабелей на различные классы напряжений от 10 до 138 кВ [3, 15, 16, 17]. В России НТЦ ФСК готовится

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

к запуску 50 МВт 20кВ ВТСП кабельной линии постоянного тока Трикотажная – Герцево длиной 2500 м. в городе Санкт-Петербург (Рис. 5.) [18]. В последние годы также ведется разработка воздушных линий постоянного и переменного тока [19]. Примеры кабельных проектов приведены в таблице 2.



Рис. 5. ВТСП кабель в криостате на транспортной катушке [18]

Таблица 2. Параметры некоторых проектов ВТСП кабелей

Компания-изготовитель	Страна	Номинальная мощность	Номинальное напряжение	Длина кабеля	Тип кабеля	Ссылка
ВТСП кабель НТЦ Россети ФСК ЕЭС	Россия	50 МВт	20 кВ	2500 м	DC	[18]
RWE, Nexans and KIT	Германия	40 МВт	10 кВ	1000 м	AC	[3]
State Grid Corporation Shanghai Electric Power Company	Китай	77 МВт	35 кВ	1200 м	AC	[15]
Korea Electric Power Corporation	Южная Корея	50 МВт	23 кВ	1000 м	AC	[16]
Nexans	США	574 МВт	138kV	660 м	AC	[17]

Применение ВТСП-кабелей также является экономически обоснованным решением. Например, экономическое обоснование целесообразности использования сверхпроводящих кабелей в России в сравнении с традиционными решениями представлено в работе [20], где экономический эффект заключается в снижении операционных расходов и большего дисконтированного дохода (Рис. 6) уже за период 10 - летней эксплуатации. В данном случае использование ВТСП кабеля уменьшало необходимые общие затраты на 18%.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

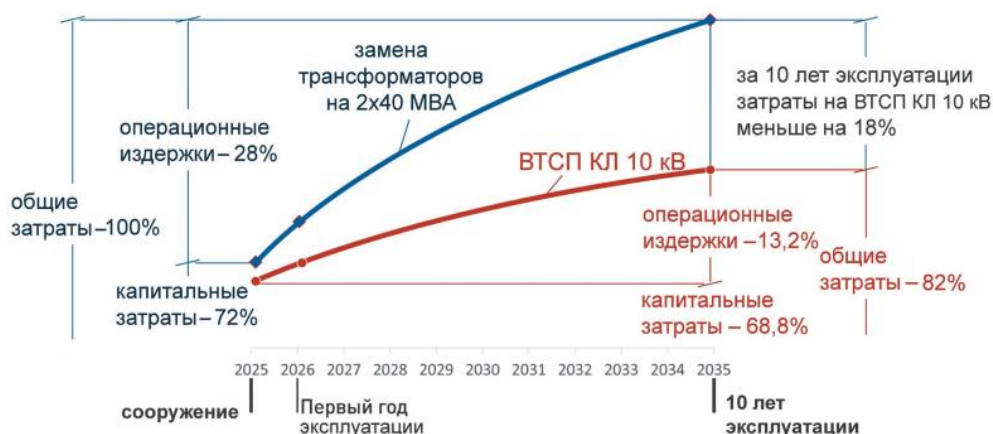


Рис. 6. Сравнение затрат для вариантов электроснабжения потребителей ПС 110 кВ «Трикоотажная» за 10 лет эксплуатации [20].

Выводы

Высокотемпературные сверхпроводники обладают набором уникальных характеристик, коммерчески доступны, а их применение в электроэнергетике в виде кабелей и ВТСП ТООУ экономически целесообразно, в частности, в энергосистемах городов и крупных промышленных производств.

Библиографический список

1. A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov, et al. – Development and large volume production of extremely high current density $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting wires for fusion. – Scientific Reports, vol. 11, (p. 2084) – 2021.
2. The global fusion industry in 2024 – FIA survey – 2024
3. M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, A. Hobl. – AmpaCity. Advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply. – IEEE PES T&D Conference and Exposition, (pp. 1-5.) – 2014.
4. H. P. Kraemer, et al. – ASSiST – A Superconducting Fault Current Limiter in a Public Electric Power Grid. – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 1, (pp. 612-618) – 2022.
5. Y. Xin., W.Z. Gong, et al. – Development of a 220 kV/300 MVA superconductive fault current limiter – Superconductor Science and Technology – vol. 25, no. 10 – 2012.
6. M. Moyzykh, et al. – First Russian 220 kV Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) For Application in City Grid, – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 31, no. 5, (pp. 1-7) – 2021.
7. Shaotao Dai, Tao Ma, Chi Xue, et al. – Development and Test of a 220 kV/1.5 kA Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter – Physica C: Superconductivity and its applications – 2019.
8. Mathias Noe, et al. – 380 kV Superconducting Fault Current Limiter Feasibility Study – KIT Scientific Publishing – 2023.

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

9. D. Kolomentseva, E. Magomedov, M. Moyzykh, – Application of Electrical Industry Standards to Superconducting Fault Current Limiters – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 34, no. 9, (pp. 1-8.) – 2024.
10. IEC 60076-6 – Power Transformers. Part 6: Reactors.
11. IEEE C37.302-2015 – Guide for Fault Current Limiter (FCL). Testing of FCLs Rated above 1000 V AC.
12. СТО Россети 56947007-29.180.04165-2014 – Реакторы токоограничивающие на номинальное напряжение 6-500 кВ. Типовые технические требования (дата введения - 11.03.2014).
13. Разработка стратегических направлений развития Московской энергосистемы с учетом роста уровня токов короткого замыкания: [отчет]. Москва. 2011 URL:
<https://www.superox.ru/upload/documents/strategic-directions-development-of-the-moscow-energy-system.pdf> (дата обращения 21.10.2024).
14. M. Moyzykh et al. – An approach for economic evaluation of superconducting fault current limiters in city grids with relay protection considerations – Cigre – 2024.
15. W. Xie, B. Wei, Z. Yao. – Introduction of 35 kV km Level Domestic Second Generation High Temperature Superconducting Power Cable Project in Shanghai, China. – J Supercond Nov Magn 33, (pp. 1927-1931) – 2020.
16. Jin Bae Na, Heo Gyung Sung, Chang Yeol Choi, et al. – Design of 23kV 50MVA class HTS Cable in South Korea – J. Phys.: Conf. Ser. (p. 1054) – 2018.
17. J. F. Maguire, F. Schmidt, F. Hamber and T. E. Welsh – Development and demonstration of a long length HTS cable to operate in the long island power authority transmission grid – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, (pp. 1787-1792) – 2005.
18. V. E. Sytnikov, S. E. Bemert, S. I. Kopylov, M. A. Romashov – Status of HTS Cable Link Project for St. Petersburg Grid – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, (pp. 1-4.) – 2015.
19. Компания VEIR: [сайт]. Вуберн, США. URL: <https://veir.com/> (дата обращения 21.10.2024).
20. Дубинин М.В., Кашеев, А.В. Королев, А.А. Сытников В.Е., Сорокин Д.В., Филиппева Е.А. Технико-экономическое сравнение решений при внедрении высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий переменного тока в мегаполисах – Энергия единой сети № 1 (68) – 2023.

© Магомедов Э.Ш., Коломенцева Д.А., Мойzych М.Е., 2024

УДК 621.313.3

3.2. Высокотемпературные сверхпроводники для вращающихся машин

Калитка В.С., Васильков Н.Д.

ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского»

Высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП) называются семейства структурно-подобных материалов, в которых наблюдается сверхпроводимость при относительно высоких температурах. Критерием отнесения к ВТСП считается температура в 30 К, хотя чаще под ВТСП понимают материалы, у которых критическая температура выше температуры кипения азота – 77 К.

В настоящее время различают два поколения технологии изготовления проводов на основе ВТСП-материалов. Первое поколение представлено ВТСП-лентой в серебряной оболочке на основе сверхпроводника BSCCO. Позднее появилась технология производства лент второго поколения на основе YBCO. В обоих случаях ключевым показателем качества провода является текстурированность ВТСП-материала. Объем сверхпроводника составляет лишь небольшую часть от общего объема провода: в лентах первого поколения эта величина обычно не более 40%, а в лентах второго поколения – менее 5%. В первом поколении ВТСП заключён в матрицу из серебра или его сплава. Для создания лент второго поколения обычно используют никелевые ленты-подложки. При этом ВТСП представляет собой тонкое покрытие на поверхности ленты. Чтобы предотвратить химическое взаимодействие между лентой и ВТСП, а также обеспечить текстурированный рост, применяют так называемый буферный слой – один из ключевых элементов этой технологии. Металлический защитный слой (обычно серебряный) обеспечивает электрический контакт и защищает ВТСП от взаимодействия с парами воды и углекислого газа в воздухе, а также шунтирующего материала – меди. Тем не менее, благодаря определённым преимуществам сверхпроводников первого поколения, уже удалось создать силовые ВТСП-кабели длиной до 600 м, которые используются в реальных энергосетях. Сверхпроводники второго поколения превосходят их по своим свойствам, но их производство обходится дороже. В обоих случаях можно использовать жидкий азот в качестве хладагента. Криогенные системы на жидком азоте стоят дешевле, чем на жидком гелии или водороде, к тому же сам азот доступен и недорог. Однако, при температуре жидкого гелия или водорода возможно на порядок увеличить токонесущую способность ВТСП-провода [1]. При охлаждении же до 77 К плотность тока в ВТСП-ленте второго поколения превышает 500 А/мм².

«Рабочая» область ВТСП-лент ограничивается критическим током, температурой и внешним магнитным полем. Величина критического тока падает при увеличении индукции, но уменьшение температуры сглаживает это падение, а также серьезно повышает величину самого критического тока. Если в традиционных электрических машинах индукция магнитного поля достигает

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

величины 1 Тл, то для ВТСП-машин ее возможно поднять до примерно 3 Тл. Таким образом, целесообразно охлаждать ВТСП-машину ниже 77 К для достижения высоких плотностей тока, как показано на рис. 1. Возможность достигать плотностей тока порядка 1000 А/мм² открывает возможность существенного снижения габарита электрической машины.

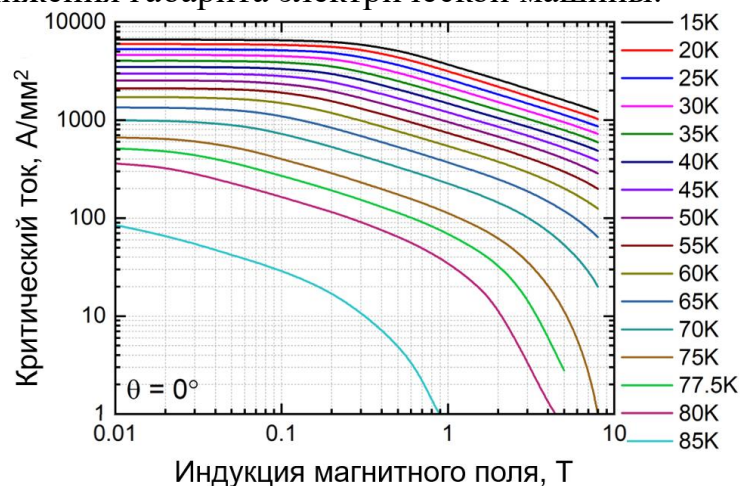


Рис. 1. Зависимость критического тока в сверхпроводнике от внешнего магнитного поля и температуры

Крутящий момент (и, как следствие, мощность при той же частоте вращения) электродвигателя в общем случае зависит от произведения линейной нагрузки статора, магнитной индукции, а также квадрата диаметра ротора и длины окружности корпуса ВТСП-машины [2]. Увеличения линейной нагрузки статора достигается заменой статорных обмоток переменного тока на ВТСП, а повышение магнитной индукции – заменой на ВТСП обмоток возбуждения постоянного тока. Полностью сверхпроводниковая машина получается путем замены обеих обмоток на ВТСП.

Однако, применение ВТСП для статорной обмотки переменного тока сопряжено с рядом проблем. В первую очередь – это потери в переменных магнитных полях. Технология ВТСП-катушек и криостатов в настоящее время недостаточно отработана и требует проведения серьезных НИОКР. Кроме того, при использовании ВТСП для статорной обмотки возникает серьезная тепловая нагрузка на криогенную систему.

Магнитное поле полностью вытесняется из объема сверхпроводников первого рода при их охлаждении ниже критической температуры. В сверхпроводниках же второго рода, к которому относится ВТСП, магнитное поле проникает в толщу материала в виде вихревых токов. Сверхпроводник как бы «намагничивается» внешним полем. Ввиду проникновения поля, ВТСП имеет свойство намагничиваться. В переменном магнитном поле возникают гистерезисные потери, которые оказывают серьезное влияние на эффективность ВТСП-машин. Начиная с индукции магнитного поля по нормали к ленте >100 мТ гистерезисные потери становятся значимыми и экспоненциально растут с ростом поля. При возрастании более 300 мТ гистерезисные потери носят критический характер для

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

азотного охлаждения. Таким образом, для обеспечения надежности необходимо обеспечить гарантированное интенсивное омывание всех катушек жидким хладагентом, а также ориентировать ленты параллельно силовым линиям магнитного поля и понижать рабочую температуру сверхпроводника.

В 2016 году к исследованиям по созданию системы электродвижения на основе ВТСП-технологий подключился Фонд перспективных исследований, по заказу которого российской инновационной компанией ЗАО «СуперОкс» реализован проект «Контур», в рамках которого в кооперации с ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова» и ФАУ «СибНИА имени С.А. Чаплыгина» разработана и апробирована авиационная интегрированная электроэнергетическая система на основе единой ВТСП-платформы (далее – ВТСП-АИЭС). В 2021 году на Международном авиасалоне «МАКС 2021» продемонстрированы первые в мире полеты среднемагистрального авиалайнера (летающей лаборатории Як-40ЛЛ) с ВТСП-АИЭС в качестве основного двигателя. В рамках проекта «Контур» были созданы ВТСП-электродвигатель и генератор со статорными ВТСП-обмотками на основе лент отечественного производства. В ходе проекта были решены основные трудности, связанные с технологией обмоток и композитного криостата. Однако, потери от воздействия переменных магнитных полей оказали негативное влияние на производительности системы в целом – при мощности ВТСП-электродвигателя в 500 кВт, массе 200 кг, скорости вращения 2800 об/мин и эффективности в 98% гистерезисные потери в ВТСП составили порядка 2 кВт, что требовало большого расхода жидкого азота для работы [3].

Второй проблемой создания ВТСП-статора является неотработанность технологии криостата. Традиционно для производства его стенок используется нержавеющей сталь, а в качестве теплоизоляции выступает вакуум. Но при таком способе переменные магнитные поля создают десятки киловатт нагрева из-за наведенных токов, что фактически неприемлемо для ВТСП-электродвигателей.

Решением проблемы может являться изготовление холодной емкости из композитного материала. Теплоизоляцию возможно обеспечить тем же методом – за счет вакуума, композитные стенки и их соединение с металлическими элементами должно при этом сохранять герметичность при термоциклировании. Однако такую герметичность и ее сохранение в процессе эксплуатации сложно обеспечить. Возможным решением является композитный невакуумный криостат, где стенки – как у композитного вакуумного, а в качестве теплоизоляции выступает аэрогель или пенопласт. Однако, теплоизолирующие свойства у данных материалов существенно хуже чем у вакуума, и при таком решении необходимо закладывать тепловую мощность на низкое качество теплоизоляции. К тому же все композитные криостаты подразумевают практически неразборную конструкцию и малую ремонтпригодность двигателя.

Таким образом, для ВТСП со статорными обмотками теплоприток через криостат и токовводы можно оценить не менее чем в 1 кВт. Дополнительно следует учесть потери в криосистеме, обеспечивающей циркуляцию, в 0,5-1 кВт. Итого, с учетом потерь в ВТСП в 2 кВт, получается 4 кВт потерь или испарение

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

72 кг азота в час, для компенсации чего потребуется криокуллер весом 1350 кг. То есть, тепловыделения в криогенном объеме создают потребность в тяжелой криогенной системе. Это зачастую нивелирует выигрыш в массогабаритных характеристиках и эффективности ВТСП-решения.

Использование ВТСП для обмоток возбуждения повышает магнитную индукция в 1,5-2 раза внутри машины, линейную нагрузку статора в 2 раза, а мощность в 3-4 раза. Также, они обладают низким реактивным сопротивлением, высокой устойчивостью к перегрузкам и позволяют снизить гармонические искажения. Поскольку ВТСП обмотка работает в условиях постоянного магнитного поля, потерь в ВТСП нет, а также есть возможность применения металлических вакуумных криостатов, что позволит использовать криогенную систему замкнутого цикла компактного размера, что обеспечит снижение массы системы [4].

ВТСП-обмотки возбуждения можно использовать как на роторе, так и на статоре ВТСП-машины. В первом случае формируется более проработанная конструкция, которая позволяет осуществлять циркуляцию хладагента за счет своего вращения. К недостаткам конструкции относятся требование криогенного ввода вращения, а также таких явлений, как вакуумная рубашка на вращающемся роторе и сильное вращающееся магнитное поле. Во втором случае потенциал снижения массы конструкции выше, так как позволяет отказаться от магнитопровода не только ротора, но и статора. Кроме того, тут производится работа со стационарным магнитным полем, криогеникой и теплоизоляцией. Однако, и в этом способе отмечается следующий недостаток: не отработанность новой конструкции с силовым вводом вращения щетки, в которой (кроме прочего) необходимо осуществить охлаждение силовой обмотки на роторе.

Ключевым преимуществом ВТСП-обмотки возбуждения является возможность реализовать основной потенциал сверхпроводника – высокую плотность тока при отсутствии омического нагрева. При эксплуатации в условиях постоянного магнитного поля здесь возможно применение надежных металлических криостатов с вакуумной теплоизоляцией, что позволит сделать компактной криогенную систему и исключить паразитное охлаждение теплых частей двигателя.

На рис. 2 представлена схема ВТСП-катушки с теплоизоляцией в виде двух металлических стенок с вакуумом между ними. Хладагент в данном случае протекает во внутреннем теплоизолированном контуре, наружный корпус при этом остается тёплым, то есть другие части вращающейся машины воздействию криогеники не подвергаются. В данном габарите можно заложить до 100 кА-витков при отсутствии омического нагрева.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

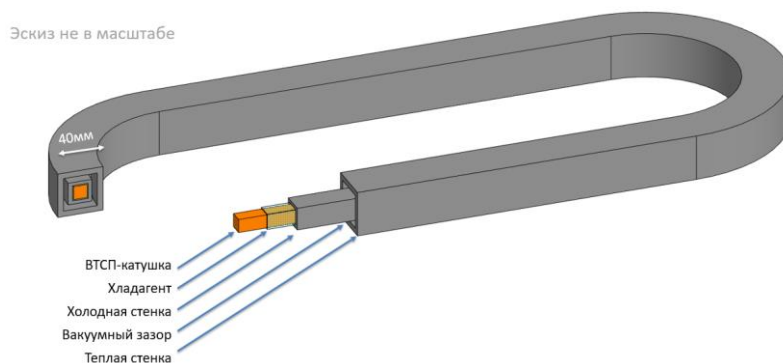


Рис. 2. Эскиз схемы ВТСП-катушки с теплоизоляцией

В качестве примеров реализации ВТСП в составе силовой установки электродвижения можно привести проекты ВТСП-электродвигателей японской компании Kawasaki (мощность 3 МВт, частота вращения вала 160 об/мин) [5] или энергетическую систему, которая проектировалась для эскадренного эсминца (ЭЭ) типа «Zumwalt» ВМС США, введенного в строй в 2016 году. В конструкции ЭЭ реализована схема, при которой газовые турбины Rolls-Royce Marine Trent-30 (одни из самых мощнейших в своем классе) приводят в действие электрогенераторы, затем электрическая энергия вновь преобразуется в механическую энергию посредством гребных электродвигателей. При заключении контракта на строительство новой серии ЭЭ предполагалось, что указанные электродвигатели мощностью 36,5 МВт будут поставляться компанией «American Superconductor» (AMSC) и будут оснащены ВТСП-обмотками [6]. AMSC проводила разработку инновационного двигателя по заказу Управления военно-морских исследований США (сумма контракта составила 100,0 млн долларов США), в том числе с целью демонстрации преимуществ и эффективности ВТСП-двигателей в качестве основной двигательной технологии для перспективных полностью электрических (FEP) кораблей и подводных лодок ВМФ. Командование военно-морских систем профинансировало и успешно провело испытания двигателя.

Примечательно, что разрабатываемые AMSC ВТСП-двигатели не вносят существенных изменений в компоновочную схему корабля. Машины работают так же, как и обычные электродвигатели, получая свои качественные преимущества путем замены медных катушек ротора на ВТСП-катушки. Вместе с тем технические сложности при создании новаторской схемы не позволили AMSC вовремя провести отработку ВТСП-электродвигателя, и для вращения гребных винтов были выбраны традиционные асинхронные двигатели компании «Converteam» (сейчас – GE Power Conversion) мощностью 34,6 МВт с медными обмотками. Замену традиционных электроагрегатов на ВТСП-системы планируется осуществить при последующей модернизации ЭЭ «Zumwalt». По предварительным оценкам, ВТСП-генераторы в перспективе должны развивать эффективную мощность не менее 40 МВт и иметь вдвое меньшие габариты, массу, а также существенно меньший уровень шумов по сравнению с традиционными. Поскольку FEP-корабль предполагается оснащать

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

энергоемкими видами оружия (рельсотрон, лазерные системы), требующими электропитания большой мощности, ВТСП-технологии становятся ключевым фактором, который сможет удовлетворить эти требования. Преимущество модернизации корабля очевидно: вдвое меньшие линейные габариты и более чем в 2 раза меньшая масса ВТСП-системы по сравнению с штатными позволят сократить водоизмещение ЭЭ примерно на 200 тонн или увеличить его полезную нагрузку, а высвободившийся объем использовать для других целей.

В Московском авиационном институте разработки в области прикладной сверхпроводимости проводятся созданным в 1993 году Центром сверхпроводниковых электрических машин и устройств (далее – Институт). Институтом разработаны фундаментальные основы расчёта и определены принципы построения энергетических систем, основанных на ВСП-технологиях. В 2011-2015 годах в Институте совместно с МГТУ им. Баумана, АО «НИИЭМ» и другими организациями в рамках программы «Сверхпроводниковая индустрия» разработали и испытали опытные образцы двигателя с генератором мощностями 50 кВт, генератор для ветроэнергетических установок мощностью 1 МВА, а также двигатель для транспорта мощностью 200 кВт. В данных электрических машинах применялось охлаждение только до температуры 77 К [7]. Кроме того, были отлажены технологии намотки ВТСП-обмоток возбуждения электрических машин.

Использование ВТСП для статора связано с определёнными сложностями и, возможно, потребует значительной мощности охлаждения от криогенной системы. Применение ВТСП для обмотки возбуждения выглядит более многообещающим, поскольку в криогенном контуре отсутствуют прямые источники нагрева, а также нет ограничений на увеличение индукции магнитного поля в зазоре электрической машины. ВТСП-машины могут быть экономически выгодными в следующих областях: 1) где уже используется криогенная среда (например, перекачка криогенных жидкостей, транспортные средства с криогенным топливом и т.д.); 2) где большой вес и размеры электрической машины приводят к значительным дополнительным затратам (например, в ветроэнергетике или в судовых двигателях); 3) в крупных электрических машинах более 10 МВт, где невозможно обеспечить высокую плотность тока в обмотках возбуждения из-за ограничений системы охлаждения, и даже без принятия во внимание выигрыша в массогабаритных характеристиках и эффективности, только стоимость медной обмотки может быть сопоставима со стоимостью ВТСП-решения (например, генераторы на электростанциях, приводы дробилок и т.д.).

Библиографический список

1. A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov et al. Development and large volume production of extremely high current density $YBa_2Cu_3O_7$ superconducting wires for fusion // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. Art. 2084. 11 p.

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

2. Reis T., A.T.A.M. de W., Oswald J., Oswald B., Berberich E. Cryogenic challenges for different superconductive motor topologies. – 2017. (II. International Workshop on Cooling Systems for HTS Applications, Karlsruhe, Germany, September 13-15, 2017).

3. Kalitka V. Development of 500 kW superconducting motor and its test on flying laboratory. – 2021. (EUCAS 2021 – 15th European Conference on Applied Superconductivity, 12–17 September 2021, Moscow, virtual).

4. Wolfgang N. HTS Rotating Machines. – 2008. (Siemens AG, Corporate Technology, Power & Sensor Systems – European Summer School, Pori, Finland, June 2008).

5. Yanamoto T., Izumi M., Umemoto K. et al. Load test of 3-MW HTS motor for ship propulsion // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – Vol. 27, iss. 8. Art. 5204305.

6. Gamble B., Snitchler G., MacDonald T. Full power test of a 36.5 MW HTS propulsion motor // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2011. – Vol. 21, iss. 3. P. 1083–1088.

7. Ильясов Р.И., Ковалев К.Л., Дежин Д.С. и др. Опыт создания сверхпроводниковых двигателей, генераторов и магнитных подвесов на основе высокотемпературных сверхпроводников. Достижения и перспективы. – 2014. (NDEXPO-2014, СПб, 18 июня 2014 г.).

© Калитка В.С., Васильков Н.Д., 2024

СЕКЦИЯ IV. АВАРИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

УДК 621.316.1

**4.1. Разработка статистической модели вероятности отказа кабельных
линий электропередачи 10 кВ**

Габдушев Д.М., Ванин А.С.

Основная цель цифровой трансформации, которая нормативно закреплена в ПАО «Россети», – это переход компаний на риск-ориентированное управление с использованием цифровых технологий и анализа больших объемов данных [1]. Также в соответствии с энергетической стратегией Российской Федерации до 2035 года [2] одной из ключевых мер повышения эффективности электросетевого комплекса является переход на риск-ориентированное управление производственными активами в электросетевом комплексе на базе цифровых технологий. Принципы реализации риск-ориентированного подхода в электроэнергетике определены в постановлении Правительства РФ от 19.12.2016 г. № 1401 [3] и раскрыты в приказах Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676 [4] и от 19 февраля 2019 г. № 123 [5].

В приказе Минэнерго РФ от 19 февраля 2019 г. № 123 [5] приводится методика по расчету технологического риска отказа единицы технологического оборудования. Риск отказа определяется в соответствии с общепринятым подходом как произведение вероятности и последствия отказа. При этом расчет вероятности отказа в данной методике основан только на техническом состоянии оборудования (индексе технического состояния) и не учитывает фактическую аварийную статистику, а сам расчет индекса технического состояния базируется на экспертных оценках [4]. Данный подход расчета вероятности, ключевой задачи для принятия решений на основе риск-ориентированного подхода, противоречит основной цели концепции цифровизации, заключающейся в использовании больших объемов данных и цифровых технологий.

Электросетевые компании России собирают подробную статистику о технологических нарушениях в едином формате в соответствии с приказом Минэнерго России от 02.03.2010 № 90 [6]. Опыт работы с ПАО «Россети» также показал, что электросетевые компании обладают современной цифровой системой учета активов, в которой содержится информация о параметрах оборудования, выявленных дефектах, проведенных ремонтах и технических обслуживаниях. При этом данная информация практически не используется при оценке рисков.

Современные вычислительные технологии позволяют обрабатывать большие объемы данных о состоянии оборудования и технологических нарушениях, чтобы определить вероятность отказа каждой единицы оборудования и риск нарушения электроснабжения потребителя. Определение риска нарушения электроснабжения потребителей на основе фактической аварийной статистики

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

позволит сетевым организациям повысить качество управления производственными активами и, как следствие, обеспечить более высокий уровень надежности электроснабжения потребителей.

В сетевых компаниях эксплуатируются множество различных видов оборудования. Среди них кабельные линии 10 кВ занимают особое место, так как являются наиболее протяженными объектами в распределительных сетях, что, следовательно, обуславливает необходимость особого внимания к их надежности. В работах [7], [8] показано, что наибольший вклад в показатели надежности вносят именно кабельные линии электропередачи среднего напряжения. Для современных зарубежных исследований по созданию моделей надежности кабельных линий характерно использование большого объема данных и современных вычислительных алгоритмов. Однако результаты отличаются в зависимости от рассматриваемой электрической сети по причине разного влияния факторов отказа [9–14].

Таким образом, наиболее подходящим решением данной проблемы будет автоматизированное создание модели надежности для каждой сетевой организации. В данной работе рассматривается подход для создания моделей надежности кабельных линий электропередачи 10 кВ. Подход был апробирован на данных электрической сети Центрального региона России.

Метод формирования данных для создания статистической модели вероятности отказа кабельных линий

Для разработки статистической модели надежности кабельных линий в данном методе используются следующие базы данных: данные об эксплуатирующихся кабельных линиях на последний год анализируемого периода (парк оборудования) и данные об отказах. В базу данных об отказах входит информация по технологическим нарушениям, отключениям и повреждениям.

Данные о парке оборудования представляют собой информацию о текущих эксплуатируемых кабельных линиях в сетевой организации. В данной базе данных должна присутствовать следующая информация: год ввода, марка, тип изоляции, тип оболочки, класс напряжения, код технического места (идентификатор энергообъекта), диспетчерское наименование. Общие данные о технологических нарушениях представляют собой общую информацию об аварии. База данных о технологических нарушениях должна содержать следующую информацию: уникальный идентификатор технологического нарушения, код организационной причины аварии, описание организационной причины аварии, описание технической причины аварии, дата и время возникновения аварии, дата и время ликвидации аварии. Данные об отключениях представляют собой информацию об отключенном оборудовании в рамках технологического нарушения (аварии), данные о повреждениях – о поврежденном оборудовании в рамках технологического нарушения (аварии). База данных об отключениях должна содержать следующую информацию: уникальный идентификатор аварии, класс напряжения, идентификатор

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

энергообъекта, диспетчерское наименование, дата и время отключения, дата и время восстановления нормальной (до аварийной) схемы. База данных о повреждениях должна содержать следующие поля: уникальный идентификатор аварии, код технического места (идентификатор энергообъекта), диспетчерское наименование, информация о поврежденном сегменте (марка, класс напряжения, год ввода, тип изоляции, тип оболочки).

Метод состоит из трех этапов:

1. Связь баз данных о парке оборудования и данных об отказах;

Связь баз данных с аварийной статистикой и данных о парке оборудования необходима в основном для того, чтобы определить те отказы кабельных сегментов, которые на текущий момент уже не эксплуатируются, и исключить в дальнейшем их из рассмотрения. Проверяется корректность информации о характеристиках кабельных линиях в базах данных с аварийной статистикой и базе данных о парке оборудования. Отсутствующая информация дополняется из базы данных о парке оборудования.

2. Формирование выборки независимых отказов и определение коэффициента зависимого отключения;

В рамках одного технологического нарушения может быть повреждено несколько кабельных линий. Например, повреждение кабельной линии по причине старения изоляции с последующим повреждением другой кабельной линии в результате воздействия токов короткого замыкания. Данные повреждения называются зависимыми [15].

Модель разрабатывается для независимых отказов кабельной линии. Однако последствия зависимых отключений могут быть больше (вместе могут быть проложены кабельные линии, которые резервируют друг друга), поэтому при анализе надежности электрической сети важно их также учитывать. При анализе надежности сети может быть принято допущение о вероятности зависимого отключения [15]. Вероятность зависимого отключения учитывается через коэффициент, который может быть определен из фактической статистики для рассматриваемой электрической сети. То есть необходим коэффициент, при умножении которого на вероятность независимых отказов можно получить вероятность зависимых отказов. Данный коэффициент определяется как отношение доли зависимых отключений к доли независимых отключений. Коэффициент зависимого отключения можно определять по следующей формуле:

$$k_{\text{зав.откл.}} = \frac{1}{T} \sum_i^T \frac{\delta_{\text{зав.откл. } i}}{\delta_{\text{незав.откл. } i}} \quad (1)$$

где δ_i – доля зависимых/независимых отключений в каждом году; T – длина рассматриваемого периода, лет.

3. Формирование выборок учитываемых в модели независимых отказов и кабельных линий.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Модель должна отражать те отказы, которые необходимо учитывать при управлении активами электросетевых организаций. После формирования выборки независимых отключений из нее удаляются следующие отказы:

- 1) Отказы, за которые сетевая организация не несет ответственности
- 2) Отказы сегментов или линий, которые были заменены
- 3) Кабельные линии, которые систематически отказывают по причине климатических и других внешних факторов и не связанных с ошибками при проектировании

Диаграмма, иллюстрирующая принцип формирования выборок учитываемых в модели независимых отключений и находящихся в эксплуатации КЛ, приведена на рис. 1.

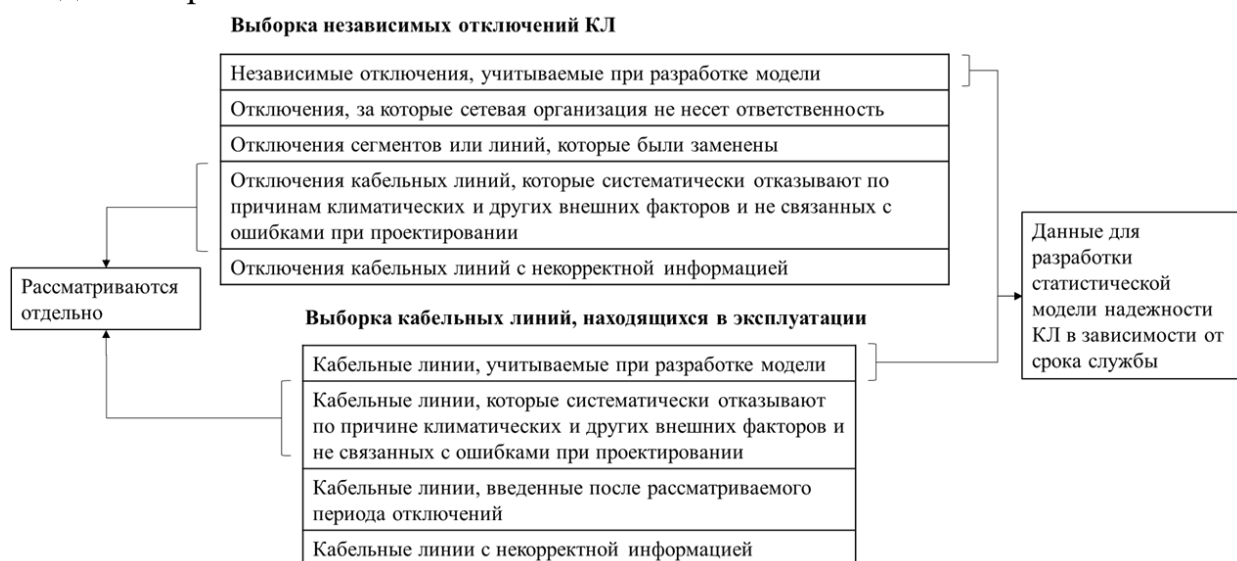


Рис. 1. Принцип формирования выборок учитываемых в модели

Разработка статистической модели вероятности отказа кабельной линии 10 кВ

Из теории надежности известно, что вероятность отказа оборудования за следующий год связана с интенсивностью отказов по следующему выражению:

$$Pr(t) = 1 - e^{-\lambda(t)} \quad (2)$$

где $\lambda(t)$ – функция интенсивности отказов.

Функция интенсивности отказов является важной с практической точки зрения, так как она имеет прямую физическую интерпретацию, а информация о характере данной функции полезна при выборе подходящей модели надежности оборудования. Зная интенсивность отказов, можно определить остальные функции, которые характеризуют надежность оборудования, такие как: функция плотности вероятности, функция надежности. Таким образом, модель разрабатывается для интенсивности отказов оборудования, а вероятность отказа кабельной линии определяется по выражению (2).

Разработка статистической модели интенсивности отказов кабельной линии 10 кВ включает в себя несколько ключевых этапов:

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Определение ключевых факторов отказа

Определяются факторы отказа, которые оказывают влияние на надежность кабельных линий. Данные факторы могут включать в себя тип оболочки, изоляции, производителя, длину кабеля, местность прокладки и другие параметры.

2. Определение возрастных интервалов

Определяются возрастные интервалы, для которых рассчитывается интенсивность отказов. Возрастные интервалы необходимо выбирать таким образом, чтобы количество отключений и количество оборудования в этих интервалах было статистически значимым. Если количество отключений равно нулю в возрастном интервале, то это также затруднит построение регрессионной линии и снизит точность модели.

3. Группировка отказов на постепенные и внезапные

Поскольку интенсивность отказов имеет аддитивный характер, то ее можно представить в виде суммы составляющих от различных причин отключений:

$$\lambda(\bar{v}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(\bar{v}) \quad (3)$$

где \bar{v} – вектор независимых переменных (факторов отказа), λ_i – интенсивность отказа для причины отказа i .

Для кабельных линий 10 кВ отказы группируются на постепенные и внезапные. Подбрав наиболее подходящий закон распределения для интенсивности постепенных и внезапных отказов, можно определить закон распределения для итоговой интенсивности отказов с помощью суперпозиции их законов распределения.

4. Расчет фактических значений и доверительных интервалов интенсивности отказов

Расчет фактических значений и доверительных интервалов интенсивности постепенных и внезапных отказов проводится в соответствии с формулами, подробно описанными в [16].

5. Постановка регрессионной задачи

Данный этап включает в себя выбор метода регрессионного анализа, законов распределения для подбора кривой, расчет весов для учета степени доверия и определение метрик для выбора наилучшей модели.

Для улучшения подбора модели к данным, которые имеют разную степень достоверности, используется взвешенная регрессия, где дополнительный масштабный коэффициент (вес) включен в процесс моделирования. Наиболее распространенным и теоретически обоснованным подходом для определения весов является их расчет обратно пропорционально дисперсии [17]. Дисперсия напрямую связана с изменчивостью данных. Это позволяет минимизировать влияние данных с высоким разбросом. Так как интенсивность отказов подчиняется биномиальному распределению, дисперсия i -го значения интенсивности отказов определяется по следующему выражению:

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

$$w_i = \frac{nT}{\lambda_i(1 - \lambda_i)} \quad (4)$$

где n – количество оборудования (протяженность кабельных линий, км); T – рассматриваемый период времени, лет; λ_i – интенсивность отказов оборудования.

6. Выбор наилучшей модели

Для выбора наилучшей модели используются следующие метрики: $RMSE$ (квадрат средней квадратичной ошибки), MAE (средняя абсолютная ошибка), R^2 (коэффициент детерминации), R_{adj}^2 (скорректированный коэффициент детерминации). Расчет данных метрик также проводится с учетом весов для каждого отклонения.

Статистическая модель вероятности отказа кабельных линий 10 кВ Центрального региона России

В рассматриваемой электрической сети 10 кВ в основном эксплуатируются кабельные линии с бумажно-пропитанной изоляцией, но в последние 15-20 лет при их реконструкции или новом строительстве применяются кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена. Основными факторами, которые влияют на интенсивность отказов кабельных линий 10 кВ в рассматриваемой сети, являются срок службы, изоляция и тип оболочки.

Исходя из обработанных данных интенсивность внезапных отказов статистически одинакова для всех характеристик и не зависит от срока службы. Для постепенных отказов сравнивались следующие распределения:

$$\lambda(t/\alpha) = \alpha \cdot t \quad (5)$$

$$\lambda(t/\alpha, \beta) = \alpha\beta(\beta t)^{\alpha-1} \quad (6)$$

$$\lambda(t/\alpha, \beta, \eta) = \alpha \cdot t + \frac{\beta \cdot \eta \cdot e^{-\beta \cdot t} (1 - e^{-\beta \cdot t})^{\eta-1}}{1 - (1 - e^{-\beta \cdot t})^{\eta}} \quad (7)$$

где (5) – линейная функция; (6) – распределение Вейбулла; (7) – комбинация линейного и экспоненциального с параметром сопротивления распределений.

Согласно метрикам наилучшей моделью для интенсивности постепенных отказов кабельных линий с бумажно-пропитанной изоляцией является комбинация закона Рэлея и экспоненциального с параметром сопротивления распределений, для кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена – линейная функция.

На рисунке 2 приведены итоговые модели вероятности отказа кабельной линии 10 кВ за следующий год, полученные из итоговых моделей интенсивности отказов по формуле (2).

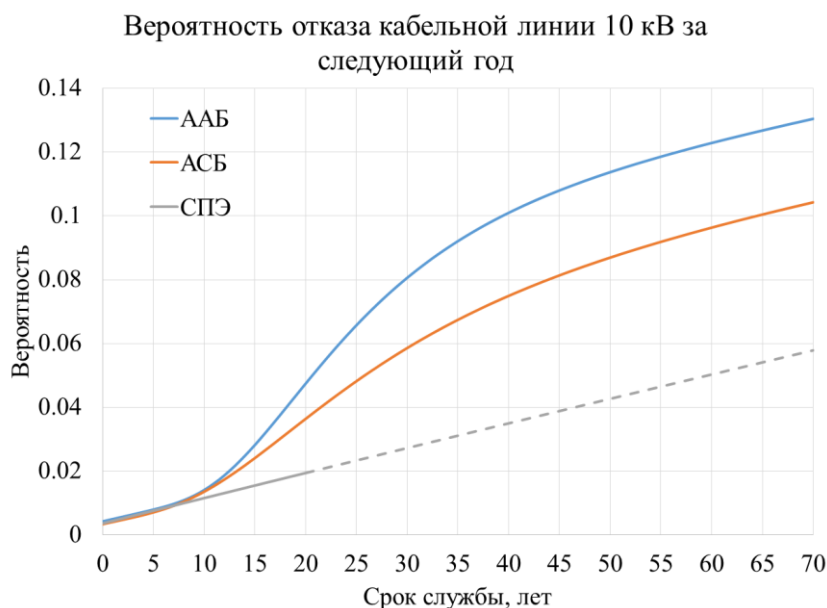


Рис. 2. Вероятность отказа кабельной линии 10 кВ за следующий год в зависимости от срока службы, типа изоляции и оболочки

Из рисунка 2 видно, что до 10 лет характер роста вероятности отказа в следующем году для всех типов кабельных линий 10 кВ одинаковый. Далее наблюдается больший рост для кабелей с алюминиевой оболочкой. Это может быть связано с тем, что алюминий больше подвержен коррозии, чем свинец. Для кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена имеется информация о кабелях со сроком службы до 20 лет. Поэтому дальнейший характер функции вероятности отказа может измениться, на текущий момент тренд кривой экстраполирован согласно информации о текущих кабелях. При этом рост вероятности отказа от 10 до 20 лет для данной изоляции ниже, чем для бумажно-пропитанной изоляции, как видно на графике.

Заключение

Показано, что в действующей российской методике расчета риска отказа единицы оборудования не учитывается фактическая аварийная статистика. Электросетевые компании в России собирают аварийную статистику в едином формате и имеют современную систему учета активов. Однако эти данные практически не используются. Современные технологии позволяют обрабатывать большие объемы данных.

В статье рассмотрен формализованный метод формирования входных данных для разработки статистической модели интенсивности отказов кабельных линий среднего напряжения и подход создания модели.

По результатам применения указанных методик для электрической сети Центрального региона России разработана статистическая модель интенсивности отказов для кабельных линий. На основе полученных функций интенсивностей отказов определены модели вероятности отказов кабельных линий 10 кВ за следующий год.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Подход может быть реализован в виде программного обеспечения для применения в российских электросетевых компаниях.

Библиографический список

1. Концепция «Цифровая трансформация 2030» ПАО «Россети», 2018
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года. Утверждена постановлением правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523р
3. Постановление Правительства РФ от 19.12.2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей»
4. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».
5. Приказ Министерства энергетики РФ от 19 февраля 2019 г. № 123 «Об утверждении методических указаний по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа».
6. Приказ Минэнерго России от 02.03.2010 № 90 (ред. от 27.07.2017) «Об утверждении формы акта о расследовании причин аварий в электроэнергетике и порядка ее заполнения».
7. Vanin A., Gabdushev D., Tulsy V. Estimation of acceptable failure rates for equipment of power distribution network //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 461. – С. 01027.
8. Ванин А.С., Габдушев Д.М., Тульский В.Н. Оценка допустимых значений частоты отключения оборудования распределительных сетей //Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – 2023. – С. 512-520.
9. Jürgensen J.H., Nordstrom L., & Hilber P. (2016, October). A review and discussion of failure rate heterogeneity in power system reliability assessment. In 2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) (pp. 1-8). IEEE
10. Chu, C. M., Moon, J. F., Lee, H. T., & Kim, J. C. (2010). Extraction of time-varying failure rates on power distribution system equipment considering failure modes and regional effects. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(6), 721-727
11. Mashad Nemati, H., Sant'Anna, A., & Nowaczyk, S. (2015). Reliability evaluation of underground power cables with probabilistic models. In *The 11th International Conference on Data Mining (DMIN'15)*, Las Vegas, Nevada, USA, July 27-30, 2015 (pp. 37-43)

12. Yujia Zhou, Richard E. Brown. A practical method for cable failure rate modeling //2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – IEEE, 2006. – С. 794-798

13. Liao Y., Hui B., & Wei Y. (2020, November). Risk assessment of high-voltage cable system based on cable failure probability and failure loss. In 2020 IEEE 3rd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE) (pp. 143-146). IEEE

14. Clavijo-Blanco, José Antonio, MA González Cagigal, and José Antonio Rosendo-Macías. «A fitting procedure for probability density functions of service restoration times. Application to underground cables in medium-voltage networks». Electric Power Systems Research 217 (2023): 109128

15. Tuinema B.W. et al. Probabilistic reliability analysis of power systems. – Cham, Switzerland: Springer, 2020

16. Gabdushev D., & Vanin A. (2023, March). Reliability analysis of power distribution network in urban area. In 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) (Vol. 5, pp. 1-6). IEEE.

17. Strutz T. Data fitting and uncertainty: A practical introduction to weighted least squares and beyond. – Wiesbaden, Germany: Vieweg+ Teubner, 2011. – Т. 1.

© Габдушев Д.М., Ванин А.С., 2024

УДК 621.316

4.2. Случаи неустойчивого регулирования частоты системами регулирования гидротурбин

Герасимов Д.А., Гуриков О.В.

АО «НТЦ ЕЭС»

Гидроэлектростанции (ГЭС) являются важной частью Единой энергосистемы России (ЕЭС России), составляя порядка 20 % ее установленной мощности. Генерирующее оборудование ГЭС используется при регулировании частоты в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы [1], определяя как надежность работы генерирующего оборудования всей энергосистемы, так и надежность энергоснабжения потребителей электрической энергии.

В ЕЭС России в последние два десятилетия благодаря высоким темпам модернизации оборудования ГЭС на подавляющем большинстве ГЭС были установлены электрогидравлические регуляторы (ЭГР) на современной микропроцессорной элементной базе. В эти же два десятилетия в ЕЭС России начали возникать технологические нарушения с нарушением устойчивости регулирования частоты, вызванные некорректной и (или) неэффективной работой микропроцессорных ЭГР, которые сопровождалась значительным экономическим ущербом [2]. Как показал обзор мирового опыта, данная

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ситуация не является уникальной и свойственна всем энергосистемам с большой долей ГЭС в общей выработке электроэнергии.

АО «НТЦ ЕЭС» принимало участие в анализе технологических нарушений с нарушением устойчивости регулирования частоты, произошедших в ЕЭС России. Целью данной статьи является описание наиболее характерных технологических нарушений с кратким заключением о причинах их возникновения.

В 14:06 1 августа 2017 г. в результате аварийного отключения ряда линий электропередачи произошло разделение ОЭС Востока на две изолированные энергосистемы с избытком мощности в западной части и дефицитом мощности в восточной части. В западной части ОЭС Востока функционировали следующие крупные электростанции: Зейская ГЭС с 4 ГА суммарной мощностью 496 МВт, Бурейская ГЭС с 5 ГА суммарной мощностью 1486 МВт, Нерюнгринская ГРЭС с загрузкой 280 МВт, Благовещенская ТЭЦ с загрузкой 118 МВт.

По факту повышения частоты в начале переходного процесса ЭГР всех ГА Зейской ГЭС были автоматически переведены из режима регулирования мощности со статизмом по частоте (режим «Мощность») в режим регулирования частоты (режим «Частота») с одновременным отключением от управления группового регулятора активной мощности (ГРАМ). Автоматический перевод ЭГР ГА Зейской ГЭС в режим «Частота» при достижении заданных уставок не произошел.

Далее возникли нарастающие колебания частоты и мощности (см. рис. 1) с периодом порядка 20–25 секунд с максимальным размахом от 45 до 53 Гц. В колебательном процессе действием противоаварийной автоматики и защит отключался всё больший объем электрической нагрузки потребителей на полупериодах со снижением частоты и гидрогенераторов ГЭС – на полупериодах с повышением частоты. Колебания частоты прекратились только после потери всех ГА в западной части ОЭС Востока кроме единственного ГА-1 Зейской ГЭС, перешедшего в режим ограничения максимальной мощности с отсутствием регулирующего воздействия со стороны ЭГР. В результате было отключено 1200 МВт электрической нагрузки и произошло полное погашение Бурейской ГЭС.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

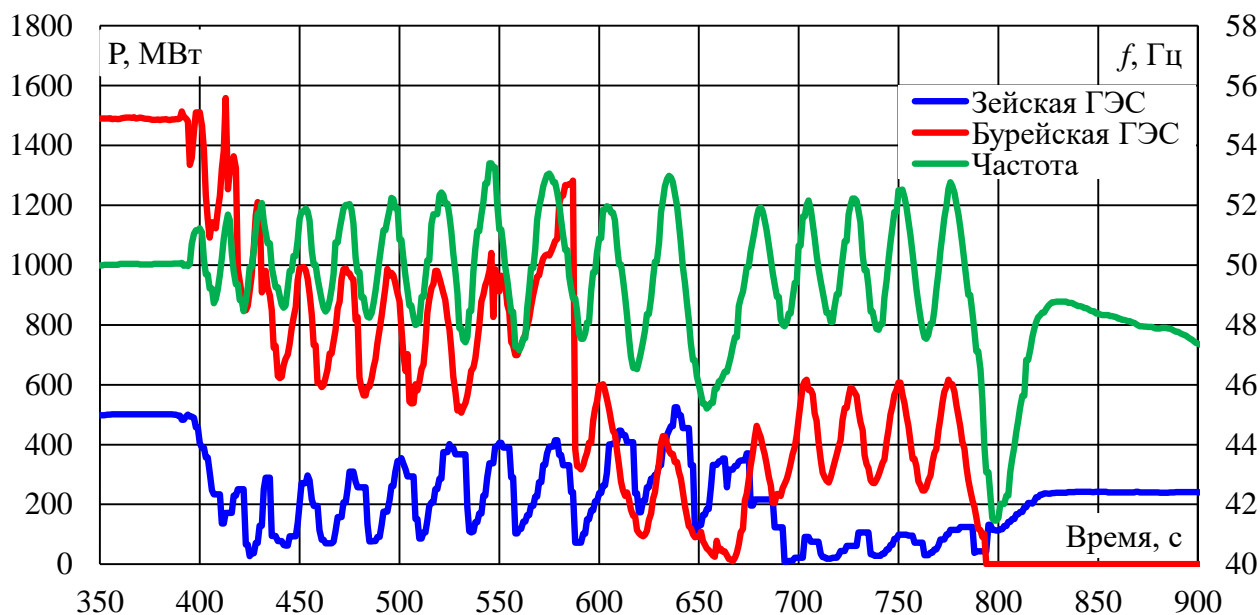


Рис. 1. Колебания частоты и мощности в ОЭС Востока при технологическом нарушении 01.08.2017

Колебания активной мощности Зейской и Бурейской ГЭС происходили практически синфазно с частотой, из чего можно сделать вывод о том, что причиной возникновения колебаний являлась работа ЭГР ГА данных ГЭС.

Также в процессе развития технологического нарушения ГА-4 Бурейской ГЭС с загрузкой по мощности 311 МВт (93 % от номинальной) отделился на изолированную нагрузку малой величины и далее отключился действием первой ступени противоразгонной защиты, поскольку ЭГР не воздействовал на закрытие направляющего аппарата при повышении частоты до значения 53 Гц.

Анализ с использованием цифрового моделирования подтвердил некорректную работу ЭГР, заключающуюся в: неэффективных параметрах настройки и алгоритмов режима «Частота» в ЭГР Зейской ГЭС; технической ошибке в алгоритмах перевода ЭГР Бурейской ГЭС в режим «Частота»; неэффективных алгоритмах регулирования в ЭГР Бурейской ГЭС, приводящие к появлению условий срабатывания первой ступени противоразгонной защиты.

29 октября 2018 г. произошло аварийное отделение Серебрянской ГЭС-15 и Серебрянской ГЭС-16 с прилегающим энергорайоном мощностью порядка 96 МВт на изолированную работу от ЕЭС России. Отделение энергорайона сопровождалось работой противоаварийной автоматики: сперва АОПЧ – автоматики по ограничению повышения частоты с отключением одного генератора; затем АЧР – автоматики частотной разгрузки с отключением потребителей; затем ЧАПВ – частотного автоматического повторного включения с восстановлением электроснабжения потребителей при восстановлении частоты. После этого в энергорайоне остался в работе единственный ГА-1 на Серебрянской ГЭС-16. Далее в отделившемся энергорайоне возникли незатухающие колебания частоты с периодом 25–30 секунд, достигавшие амплитуды более 1,5 Гц, что приводило к нарушению

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

электроснабжения потребителей и затрудняло синхронизацию отделившегося энергорайона с ЕЭС России. Незатухающие колебания частоты существовали на протяжении более 6 часов и прекратились только в результате синхронизации энергорайона с ЕЭС России. График изменения частоты напряжения при возникновении технологического нарушения 29 октября 2018 г. приведен на рис. 2 (красная кривая).

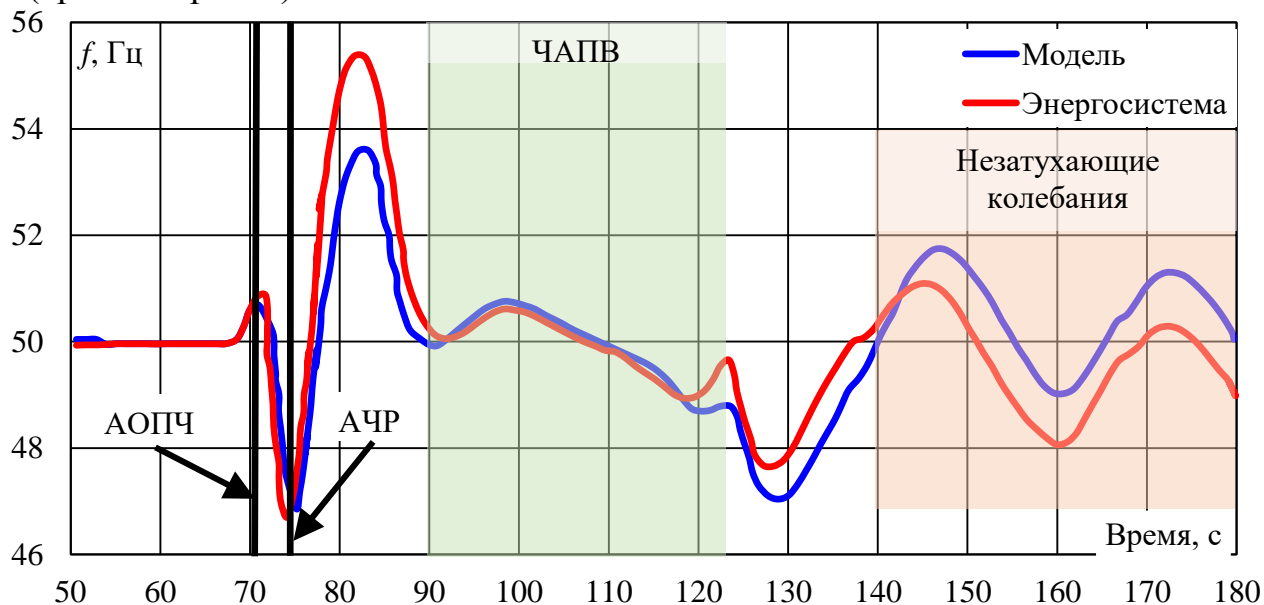


Рис. 2. Характер изменения частоты, зафиксированный в ходе технологического нарушения в энергосистеме Мурманской области 29.10.2018 в сравнении с результатами моделирования

Работа ЭГР Серебрянских ГЭС исследовалась путем: цифрового моделирования с разработкой подробных и достоверных моделей гидротурбин и ЭГР (см. рис. 2); проведения испытаний образцов ЭГР, подключенных к модели энергосистемы реального времени; проведением натурных испытаний. В результате исследования были выявлено и устранено большое число недостатков в алгоритмах регулирования ЭГР двух различных производителей.

В связи с технологическими нарушениями, произошедшими в ЕЭС России, представляет интерес рассмотреть отклонения в штатной работе ЭГР, имевшие место в мировой практике, причины их возникновения и меры, принятые для их предотвращения.

Наиболее показательной в данном случае является энергосистема юго-западного Китая, в которой более 70% выработки электроэнергии приходится на долю ГЭС, а в периоды половодья может достигать 85%. В 2012 году был завершен масштабный проект по строительству связи постоянного тока сверхвысокого напряжения (± 800 кВ), соединившей энергосистему юго-западного Китая с энергосистемой центрального Китая. При вводе связи в эксплуатацию был проведен системный эксперимент, в рамках которого проверялась возможность работы энергосистемы юго-запада несинхронно с энергосистемой центра. В ходе эксперимента в изолированно работающей

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

энергосистеме юго-запада Китая возникли колебания частоты с периодом 14 секунд и размахом 0,52 Гц (см. рис. 3). Избежать дальнейшего развития нештатной ситуации удалось путем своевременного оперативного вывода из работы ЭГР на нескольких крупных ГЭС энергосистемы юго-западного Китая.

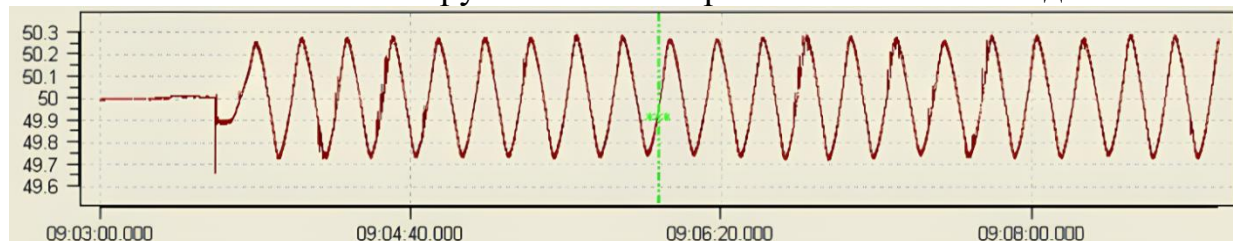


Рис. 3. Изменение частоты (Гц) в энергосистеме юго-запада Китая при несинхронной работе с энергосистемой центра Китая в ходе системного эксперимента в 2012 году [3]

Другой показательный пример – энергорайон Юньнань (Yunnan) на юге Китая, где из 21,2 ГВт установленной мощности на долю ГЭС приходится 75 %. Был запланирован перевод энергорайона Юньнань на несинхронную работу отключив существующие линии переменного тока [4].

Перед переводом на несинхронную работу были проведены системные испытания. 28 марта 2016 года в 21:25 в рамках испытаний был увеличен переток мощности по линии постоянного тока при отключенной связи на переменном токе, что привело к возникновению в энергорайоне незатухающих колебаний мощности и частоты с периодом около 20 секунд и размахом 0,2 Гц (см. рис. 4). Исходя из опыта, полученного при системных испытаниях в энергосистеме юго-западного Китая, ЭГР на крупных ГЭС энергорайона Юньнань были оперативно отключены, что позволило устранить возникшие колебания и предотвратить развитие нештатной ситуации.

Frequency of Chuxiong converter station(Hz)

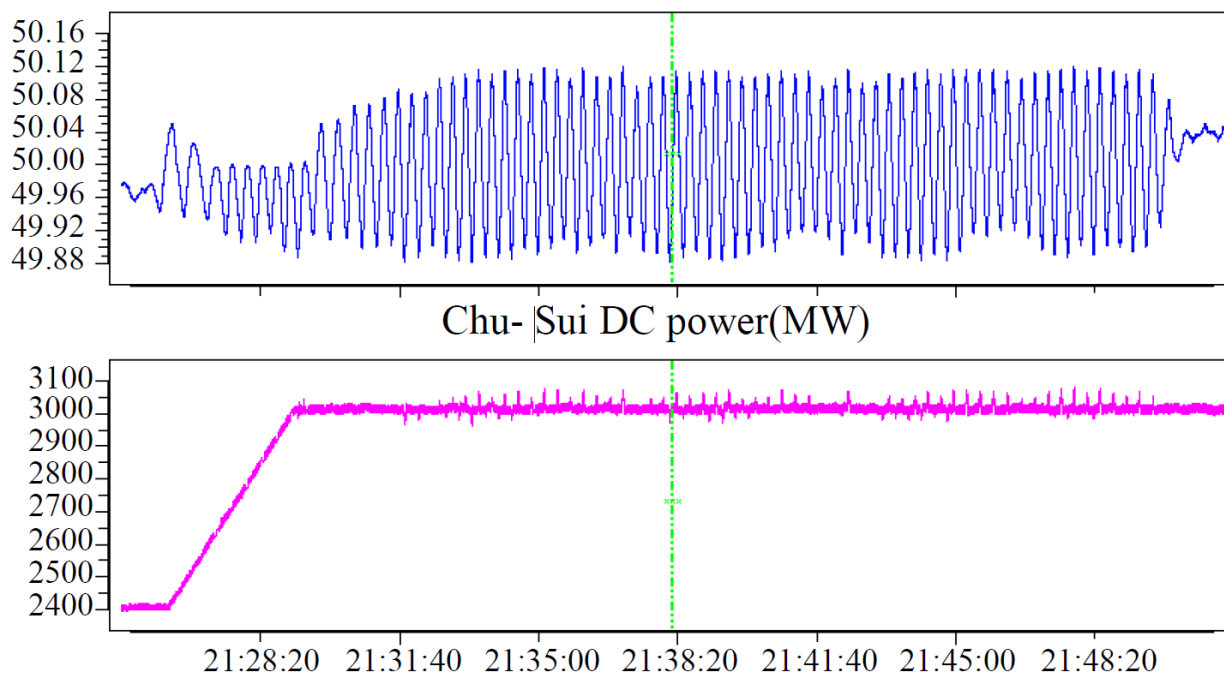


Рис. 4. Изменение частоты (Гц) и перетока активной мощности (МВт) по линии постоянного тока в ходе системного эксперимента в энергорайоне Юньнань 28 марта 2016 года [5]

Синяя кривая – изменение частоты, Гц;

малиновая кривая – переток мощности по линии постоянного тока, МВт;

Приведенные выше сведения являются частью обзорного исследования случаев некорректной работы ЭГР гидроагрегатов в мировой практике на основе открытых источников. Результаты исследования, а также обобщение накопленного зарубежного опыта изложены в [6].

Более подробное описание результатов исследований, выполненных в АО «НТЦ ЕЭС», и разработанных рекомендаций приведено в [2, 6–8].

В подавляющем большинстве технологических нарушений как в отечественной, так и в мировой практике, причиной некорректной и неэффективной работы ЭГР гидроагрегатов ГЭС являлись:

- несовершенство алгоритмов регулирования ЭГР;
- отсутствие четких требований к работе ЭГР при тяжелых технологических нарушениях, в том числе – разделении энергосистемы на несинхронные части;
- отсутствие эффективной методики выбора параметров настройки ЭГР в режимах работы «Мощность», «Частота» и алгоритма автоматического перевода между ними.
- отсутствие методик согласования параметров настройки ЭГР и параметров срабатывания противоаварийной автоматики типа АОПЧ, АЧР, ЧАПВ;

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

- отсутствие доступных моделей гидротурбин и современных микропроцессорных ЭГР, пригодных для анализа электромеханических переходных процессов в энергосистеме с изменением частоты;
- крайне высокая сложность или невозможность проверки эффективности работы ЭГР путем проведения системных испытаний.

В ходе исследований АО «НТЦ ЕЭС» совместно с АО «СО ЕЭС» и собственниками ГЭС разработало и воплотило в жизнь мероприятия по повышению эффективности работы ЭГР, что повысило надежность электроснабжения потребителей и работы ЕЭС России в целом.

Библиографический список.

1. ГОСТ Р 55890–2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2014-09-01 / АО «СО ЕЭС». – Москва: Стандартинформ, 2014.

2. Герасимов Д.А., Гуриков О.В., Кабанов Д.А., Смирнов А.Н. Проблемы устойчивости систем автоматического управления гидротурбиной на примере отечественного опыта / Д.А. Герасимов, О.В. Гуриков, Д.А. Кабанов, А.Н. Смирнов // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы – 2023. – № 89. – С. 109–130.

3. Wang J., Zhang J., Yin Y. HVDC Islanding Testing Analysis and Control Parameter Optimization, International Conference on Advances in Energy and Environmental Science (ICAEEES): IEEE; 2015, pp.735–741.

4. Chen Y., Zheng X., Chen H., Zhang Y., Zhu J., Chen J., Liang Z., Chen J. Research on HVDC transmission power scheduling on the background of asynchronous interconnection. 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), 2017, pp. 1-5.

5. Mo W., Chen Y., Chen H. Analysis and Measures of ULFO in a Large-Scale Hydropower Transmission System, Special issue on asynchronous interconnect and generation: IEEE; 2018, pp.1–8.

6. Герасимов Д.А., Гуриков О.В. Проблемы устойчивости систем автоматического управления гидротурбин на примере зарубежного опыта / Д.А. Герасимов, О.В. Гуриков // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. – 2022. – № 87. – С. 103–122.

7. Герасимов А.С., Герасимов Д.А., Гуриков О.В., Кабанов Д.А., Сацук Е.И., Смирнов А.Н. Исследование систем автоматического управления гидроагрегатами Серебрянских ГЭС / А.С. Герасимов, Д.А. Герасимов, О.В. Гуриков, Д.А. Кабанов, Е.И. Сацук, А.Н. Смирнов // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. – 2023. – № 88. – С. 35–50.

8. Герасимов А.С., Гуриков О.В., Кабанов Д.А., Сацук Е.И., Смирнов А.Н. Моделирование поворотно-лопастной гидротурбины в задачах анализа электромеханических переходных процессов / А. С. Герасимов, О. В. Гуриков,

Д.А. Кабанов, Е.И. Сацук, А.Н. Смирнов // Известия НТЦ Единой Энергетической Системы. – 2022. – № 86. – С. 5–16.

© Герасимов Д.А., Гуриков О.В., 2024

УДК 621.314

4.3. Оптимизация мощности возобновляемых источников энергии в локальных энергосистемах

Голобоков С.В., Бростилова Т.Ю.,
Пензенский государственный университет, г. Пенза
Душутин К.А., Банбенков С.К.,
Мордовский национальный исследовательский университет им.
Н.П. Огарева, г. Саранск

В последние десятилетия в мировой энергетике наблюдается интенсивное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В нашей стране ВИЭ появились недавно и значительного распространения не получили. Главной причиной является зависимость генерируемой мощности ВИЭ от погоды, что для большей части регионов России с суровым климатом неприемлемо. Другой причиной отставания от европейских стран является низкая эффективность и высокая стоимость объектов ВИЭ.

Одним из путей решения проблемы электроснабжения малых удаленных районов является использование распределенной генерации на основе ветряных (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций. Особенно эффективно применение децентрализованного энергоснабжения районов в южной части нашей страны с высоким уровнем солнечной инсоляции [2]. Для ветропарков напротив, благоприятные климатические условия на побережье мирового океана, в северной и восточной части РФ.

ВИЭ внедряют в изолированные системы электроснабжения с генерирующими установками, расположенными в непосредственной близости от потребителя [1]. Основными критериями выбора ВИЭ являются: развиваемая мощность, доля замещения углеводородного топлива, себестоимость вырабатываемой электроэнергии, цена применяемых энергоустановок, расстояние от ВИЭ до потребителей и сетей централизованного электроснабжения.

Устойчивость электроэнергетической системы достигается балансом мощности генерации и суммарной мощности нагрузок [1]. В случае энергодефицитного района мощностей собственной генерации недостаточно, часть электроэнергии район получает по магистральным ЛЭП.

Характерной особенностью эксплуатации ВИЭ является зависимость мощности генерации от погодных условий [2]. Для покрытия графика нагрузок в течение неблагоприятных дней приходится завышать установленную мощность ВИЭ по сравнению с расчетной. Так например, для сокращения времени

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ограничения питания в локальных энергосистемах установленная мощность ветропарков превышает пиковую в 3 раза.

Для солнечных электростанций суммарная мощность превышает расчетную минимум в 5 раз. Несмотря на такую избыточную мощность объектов генерации обеспечить всех потребителей тепловой и электрической энергии в течение всего календарного года не получается. Для изолированных энергосистем в неблагоприятные периоды приходится включать резервные источники. Для большинства региональных энергосистем Европейской части нашей страны собственной генерации недостаточно.

На рис. 1 представлен суточный график локальной энергосистемы с различными типами электростанций, с дефицитом и избытком генерирующих мощностей.

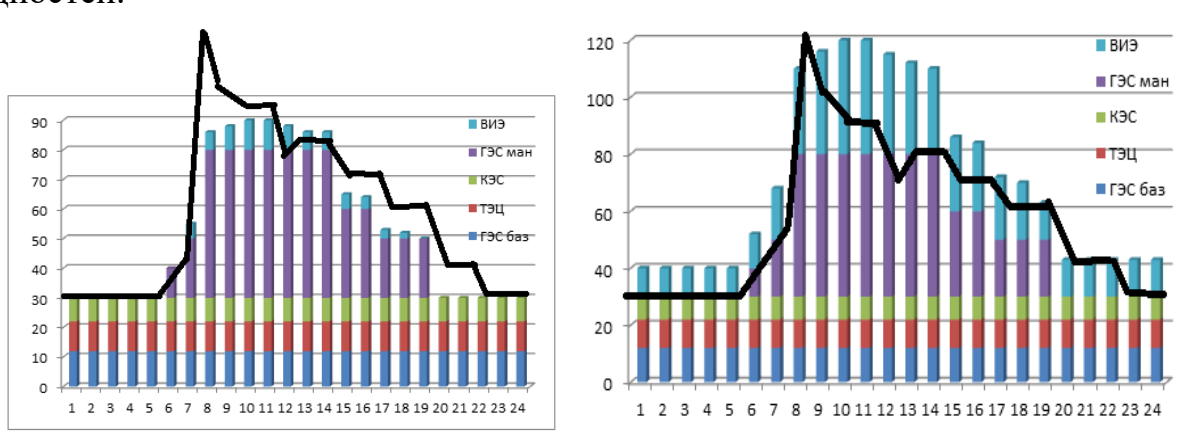


Рис. 1. Суточный график нагрузок с дефицитом и избытком генерации

Внедрение ВИЭ могло бы частично решить проблему дефицита мощностей и разгрузить крупные электростанции. По мере развития распределенной генерации доля ВИЭ в составе энергосистемы будет увеличиваться, а доля классической генерации, напротив - снижаться. Однако печальный опыт серии энергетических кризисов в Европе, США и Японии в 2019-2022 гг показывает, что чрезмерное увлечение зеленой энергетикой приводит к обвалу энергосистемы и значительным финансовым потерям. В условиях России с ее холодным климатом на большей части территории такого рода эксперименты недопустимы в принципе. Встает вопрос – какова доля мощности ВИЭ к мощности ТЭЦ в составе энергосистемы позволит сохранить ее устойчивость в самых неблагоприятных погодных условиях?

Кроме выработки электроэнергии ТЭЦ обеспечивает промышленные объекты и ЖКХ тепловой энергией. Мощности тепловой и электрической генерации современных ТЭЦ примерно одинаковые. В тех случаях, когда централизованного теплоснабжения нет или мощности ТЭЦ не хватает, применяют автономные котельные. Поэтому доля генерации электрической мощности ТЭЦ будет определяться годовым графиком тепловых нагрузок потребителей. А доля мощности ВИЭ будет определяться величиной энергопотенциала солнца или ветра в конкретной местности. Перекос в сторону

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ВИЭ может привести к внеплановой остановке, дефициту тепловой и электрической мощности, массовым отключениям и потере устойчивости энергосистемы.

Оптимальное соотношение мощности ВИЭ и мощности тепловой генерации зависит от климатической зоны. В южных районах нашей страны зимы мягкие, потребности в тепловой энергии невелики. В этих районах мощности ВИЭ могут быть значительными и даже превышать мощность ТЭЦ. К тому же энергопотенциал солнца в них самый высокий.

В северных районах зима продолжительная, температура воздуха низкая, потребность в тепловой энергии гораздо больше. Заменить значительную долю тепловой генерации объектами ВИЭ вряд ли получится. В северных районах РФ солнечная инсоляция сильно меняется по сезонам, а за северным тропиком зимой наступает полярная ночь, поэтому применение СЭС технически неоправдано.

Важнейшим резервом эффективности ВИЭ является повышение загрузки агрегатов. В тех случаях, когда мощность генерации ВИЭ избыточна, применение автобалластной нагрузки позволяет увеличить объемы выработки электроэнергии. В качестве такой нагрузки могут быть использованы системы отопления или горячего водоснабжения населенных пунктов и промышленных объектов.

Суточный график нагрузок энергосистемы с избыточной генерацией представлен на рис.1б. В нижней части графика представлены базовые станции – КЭС, ТЭЦ и ГЭС базовая. ГЭС маневренная выполняет удержание баланса в энергосистеме, когда генерация ВИЭ отсутствует. Мощности нагрузок в энергосистеме днем примерно в 2 раза больше чем ночью.

ВИЭ представлены в виде СЭС и ВЭС, причем СЭС работает в течение 4-6 часов в середине светового дня. Если ГЭС в составе энергосистемы отсутствует, баланс мощности поддерживается КЭС, но такой режим требует поддержания значительного горячего резерва и является неэкономичным. Анализ графика показывает, что в энергосистеме имеется избыточная мощность. При благоприятных погодных условиях ВИЭ способны выдавать до 400 % пиковой потребляемой мощности энергосистемы.

Непременным условием устойчивости энергосистем является баланс мощности генерации и потребления. Избыточная мощность установленного генерирующего оборудования является резервом. В разное время суток величина резервной мощности изменяется. Для удержания баланса по активной и реактивной мощности вслед за изменением суммарной мощности приемников (черная линия на рис. 2) по командам диспетчера будут подключены электростанции разных типов.

Если район подключен к магистральным ЛЭП, часть недостающей мощности он получает из объединенной энергосистемы. Если мощность ВИЭ избыточна, слагаемое в формуле возьмется со знаком «+». Если локальная система имеет межсистемные связи ограниченной пропускной способности, сбросить в энергосистему всю избыточную мощность не получается. В этом случае

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

мощность генерации отдельных электростанций будет ограничена. Поскольку базовые станции работают в режиме постоянной мощности, в первую очередь будут затронуты ВИЭ и маневренные ГЭС.

На модели выполнен расчет времени ограничения питания нагрузки мощностью 300 кВт. ВЭУ марки Acciona AW-70\1500 развивает номинальную мощность 1,5 МВт при скорости ветра 11 м/с [3]. Для расчета применялись данные ГисМетео по Пензенской области за май 2020 г. Расчет выполнен для пяти ВЭУ. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Время ограничения потребителей ВЭС разной мощности

Скорость Ветра v ,	Время работы	Мощность P_1 ,	Время ограничения с числом ВЭУ				
			T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
м/с	час	кВт	час	час	час	час	час
0	48	0	48	48	48	48	48
1	48	0	48	48	48	48	48
2	120	0	120	120	120	120	120
3	168	37	168	168	168	168	168
4	216	88	216	216			
5	24	172	24				
6	24	298	24				
7	72	473					
8	24	706					
		ограничение	648	600	384	384	384
Итого	744	избыточная	96	144	360	360	360

Анализ данных таблицы 1 показывает, что примерно 200 часов в мае скорость ветра была менее 3 м/с, ВЭУ не работает, мощность генерации равна нулю. Применение двух ВЭУ позволило снизить время ограничения с 648 до 384 часа в месяц. Дальнейшее увеличение числа ВЭУ не приводит к заметному росту мощности генерации. ВЭС не способна обеспечить электроснабжение нагрузки мощностью 300 кВт менее чем 384 часа в месяц.

Половину времени в мае месяце генерации ВИЭ не хватает и приходится дополнительно задействовать аварийные и резервные источники. Одна ВЭУ примерно 96 часов или 13% времени в мае 2020 г выдавала в сеть мощность, превышающую мощность всех потребителей. Две ВЭУ будут выдавать избыточную мощность 144 часа.

В этом случае повысить эффективность использования можно за счет увеличения времени работы ВИЭ с полной нагрузкой. Например, можно избыточную мощность ВИЭ направить на работу электрических систем отопления. При избыточной генерации ВИЭ можно снизить мощность ГЭС. Это позволит сохранить в водохранилище запас воды и использовать накопленный гидропотенциал для генерации электроэнергии в то время, когда погодные условия неблагоприятны для работы ВИЭ. Вся избыточная мощность (на рис 2 –

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

выше графика нагрузок) будет переброшена в нижнюю часть графика с заменой или снижением мощности ТЭЦ и КЭС [4]. Предложенные режимы генерации позволят не только снизить расход топлива ТЭЦ и КЭС, но и уменьшить выбросы в атмосферу парниковых газов.

Важнейшим экологическим эффектом такого решения является возможность закрытия сети мелких котельных, которые, не оборудованы эффективными фильтрами для очистки дымовых газов. Как правило мелкие котельные расположены на большом удалении от ТЭЦ, куда тянуть тепловые сети невозможно. Генерация ВИЭ будет эффективна в удаленных районах, где плата за подключение к централизованным сетям может достигать значительных величин. Электрообогрев является балластной нагрузкой энергосистемы [4]. Его применение во время ночного провала позволит сохранить мощность ВЭС и повысить загрузку агрегатов.

Применение объектов ВИЭ является одним из путей решения государственных задач по повышению энергетической эффективности всех сфер деятельности. Внедрение электростанций на основе ВИЭ в состав локальных энергосистем позволит:

1. Снизить объемы потребления, добычи и завоза в регионы традиционного углеводородного топлива - угля, мазута, дизельного топлива.
2. Снизить негативное воздействие выбросов ТЭС и резервных дизельных электростанций при сжигании углеводородного топлива на природу.
3. Снизить тарифы на электроэнергию для населения, промышленных и муниципальных объектов.
4. Частично заменить тепловую генерацию объектами ВИЭ и тем самым повысить эффективность их использования.
5. Снизить объемы потребления тепловой и электрической энергии из сетей централизованного энергоснабжения и тем самым компенсировать выбывающие мощности КЭС и ТЭЦ.

Таким образом, мощность ТЭЦ в суточном графике нагрузок локальной энергосистемы определяется не электрическими, а тепловыми нагрузками. Оптимальное соотношение мощностей ВИЭ и классической тепловой генерации будет выполняться в том случае, когда ТЭЦ полностью покрывает потребности в тепловой энергии и частично – потребности района в электрической энергии. Недостающую электрическую мощность должны вырабатывать ВИЭ. При неблагоприятных погодных условиях можно повышать мощность ТЭЦ или подключать резервные источники – дизельные электростанции или газопоршневые установки.

Если в какие-то дни мощность ВИЭ позволит закрыть график нагрузок полностью, появляется возможность снизить мощность базовых электростанций. Снижение мощности ТЭЦ позволяет экономить углеводородное топливо. Но реализация такого режима потребует модернизации систем отопления или частичный перевод помещений на электрообогрев.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Для снижения колебаний генерации мощности ВИЭ, вызванных неблагоприятными погодными условиями, в состав локальных энергосистем включают ВИЭ избыточной установленной мощности. При этом большую часть дней в году мощности ВИЭ в Поволжье все равно недостаточно для заполнения графика нагрузок. При благоприятных погодных условиях мощность генерации ВИЭ может увеличиться в 3-5 раз [5]. При этом вся избыточная мощность будет направлена в объединенную энергосистему или в автобалластную нагрузку.

Обеспечить электроснабжение местных потребителей только за счет ВЭУ в большинстве местностей РФ невозможно. Тепловая генерация остается важнейшим фактором жизнеобеспечения в жестких природно-климатических условиях большей части территории РФ. Оптимальная мощность генерации ВИЭ определяется разностью суточных графиков электрической и тепловой мощности ТЭС. Для сохранения запасов топлива возможно частичное замещение генерации ТЭС объектами ВИЭ. Повышение эффективности ВИЭ в локальных энергосистемах возможно за счет повышения загрузки агрегатов, включения балластной нагрузки, повышения мощности транзита магистральных ЛЭП.

Библиографический список

1. Агеев В.А., Голобоков С.В., Александрин А.А. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ В ПОВОЛЖСКОМ РЕГИОНЕ // Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ» // Тюмень: Изд-во ТИУ, 2020. – С. 163-166.
2. Как развивается солнечная энергетика в России // – URL: <https://recyclemag.ru/article/razvivaetsya-solnechnaya-energetika-rossii>. (дата обращения 16.03.2023). – Текст: электронный.
3. Каталог продукции компании Energy Wind. – URL: <https://energywind.ru/vetryanyie-elektrostantsii/promyshlennye-vetrogeneratory-dlya-biznesa> (дата обращения 18.10.2022). - Текст : электронный.
4. Голобоков С.В., Душутин К.А., Чукарева М.М., Каворин А.О. Перспективы развития альтернативной энергетики в северных районах России. Энергоэффективные и ресурсо-сберегающие технологии и системы. Межвузовский сборник научных трудов. 26 ноября 2020, Саранск, 2020. С. 65-68
5. Голобоков С.В., Душутин К.А., Буйнов Д.А., Клейменов А.В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ // В сборнике: Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLI Региональной) научно-технической конференции. Нижний Новгород, 2023. С. 369-374.

© Голобоков С.В., Бростилова Т.Ю., Душутин К.А., Банбенков С.К., 2024

УДК 621.313.12

4.4. Анализ причин аварии турбогенератора ТЗФП-220-2УЗ

Казаков Ю.Б, Грачев И.А.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

Аннотация: В статье приведены сведения о турбогенераторе № 8 типа ТЗФП-220-2УЗ 2УЗ производства АО «Силовые машины» филиала «Черепетская ГРЭС имени Д.Г. Жимерина» АО «Интер РАО - Электрогенерация» (заводской номер №18234, инв. № 14/003181), обстоятельства произошедшей 21.08.2023 г. аварии турбогенератора, выполнен анализ нормативно-технической, справочно-информационной, эксплуатационной и ремонтной документации по турбогенератору, актов осмотров турбогенератора, выполненных работ, результатов обследований, динамики изменения параметров технического состояния турбогенератора, результатов визуально-измерительного контроля, проведено исследование технического процесса повреждения турбогенератора, сформировано экспертное заключение о причине повреждения турбогенератора № 8 ЧГРЭС типа ТЗФП-220-2УЗ.

Ключевые слова: турбогенератор, обстоятельства аварии, технический процесс повреждения, пробой изоляции стержня, анализ причин аварии, экспертиза.

I. ВВЕДЕНИЕ

В турбогенераторах в процессе эксплуатации могут возникать повреждения, приводящие к аварийным ситуациям. После аварии, произошедшей на турбогенераторе № 8 ЧГРЭС типа ТЗФП-220-2УЗ 21.08.2023 года, в Ивановском государственном энергетическом университете им. В. И. Ленина было проведено исследование технического процесса повреждения данного турбогенератора производства АО «Силовые машины» для филиала «Черепетская ГРЭС имени Д.Г. Жимерина» АО «Интер РАО - Электрогенерация».

Турбогенератор № 8 ЧГРЭС типа ТЗФП-220-2УЗ – турбогенератор синхронный трехфазный с неявнополюсным ротором с полным воздушным охлаждением. Турбогенератор предназначен для выработки электрической энергии в продолжительном режиме работы S1 по ГОСТ 183-74 при соединении с паровой турбиной и установке в закрытом помещении.

II. ОБСТОЯТЕЛЬСТВА АВАРИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Энергоблок № 8 ЧГРЭС находился в работе (был включен в работу из холодного резерва) с активной электрической нагрузкой 133,4 МВт и с реактивной электрической нагрузкой 1,89 МВар, параметры токов, напряжений не превышали номинальные.

В 09-41 21.08.2023 г. произошло отключение генератора Г-8 действием защиты UoG «Защита от замыканий на землю обмотки статора генератора». Энергоблок отключен действием защиты «Асинхронный режим» или «Гашение

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

поля генератора». Вследствие недопустимых отклонений технологических параметров или ошибочных действий оперативного персонала произошло повреждение генератора Г-8 электростанции, а также его отключение. Причиной аварии послужили недостатки конструкции и нарушение электрической изоляции.

Оперативный персонал КТЦ проконтролировал работу защит и произвел операции по останову энергоблока. Снятая осциллограмма зафиксировала снижение напряжения в фазе «С». U_0 генератора от значения нормального режима (2,3 В) мгновенно увеличилось до 75 В (уставка срабатывания $U_0=15$ В). В шкафах защит сработала « U_0G » «Защита от замыканий на землю обмотки статора генератора». Персонал ЭЦ произвел внешний осмотр Г-8, где видимых повреждений не обнаружил. В 11-30 генератор Г-8 выведен в ремонт.

Проведён визуально-измерительный контроль нагрева активной стали генератора Г-8. Произведен замер температуры тепловизором. Температурограмма для времени 14-20 представлена на рис. 1.

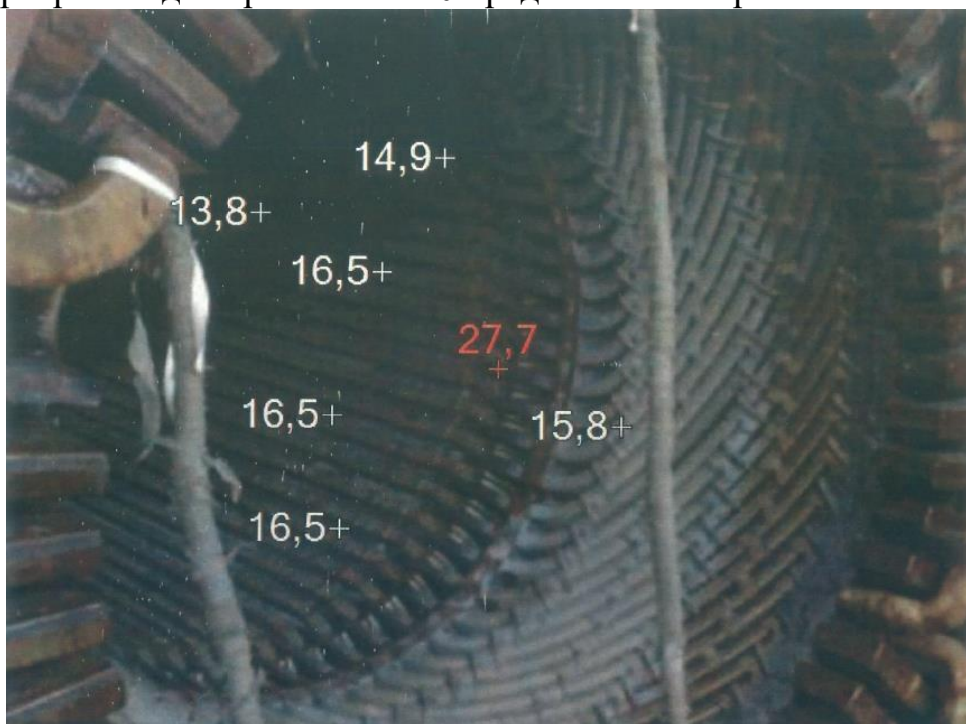


Рис. 1. Температурограмма для времени 14-20
Температурограмма для времени 15-15 представлена на рис. 2.



Рис. 2. Температурограмма для времени 15-15

После демонтажа пояса из замазки изоляционных коробок произведен визуально-измерительный контроль лобовых частей обмотки статора турбогенератора ТЗФП-220-2УЗ. Были визуально зафиксированы следующие дефекты: шнуровой бандаж (шнур-чулок технический диаметром 3 мм), находящийся внутри пояса замазки, в процессе эксплуатации подвергался воздействию высоких температур; верхние слои изоляции стержней, находящиеся в районе пояса замазки, также подвергались воздействию высоких температур; растрескивание пояса замазки; следы вибрации стержней на выходе из паза; множественные следы частичных разрядов; частичное разрушение изоляционных коробок; ослабление крепления изоляционных коробок; нагрев активной части железа статора концевого пакета №5 между 39 и 40 пазами; прогорание пазовой коробки, на выходе из паза № 23, со стороны пробоя.

Отмеченные дефекты в совокупности могли привести к ускоренной потере изолирующих свойств изоляции стержня (паз № 23) со стороны ЩКА генератора с последующим возникновением однофазного замыкания обмотки статора на корпус генератора фазы «С».

III. ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

После полученных данных об обстоятельствах аварии, авторами статьи был произведен анализ причин повреждения турбогенератора. Статор генератора был изготовлен по технологии вакуум-нагнетательной пропитки ВВП (Global VPI), недостатком которой является возможное в процессе эксплуатации ослабление клиньев. Ослабление крепления стержня в пазе в радиальном направлении способствовало возникновению вибрации стержня, максимальная величина которой, как правило, имеет место в зоне выхода стержня из паза из-за дополнительного воздействия лобовых частей обмотки статора. Истирание под действие вибраций корпусной изоляции стержня в зоне пазовой коробочки привело к ее утончению, нарушению целостности полупроводящего покрытия и локальному разрушению корпусной изоляции, повышению градиента

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

электрического поля в этой зоне, интенсификации частичных разрядов, процессу ионизационного разрушения полупроводящего покрытия линейных и близких к ним по электрической схеме стержней, возникновению и развитию разрядного процесса. При ослаблении крепления со временем произошло перемещение стержня № 23 со стороны щеточно-контактного аппарата генератора с нарушением прилегания боковой поверхности стержня к стенке паза сердечника статора. Между полупроводящей поверхностью стержня и стенкой паза при нарушенном уплотнении произошел разрыв контакта цепи с током, который сопровождается возникновением и развитием искрового разряда (микродуга), дальнейшим разрушением полупроводящего слоя, локальным разрушением изоляции. Потеря изолирующих свойств стержня (паз № 23) произошла от пробоя и возникшей электродуги с последующим замыканием токоведущей части стержня на землю. Причиной пробоя изоляции стержня № 23 является процесс виброискровой эрозии, возникающий на уложенной обмотке генератора в процессе эксплуатации.

Очагами развития пробоя в изоляции слабыми местами являются зазоры между отдельными элементами изоляции, появляющиеся в результате расслоения изоляции при механических воздействиях. В этих зазорах возникает ионизация, которая способствует постепенному прорастанию частичных разрядов в изоляции. Появляется тангенциальная составляющая напряженности электрического поля, и частичный разряд получает возможность развиваться вдоль слоев изоляции. Дойдя до соседнего зазора в изоляции, разряд переходит в следующий слой, после чего он может прорасти далее. Частичный разряд иногда доходит до заземленных участков значительное расстояние. Вследствие последовательного продвижения острия разряда произошел полный пробой изоляции (известно, что разряд или пробой следует, преимущественно, вдоль силовой линии, где градиент потенциала наибольший). Так как магнитопровод турбогенератора заземлен, то дальнейшее развитие аварийного процесса приобрело характер однофазного короткого замыкания на землю.

По времени ионизационный пробой может развиваться довольно медленно, поэтому каждое отдельное импульсное воздействие незначительно снижает изоляционную прочность. Но каждый импульс оставляет необратимый след, и при большом числе импульсов электрическая прочность изоляции снижается значительно. Данные процессы постепенно разрушают изоляцию стержня. Так поврежденный турбогенератор эксплуатировался без повреждений на протяжении более 8 лет.

Пробой изоляции стержня привел к разогреву места замыкания, температура контакта в изоляции повысилась до пределов, когда начинается ее прогорание. Вокруг зоны повреждения возникает локальный газовый пузырь, существенно снижая электрическую прочность изоляции.

Развитие этого процесса подтверждается результатами визуально-измерительного контроля турбогенератора.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря своевременному срабатыванию защиты однофазных коротких замыканий, отключившей турбогенератор, повреждение изоляции в зоне стержня № 23 не привело к пробоям на соседние стержни, что могло вызвать более тяжелые последствия.

Рекомендуется изменение периодичности капитальных ремонтов не реже 1 раза в 6 лет с проведением следующего капитального ремонта турбогенератора № 8 в 2026 г. Одновременно в целях ускорения аварийного ремонта турбогенератора рекомендуется приобретение резервного статора турбогенератора ТЗФП-220-2УЗ. Также рекомендуется улучшить охлаждение неventилируемой зоны в районе пояса замазки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников И.А., Попов И.В., Карелин В.С., Соколов П.В. Автоматизированная система мониторинга и предиктивной диагностики турбогенератора // Электротехнические комплексы и системы [Том 2]: Материалы II Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках международной научно-практической конференции / Уфимский университет науки и технологий. – Уфа: АЭТЕРНА, 2023. – С. 3-23.
2. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы. Аварии и инциденты: техн. пособие / Ю.Н. Самородов. – М.: Элекс-КМ, 2008. – 488 с.
3. Лазарев Г.Б. Аварийность генераторов и синхронных электродвигателей. Новые проблемы / Г.Б. Лазарев, Ю.Н. Самородов // Сб. докладов науч.-техн. конф. «Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения». – М.: АЭН РФ, 2015. – С. 35–42.
4. О.С. Голоднова. Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения. М.: ИПКГосслужбы, 2005 г.
5. Ростик Г.В. Оценка технического состояния турбогенераторов. Учебно-практическое пособие. М.: ИПКГосслужбы, 2008.
6. Константинов, Г.Г. Турбогенераторы для тепловых и атомных электростанций: учебное пособие / Г.Г. Константинов – Иркутск: ИРНТУ, 2018. – 332 с.
7. Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. (Приказ Минэнерго России от 25 октября 2017 г. № 1013).
8. Хренников, А.Ю. Диагностика и аварийность электрооборудования: Учеб. пособие. / А.Ю. Хренников - ЛитРес, 2021. – 230 с.
9. Глебов, И.А. Диагностика турбогенераторов / И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич // АН СССР. ВНИИ Электромашиностроения. – Л.: Наука, 1989. – 118 с.
10. Алексеев, Б.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов: Обзор отечественного и зарубежного опыта – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.

© Казаков Ю.Б, Грачев И.А., 2024

УДК 531.768

4.5. Многодисковый электропривод для борьбы с гололедом воздушных линий (ЭПМДК)

Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Кабиров А.М., Салихов Р.М., Семенов Я.О.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)»

Аннотация

В работе предлагается оригинальная конструкция электропривод многодисковый для борьбы с гололедом воздушных линии (ЭПМДК) комбинированный. Составлена обобщенная математическая модель (ЭПМДК) с аналитическим решением, рассмотрены частные случаи полученного решения. Исходная ЭПМДК найдет широкое применение не только в энергетике, но и в машиностроении, станкостроении, электромашиностроении и т.д.

Ключевые слова: цилиндрическая пружина, секции, индуктивность

Введение

Воздушными называются линии, предназначенные для передачи и распределения электроэнергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и поддерживаемым с помощью опор и изоляторов. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи сооружаются и эксплуатируются в самых разнообразных климатических условиях и географических районах, подвержены атмосферному воздействию (ветер, гололед, дождь, изменение температуры). На работу конструктивной части ВЛ оказывают воздействие механические нагрузки от собственного веса проводов и тросов, от гололёдоизморозевых образований на проводах, тросах и опорах, от давления ветра, а также из-за изменений температуры воздуха. Из-за воздействия ветра возникает вибрация проводов (колебания с высокой частотой и незначительной амплитудой), а также пляска проводов (колебания с малой частотой и большой амплитудой). Указанные выше механические нагрузки, вибрации и пляска проводов могут вызвать многократные перегибы проволок проводов и тросов, излом, обрыв проводов, что может привести к пробоям или перекрытию изоляции.

В работе рассматривается один из вариантов борьбы с гололедом воздушных линий в виде использования нового оригинального электромеханического устройства, т.е. многодискового электропривода. Эта проблема является актуальной проблемой в современной энергетике, что связано проблемой создания таких устройств, разработкой их теории, методики инженерного расчета и соответственно созданием программы для оптимизации.

Методика проведения исследований

Электропривод многодисковый [1;2] (рис. 1), содержит корпус 1, внутри которого расположены подвижные вдоль продольной оси вала ЭПМДК диски 2 с режущими наконечниками и между дисками установлена зигзагообразная обмотка 3. С двух сторон ЭПМДК закрыт подвижными контактными фрикционными дисками 4. Внутри проходит сама ВЛ (5), покрытая коркой льда.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Движение привода происходит не только за счет движения дисков 2, но и установленным дополнительно двигателем (6) [3], которая и сама по конструкции имеет возможность соскребывать лед с ВЛ. При подаче на обмотку тока, соседние между дисками витковые токи имеют разные направления, поэтому витки начинают отталкиваться друг от друга. Отталкиваясь, витки начинают перемещать диск 2 вдоль от вала, тем самым удаляя лед с поверхности ВЛ. При этом, регулируя ток в обмотке 3, можно регулировать производительность привода. При отключении тока за счет памяти формы обмоток диски начинают приближаться друг к другу и привод придет в нерабочее состояние. В отличие от известных электроприводов многодисковых подобного класса, предложенная конструкция проста, надежна, имеет относительно уменьшенные массогабаритные показатели. [1;2;3]. Применение двигателя, имеющего такую же функцию, позволяет повысить производительность, скорость и эффективность ЭПМДК в 1,5-2 раза.

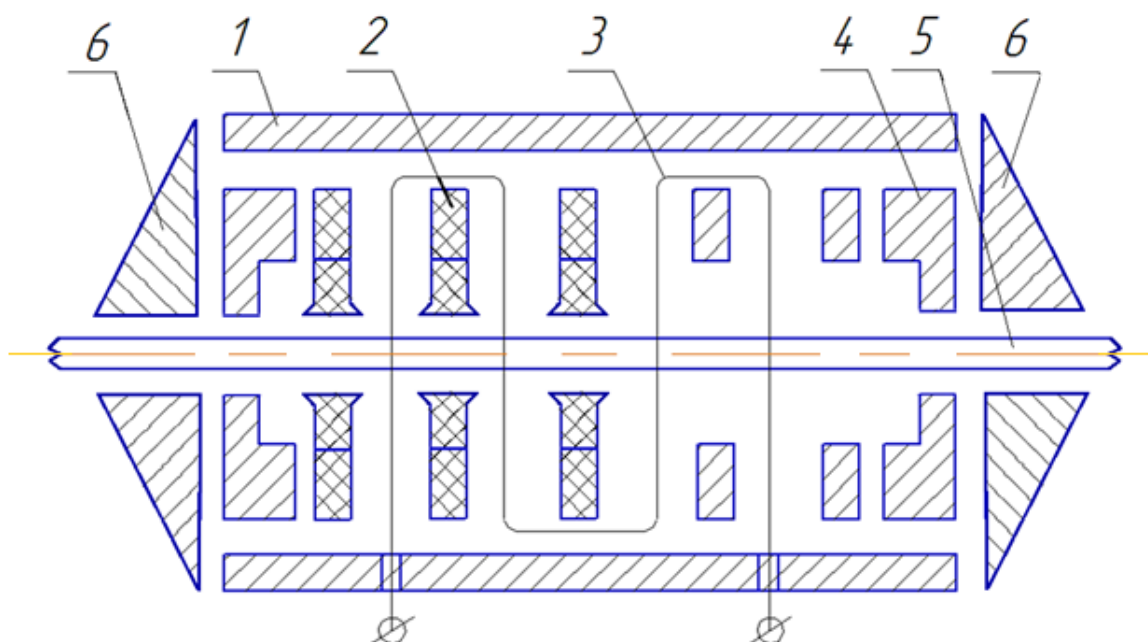


Рис. 1. Электропривод многодисковый для борьбы с гололедом воздушных линии (ЭПМДК)

Результаты исследований и их обсуждение
Математическая модель выглядит ЭПМДК следующим образом [3].

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \times \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w = \rho \frac{1-\mu^2}{E} \times \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2} + 2n\xi \times \frac{\partial s_w}{\partial t} + \omega_0^2 s_w = -2\pi A_{\text{ext}} \sin \omega t \times s_w \quad (1) \\ e_w = B_0 l_w \frac{\partial s_w}{\partial t} + \\ + iR + \frac{di}{dr} \left(\sum_1^N L_{ow} + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{ow,n} \right) + \frac{di}{dt} \left(\sum_1^N K_{Lw} s_w + \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} s_w \right) + \\ + i \left(\sum_1^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right) \\ s_w \Big|_{r_w=r_0} = 0; s_w \Big|_{r_w=R_0} = 1 \end{array} \right.$$

где, s_w - радиальное перемещение, w -го витка пружины; E -модуль упругости первого рода; μ - коэффициент Пуассона; $\eta\xi$ - коэффициенты трения и демпфирования; ω_0 - частоте собственных колебаний; ω - K частоте вынужденных колебаний; r_w - радиус W -го витка; l_w длина участка витка; B_0 - индукция магнитного поля; $s_w(1)$ - форма колебаний пружины магнитного поля; R - активное сопротивление спирали, $e(t)$ - подводимое напряжение, L_{ow} и M_{ow} - индуктивность и взаимоиндуктивность пружины в статическом состояний, K_{Low} K_{Min} - некоторые конструктивные постоянные [3].

Система дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами представляет собой математическую модель обобщенной конструкции электропривода многодискового с пружинным приводным элементом и позволяет исследовать характеристики электропривода многодискового

Электропроводящая цилиндрическая пружина подключена к синусоидальному источнику тока $i = I_m \sin(\omega t)$, что упрощает поставленную задачу и делает более наглядными выкладки. Тогда уравнение движения точки приведения системы будет иметь вид:

$$\ddot{x} + 2n\xi\dot{x} + \omega_0^2 x = \sum s_w(1) \left\{ \frac{I_m^2}{2} \left[\left(\sum \frac{dL_{ow}}{dr_{ow}} + 2 \sum \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} \right) + \left(\sum K_{Lw} + 2 \sum \sum K_{Mw,n} \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \sin^2 \omega t + B_0 I_m l \sin \omega t \right\}$$

Решение полученного уравнения находится как сумма решений вида:

$$x_1 = \frac{\sum s_w(1) I_m^2}{M_{np} \omega_0^2} \frac{I_m^2}{4} \left[\left(\sum \frac{dh_{ow}}{dr_{ow}} + \sum \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} \right) + \left(\sum K_{hw} + 2 \sum \sum K_{rwn} \right) \right], \quad (2)$$

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

$$x_2 = \frac{\sum s_w(1)}{M_{np} \omega_0^2} \frac{I_m^2}{4\sqrt{(1-4q^2)+16D^2q^2}} \left[\left(\sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} + 2\sum\sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \right. \\ \left. + \left(\sum K_{vw} + 2\sum\sum K_{vwn} \right) \right] \times \cos(2\omega t + \varphi_2), \quad (3)$$

$$x_3 = \frac{\sum s_w(1)}{M_{np} \omega_0^2} \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3), \quad (4)$$

Суммарное результирующее усилие, развиваемое цилиндрическим, находится электроприводом многодисковым и из второго закона Ньютона, как произведение приведенной массы на ускорение точки приведения системы

$$F_\Sigma = M_{np} \left(\frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{d^2 x_3}{dt^2} \right), \quad (5)$$

Определяется общая формула для расчета приводной характеристики электропривода многодискового

$$F_\Sigma = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sum s_w(1) \left\{ \frac{4l^2 = \left[\left(\sum \frac{dl_{0w}}{dr_{0w}} + 2\sum\sum \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left(\sum K_{lw} + 2\sum\sum K_{mwn} \right) \right]}{\sqrt{(1-4q^2)+16D^2q^2}} \cos(2\omega t + \varphi_3) - \right. \\ \left. - \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3) \right\}$$

Из полученного выражения видно, что электродинамическое усилие приводной электропроводящей пружины представляет собой сумму сил с частотой питающего источника и с двойной частотой источника. Электропривод многодисковый пружинным вторичным элементом представляет интерес с точки зрения генератора низкочастотных колебаний, поэтому необходимо, чтобы $F_\Sigma = (2\omega) \ll F_{\Sigma M}(\omega)$, т.е. исключить нежелательные вибрации с двойной частотой. Этого можно добиться, исключительно варьируя геометрическими размерами пружины - шагом витка, поперечными размерами, а также увеличением индукции первичного магнитного поля. В случае необходимости генератора двойной частоты просто необходимо исключить постоянное магнитное поле. Из этих соображений усилие среза льда, развиваемое приводным пружинным элементом, находится в общем случае из соотношения

$$F_{\Sigma M} = I_m l B_0 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{\sum u_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

Суммарное усилие резания льда с учетом действия всех дисков

$$F_{\Sigma M} = I_m l B_0 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{\sum u_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

Необходимо рассмотреть предельные частные случаи.

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

1. Аргумент функции Бесселя бесконечно малая величина. В этом случае, соотношение запишется в виде

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m l B_0 \frac{R_1 R_0}{R_0^2 - \gamma_0^2 R_1^2} \sum_{w=1}^N \frac{\gamma_w^2 - \gamma_0^2}{\gamma_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (8)$$

или переходя к геометрическим размерам

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m l B_0 \frac{R_0}{R_0^2 - r_0^2} \sum_{w=1}^N \frac{r_w^2 - r_0^2}{r_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (9)$$

2. Аргумент функции Бесселя бесконечно большая величина. Действующее усилие пружинного привода в этом случае:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m l B_0 \frac{\sum \left[\sin \left(l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4} \right) - A \cos \left(l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4} \right) \right]}{\sin \left(\frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4} \right) - A \cos \left(\frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4} \right)} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (10)$$

и в случае двухвитковой пружинной машины с бесконечно большими геометрическими размерами

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m l B_0 \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (11)$$

что совпадает с формулой, полученной ранее для расчета классических электрических машин в режиме вибрационных колебаний с линейными геометрическими размерами [4]

Мощность, потребляемая электроприводом многодисковым

$$P_1 = I \times U, \quad (12)$$

где I – ток, потребляемый цепью ЭПМДК и определяется как [6].

$$I = \frac{U_{вх}}{\sqrt{R^2 + w^2 L_w^2}}, \quad (13)$$

где R – активное сопротивление цилиндрической пружины; $U_{вх}$ – напряжение источника питания.

Индуктивность цилиндрической приводной пружины определяется как

$$L_w = \mu_0 r_w C_w \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - K_w^2 \sin^2 \varphi}} - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - K_w^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \right), \quad (14)$$

где параметр (модуль) интеграла [5],

$$K_w^2 \approx \frac{1}{1 + \frac{d_n^2}{16r_w^2}},$$

C_w - некоторый поправочный коэффициент.

В случае пружины с прямоугольным сечением, из условия равенства потокоцепления видимо [5]

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

$$d_n = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}, \quad (15)$$

где $a \times b$ - размеры поперечного сечения материала пружины.

Коэффициент индуктивности находится из соотношения

$$K_{LW} = C_w \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - K_w^2 \sin^2 \varphi}} - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - K_w^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \right), \quad (16)$$

В случае вибрации пружины модуль интеграла

$$K_w = \frac{1}{1 + \frac{d_n^2}{16(r_w + s_w)^2}} \approx \frac{1}{1 + \frac{d_n^2}{16r_w^2}},$$

Мощность, передаваемая устройству

$$P_2 = \eta \cdot P_1, \quad (17)$$

где η – КПД.

В соответствии с законом Ампера

$$2\pi NBr = F_\Sigma, \quad (18)$$

где N – число витков пружины, r – радиус витка пружины, B – индукция в пружине, I – ток в витках пружинного привода,

магнитная индукция, создаваемая в пружине, определяется выражением

$$B = \frac{F_\Sigma}{2\pi Nr}, \quad (19)$$

а сила тока в витках механической пружины

$$I = \frac{U_{\text{ex}}}{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}, \quad (20)$$

где R – активное сопротивление цилиндрической пружины, U_{ex} – напряжение источника питания.

При подстановке (13) в (14)

$$B = F_\Sigma \frac{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}{2\pi NU_{\text{ex}}}. \quad (21)$$

Чувствительность электропривода многодискового к толщине слоя льда

$$\beta = \frac{dB}{dt}. \quad (22)$$

Малое перемещение за один такт работы

$$kx = F_\Sigma \Rightarrow x = s = \frac{F_\Sigma}{k}, \quad (23)$$

где k – жесткость пружины

Время перемещения электропривода многодискового по воздушной линии за один такт

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

$$S = \frac{at^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2S}{a}}, \quad (24)$$

из $F_{\Sigma} = (M + m)a$ ускорение перемещения

$$a = \frac{F_{\Sigma}}{M + m} \quad (25)$$

где M – масса установки, m – масса инерционного элемента.

Время работы пружинного привода

$$t = \sqrt{\frac{2(M + m)}{k}}, \quad (26)$$

а скорость движения по ВЛ

$$v = F_{\Sigma} \sqrt{\frac{1}{k(M + m)}}. \quad (27)$$

Экспериментальные исследования

Исследована механическая характеристика разработанного образца ЭПМДК с цилиндрическим пружинным (обмотка) рабочим органом. Для измерения величин усилий, развиваемых двигателем, использованы тензометрические датчики с тензометрическим усилителем 4 АНЧ-22.

Эти усилия регистрировались осциллографом. Анализ полученных результатов показал их удовлетворительное совпадение с расчетными данными. Расхождение составляет не более 16% (рисунок 2), при относительной погрешности не более 7%.

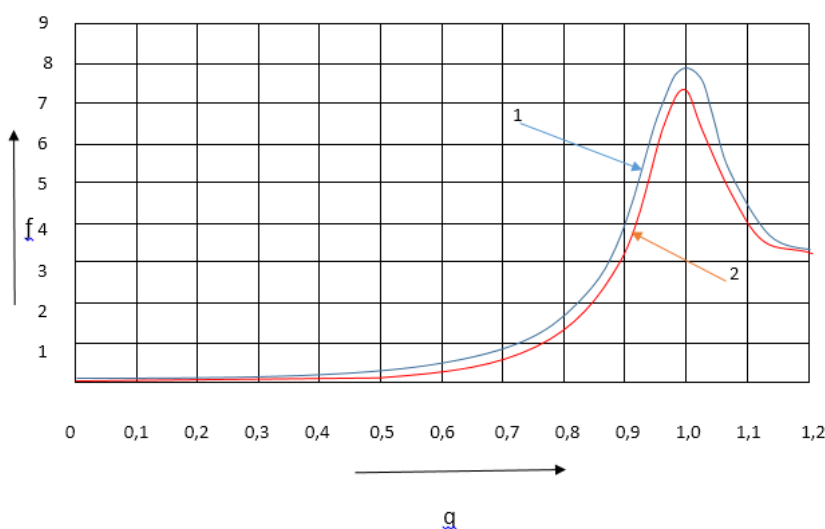


Рис. 2. Механическая характеристика физической модели ЭПМДК:

1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая.

Базовая сила: $F_1 = 14 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$; частота: $f = 50 \text{ Гц}$

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Таким образом, в работе составлена обобщенная математическая модель электропривода многодискового (ЭПМДК) с аналитическим решением, рассмотрены частные случаи полученного решения. Полученные соотношения позволяют проектировать электропривод многодисковый с необходимыми технико-экономическими показателями с соответствующими геометрическими размерами и материалами комплектующих изделий.

Заключение:

1. Разработана оригинальная многофункциональная конструкция ЭПМДК. Создана ее математическая модель с аналитическими решениями и экспериментальным подтверждением полученных теоретических положений.

2. Получены выражения для определения силовых приводных характеристик в зависимости от геометрических размеров и магнитных характеристик, исходные положения позволяют их увязать с геологическим расположением объекта, температурными и ветровыми метеоусловиями.

3. Разработанная конструкция ЭПМДК экономична, технологична и проста в эксплуатации относительно известных электромеханических устройств для борьбы с гололедом ВЛ.

Библиографический список

1. Янгиров И.Ф. Многосекционная пружинная электромеханическая муфта (МСЭМ) / И.Ф. Янгиров, Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов, Л.Ф. Зиялtdинова // М.: Технология машиностроения. – 2017. – №3. – С.22-25.

2. Янгиров И.Ф. Электромеханические преобразователи. – М.: Машиностроитель. – 2005 – №8. – С.14-15.

3. Исмагилов Ф.Р. Электропривод пружинный для борьбы с гололедом воздушных линий // Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов, Х.Х. Каланов / Челябинск. Вестник ЮУрГУ. «Энергетика». – 2017. – Т.17. – №2. – С. 29-33.

4. Вольдек А.И. Индуктивные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия. – 1970.

5. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров индуктивности – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 192с.

6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Высшая школа. – 1978. – 528 с.

7. Янгиров И.Ф. Аналитическое выражение индуктивности и взаимоиндуктивности спиральных электропроводящих пружин / И.Ф. Янгиров // Приборы и системы. – 2004. – №1. – С. 38 – 41.

© Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Кабиров А.М.,
Салихов Р.М., Семенов Я.О., 2024

УДК 620.9

4.6. Способ борьбы с гололедом воздушных линий СВЧ магнитокумулятивным генератором (СМКГ)

Янгиров И.Ф., Кабиров А.М., Халиков А.Р., Федосов Е.М., Андреев А.К.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)»

Аннотация. В работе приводится обзор плавки гололёда переменным током как наиболее простой и доступный способ активного метода борьбы с гололёдом в электрических сетях. Причины возникновения гололеда по изменению климатических условий в различных частях земной полушарий, в частности в России. Приводится сравнительный анализ гололеда переменным и постоянным током, их достоинства и недостатки, назначение грозозащиты в воздушных линиях и их поведение во время гололеда. Приводится новый способ борьбы с гололедом с использованием СВЧ магнитокумулятивным генератором. Описывается схема самого генератора, математическая модель с соответствующими выводами. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований. Делаются соответственно выводы по полученным положениям в статье.

Ключевые слова: гололед, воздушная линия, постоянный ток, переменный ток, магнитокумулятивный генератор, синфазные колебания, изоляция.

Введение

В последнее годы наблюдается неуклонный рост средней температуры атмосферы Земли. Это ведёт к потеплению климата в Северном полушарии и, в частности, в России. Общее потепление климата, в свою очередь, приводит и к потеплению атмосферы в холодный сезон, что вызывает увеличение осадков в виде дождя, мокрого снега и к появлению наледи. Последнее особо ощутимо на проводах воздушных линий электропередач.

Образование гололёда на проводах воздушных линий может привести к тяжёлым последствиям. Можно вспомнить Сочинские события 2001, 2003 и 2007 годов. А также события в Подмосковье в декабре 2010 года.

Причем московские события показали, что гололёд начал появляться там, где раньше не наблюдался. К примеру, центральная часть России, не подвергалась ранее гололёдно-ветровой атаке. Соответственно, и воздушные линии строились в этом регионе без учёта возможных гололёдных нагрузок. Это выражается тем, что в проекты существующих воздушных линий не закладывались пассивные (усиленная конструкция опор) и активные (плавка гололёда на проводах и грозотросах) противогололёдные мероприятия. В дальнейшем с высокой долей вероятности можно прогнозировать, что подобные события будут повторяться. И не только в центральном регионе России, но и в других регионах, ранее не подверженных этому явлению.

В связи с этим уже сейчас необходимо разрабатывать соответствующие мероприятия для предотвращения разрушительных последствий гололёдно-

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ветровых нагрузок на провода воздушных линий. К примеру, на вновь проектируемых ВЛ возможно предусматривать проектом опоры, конструкция которых рассчитана на длительное воздействие гололёдно-ветровых нагрузок.

На существующих ВЛ возможно организовать плавку проводов и грозозащитных тросов постоянным и переменным токами. Плавка постоянным током наиболее предпочтительна ввиду уменьшения потерь мощности при протекании постоянного тока по проводам и, следовательно, возможности одновременно большего охвата количества линий, которых можно подвернуть плавке. Однако осуществление плавки гололёда постоянным током является довольно затратным мероприятием. При таком способе плавки необходимо разместить на подстанции УПП и дополнительно силовой специальный трансформатор для его питания. Кроме того, потребуется соорудить шины плавки гололёда и ряд однофазных разъединителей для возможности сборки различных схем плавки («фаза – две фазы», «змейка» и т.д.). Однако при таком способе плавки мощность плавки будет значительно меньше и проплавить можно линию большой длины, поскольку при протекании постоянного тока отсутствует реактивная составляющая сопротивления провода (грозотроса).

С точки зрения экономики наименее затратным является осуществление плавки гололёда переменным током. Для организации такой плавки потребуется лишь сооружение шин плавки гололёда и установка ячейки с выключателем и разъединителем на территории ПС, с которой будет производиться плавка.

Указанное оборудование для плавки выбирается в соответствии с напряжением плавки, величина которого определяется расчётами. Кроме напряжения плавки необходимо рассчитать время плавки. Это время необходимо знать во избежание воздействия токов плавки на провода, с которых уже отпал гололёд. Излишнее воздействие токов плавки на провод приводит к высыханию смазывающего состава между алюминиевыми проволоками и стальным сердечником, истиранию алюминиевых проволок, коррозии сердечника и обрыву провода. Также необходимо рассчитать длину проплавляемого участка. Этот параметр даёт возможность определить участок воздушной линии, эффективно проплавляемый заданным током плавки, а также место установки закорачивающего разъединителя или подключения ПЗ.

В работе приводится один из способов борьбы с гололедом в ВЛ.

Предлагается оригинальная конструкция взрывомагнитного генератора, разработана математическая модель, принципиально отличающаяся от ранее созданной и практически рекомендованной [1, 2, 3, 4].

Конструкция

Основными элементами указанного генератора являются соленоиды 2 и металлический тонкостенный полый конус (лайнер) 1 с зарядом взрывчатого вещества (рис. 1). Лайнер представляет собой цилиндрическую или коническую трубу, изготовленную из высокопластичного сплава алюминия или меди. Толщина лайнера рассчитывается из условия обеспечения заданной скорости и угла приближения поверхности лайнера к соленоиду, а также из условия его

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

механической прочности. Лайнер монтируется внутри соленоида вдоль его оси. При срабатывании заряда взрывчатого вещества лайнер расширяется и совершает механическую работу по сжатию магнитного поля соленоида, при этом часть этой работы преобразуется в электромагнитную энергию. Кроме этого, расширяющийся лайнер последовательно замыкает витки соленоида, уменьшая его индуктивность и соответственно, увеличивая собственную частоту электрической цепи генератора.

Режим работы спирального магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой, в том числе и его СВЧ излучение, существенным образом зависит от закона изменения индуктивности его соленоида.

В последнее время большое внимание стало уделяться исследованию физических процессов, протекающих в спиральном генераторе, работающем на емкостную нагрузку. Конструктивно конденсатор может быть выполнен в виде одного элемента или представляет собой конденсаторную батарею.

При этом важную роль в процессе функционирования магнитокумулятивного генератора играет закон изменения индуктивности. В частности, в соответствии с этим законом будет реализовываться апериодический или колебательный характер функции тока от времени.

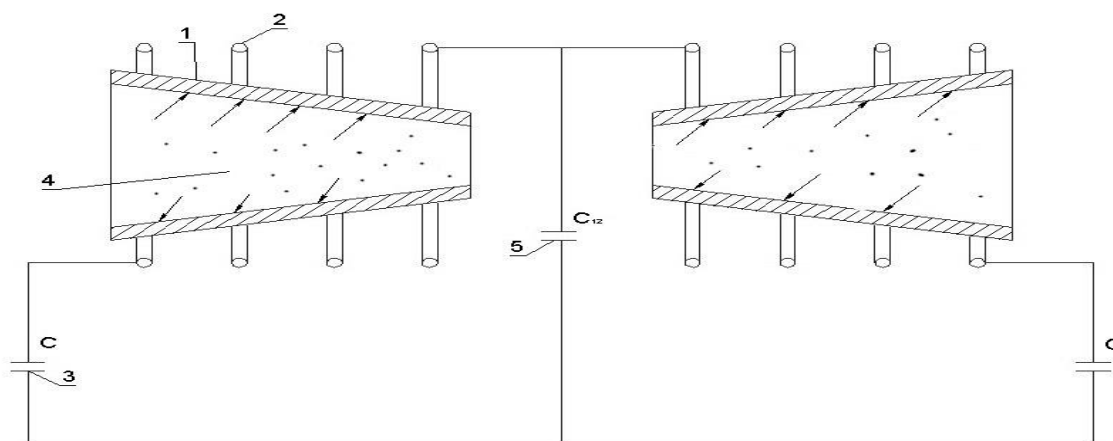


Рис. 1. Схема СВЧ-двухспирального магнитокумулятивного генератора (СМКГ)

Изменение индуктивности определяется шагом намотки соленоида вдоль его оси, углом и скоростью приближения поверхности лайнера к образующей соленоида.

На характер функций тока от времени существенно сказывается суммарное активное сопротивление магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой. В работе [5] была теоретически и экспериментально показана возможность формирования сверхвысокочастотного радиоизлучения при функционировании спирального магнитокумулятивного генератора с емкостной нагрузкой. При этом, как было показано, интенсивность и спектральные характеристики радиочастотного излучения также существенно зависят от функции изменения индуктивности соленоида [3].

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Математическое моделирование

В ходе выполнения работы использованы методы теории электрических цепей, магнитного поля, элементы математического анализа и теория электрических колебательных процессов (биения, резонанса и т.д.) в сложных контурах. В результате получено соотношение, определяющее максимальное значение частоты биений между двумя электрическими контурами, связанными слабой емкостной связью, дающие возможность проведения расчетов, необходимых при создании магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ излучением и при его регулировании [2].

При разработке приведенной в статье математической модели, использованы ранние работы авторов [2, 5] по спиральным преобразователям.

Колебательные процессы, протекающие в отдельных частях сложных систем, как правило, взаимосвязаны. В связи с этим представляет интерес генерация колебательных процессов в этих системах на достаточную простом и наглядном примере. В качестве такого примера рассматривается колебательный процесс, в двух электрических контурах со слабой емкостной связью C_{12} , одинаковыми емкостями C ($Cm \ll C_{12}$) и индуктивностями L (рис. 2). Аналогом этого процесса является колебательный процесс в механической системе, состоящей из двух математических маятников одинаковой длины, связанных пружиной с небольшим коэффициентом жесткости [4].

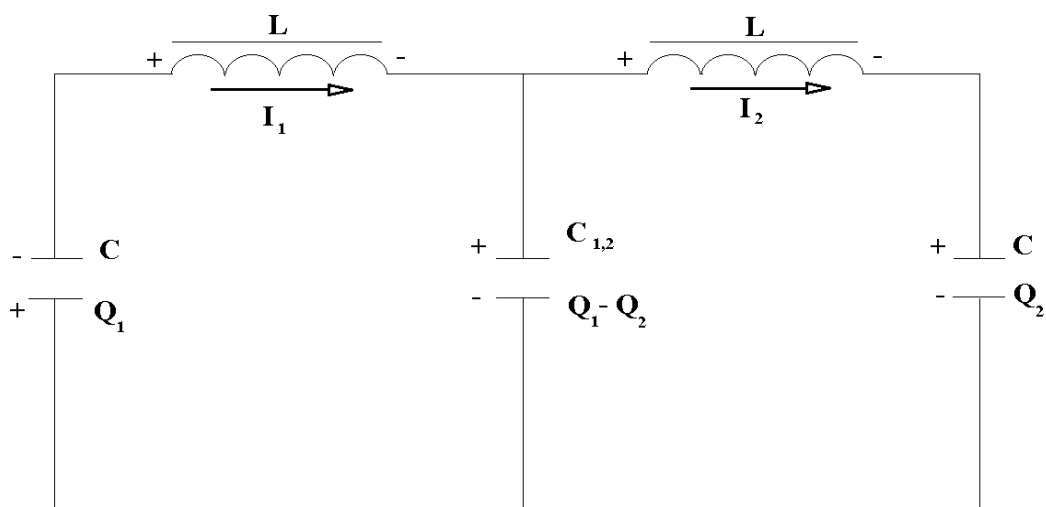


Рис. 2. Схема замещения генератора (СМКГ), состоящего из двух контуров: 1-го (в левой части рисунка) и 2-го (в правой)

В соответствии со 2-м законом Кирхгофа для 1-го и 2-го электрических контуров справедливы соотношения [6]

$$L \frac{dI_1}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0; \quad (1)$$

и

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

$$L \frac{dI_2}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0. \quad (2)$$

Поскольку $I_1 = \frac{dQ_1}{dt}$ и $I_2 = \frac{dQ_2}{dt}$, уравнения (1) и (2) можно представить в виде

$$L \frac{d^2 Q_1}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}; \quad (3)$$

$$L \frac{d^2 Q_2}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}. \quad (4)$$

После преобразования в соответствии с [4] уравнения (3) и (4) приобретают вид

$$L \frac{d^2(Q_1 + Q_2)}{dt^2} = -\frac{Q_1 + Q_2}{C_{12}}; \quad (5)$$

$$L \frac{d^2(Q_1 - Q_2)}{dt^2} = -\left(\frac{1}{C} + \frac{2}{C_{12}}\right)(Q_1 - Q_2). \quad (6)$$

Результатом решения уравнений (5) и (6) являются выражения [2]

$$Q_1 + Q_2 = (Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t \quad (7)$$

и

$$Q_1 - Q_2 = (Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t, \quad (8)$$

где Q_{10} и Q_{20} – заряды для $t=0$ на емкостях 1-го и 2-го контуров соответственно. Частота $\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ соответствует частоте свободных электрических колебаний в контуре, состоящем из емкости C и индуктивности L , причем

$$\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}} < \omega^- = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_{12}} \right)} \quad (9)$$

Анализ уравнений (7) и (8) показывает, что как сумма $Q_1 + Q_2$, так и разность $Q_1 - Q_2$ зарядов на емкостях C 1-го и 2-го контуров изменяются во времени по закону косинуса с постоянными амплитудами $Q_{10} + Q_{20}$ и $Q_{10} - Q_{20}$ соответственно.

Арифметическое сложение и вычитание уравнений (7) и (8) позволяет установить характер изменения во времени зарядов на емкостях C_1 и C_2 , 1-го и 2-го контуров. При этом

$$Q_1 = \frac{1}{2} (Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t + \frac{1}{2} (Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t \quad (10)$$

и

$$Q_2 = \frac{1}{2} (Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t - \frac{1}{2} (Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t \quad (11)$$

Из уравнения (10) и (11) следует, что в случае равенства начальных зарядов Q_{10} и Q_{20} на емкостях C 1-го и 2-го контуров текут одинаково направленные

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

точки I_1 и I_2 с постоянной амплитудой $\frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20})$ и угловой частотой ω^+ , и в обоих контурах происходят синфазные колебания величины заряда Q . Если же заряды Q_{10} и Q_{20} в начальный момент времени одинаковы по величине, но имеют противоположный знак, т.е. $Q_{10} = -Q_{20}$, то 1-м и 2-м контурах происходят антифазные колебания величин зарядов Q_1 и Q_2 , одинаковы по величине, но противоположны по знаку.

Как видно из вышесказанного, при синфазных и антифазных колебаниях амплитудные значения величин зарядов на емкостях C остаются постоянными, что соответствует нормальным модам колебаний системы связанных осцилляторов.

Произвольный колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой емкостной связью можно рассматривать как суперпозицию двух нормальных мод колебаний. Данное утверждение может быть рассмотрено для момента времени $t=0$, когда заряд на емкости C во втором контуре равен нулю, т.е. $Q_{20} = 0$. Тогда колебания зарядов Q_1 и Q_2 на емкости C в 1-м и 2-м контурах, являющиеся нормальными модами колебаний, описываются уравнениями

$$Q_1 = \frac{1}{2}Q_{10}(\cos \omega^+ t + \cos \omega^- t) \quad (12)$$

и

$$Q_2 = \frac{1}{2}Q_{10}(\cos \omega^+ t - \cos \omega^- t) \quad (13)$$

Преобразования правых частей уравнений (12) и (13) с помощью известных тригонометрических соотношений, позволяет получить выражения

$$Q_1 = Q_{10}[\cos \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t] * \cos \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \quad (14)$$

и

$$Q_2 = Q_{10}[\sin \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t] * \sin \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \quad (15)$$

описывающие периодические колебательные процессы, протекающие с угловой частотой $\omega = \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)$ и быстро меняющейся во времени амплитудой, и известные как биения [2].

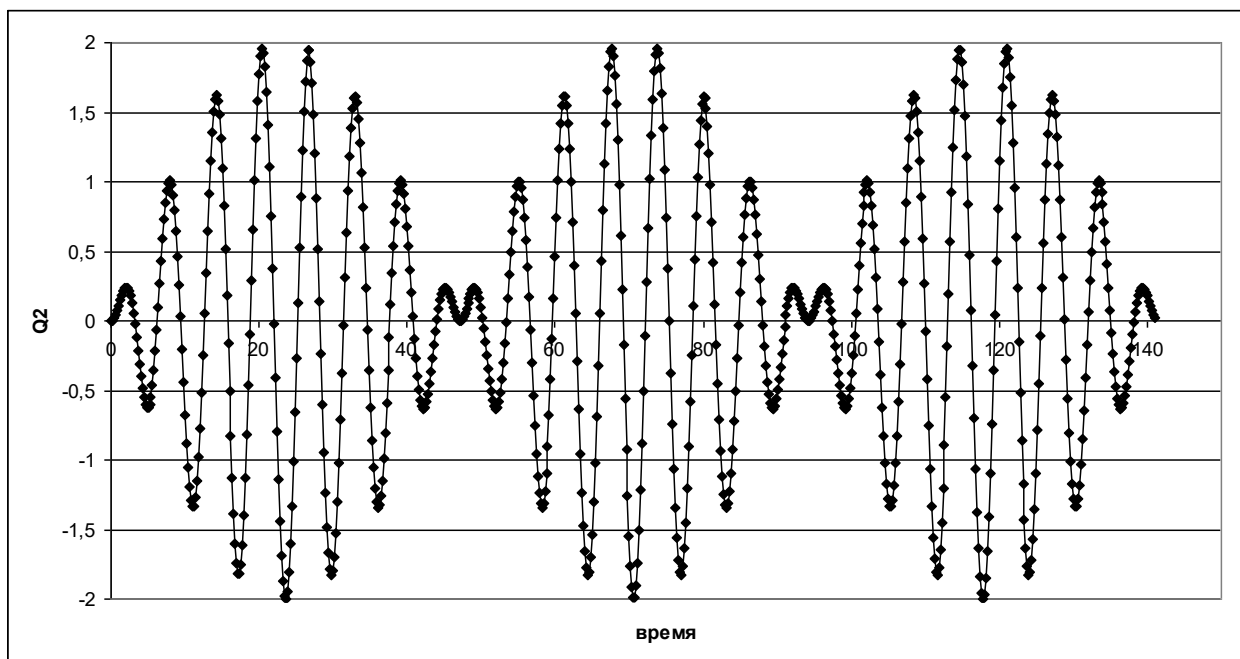


Рис. 3. Осциллограмма выходного сигнала СВЧ

Возникновение биений в рассмотренном выше случае имеет следующую природу: четная мода колебаний зарядов на емкостях C в 1-м и 2-м контурах соответствует синфазным колебаниям с угловой частотой ω^+ . Емкость C_{12} при этом не заряжена и колебания зарядов Q_1 и Q_2 аналогичны свободным колебаниям зарядов на емкости в замкнутом электрическом контуре, состоящем на емкости C и индуктивности L . Нечетная мода колебаний зарядов Q_1 и Q_2 на емкостях C в 1-м и 2-м контурах соответствует антифазным колебаниям с частотой ω^- , которая несколько больше частоты ω^+ , что объясняется заряденностью емкости C_{12} при антифазных колебаниях.

Наложение четной и нечетной мод колебаний есть фактически суперпозиция колебаний с близкими угловыми частотами, результатом чего являются биения.

В рассматриваемом случае в силу того, что в начальный момент времени $t=0$ емкость C в 2-м контуре незаряжена, синфазные и антифазные колебания происходят со сдвигом по фазе, равным $\frac{\pi}{2}$. Вследствие этого в тот момент времени, когда заряд на емкости C в 1-м контуре равен нулю, соответствующий заряд на емкости C во 2-м контуре максимален и наоборот (рис. 2).

С энергетической точки зрения колебательный процесс в двух электрических контурах, связанных слабой емкостной связью, при условии, что в момент времени $t=0$ заряд на емкости C в правом контуре равен нулю, протекает следующим образом: первоначально вся энергия сосредоточена в 1-м контуре, затем в процессе колебаний происходит перекачка энергии из 1-го контура через емкость C_{12} во 2-й контур. После того как перекачка энергии завершена, начинается обратный процесс.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Период обмена энергией между 1-м и 2-м контурами может быть найден из формулы

$$\frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t_{обм} = \pi \quad (16)$$

откуда

$$t_{обм} = \frac{2\pi}{\omega^+ - \omega^-} \quad (17)$$

Угловая частота обменного процесса, равная угловой частоте биений

$$\omega_{обм} = \frac{2\pi}{t_{обм}} = \omega^+ - \omega^- \quad (18)$$

Поскольку описанная выше математическая модель применима в случае слабой емкостной связи между электрическими контурами, то с учетом $\frac{C}{C_{12}} \ll 1$ неравенства, можно записать через следующее выражение для частоты обменного процесса

$$\begin{aligned} \omega_{обм} &= \sqrt{\frac{1}{LC}} - \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{2}{LC_{12}} \right)} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{2LC}{LC_{12}} \right)} \right) = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{2C}{C_{12}} + \left(\frac{C}{C_{12}} \right)^2} \right) = \sqrt{\frac{1}{LC}} \frac{C}{C_{12}} = \frac{C}{C_{12}} \omega \end{aligned} \quad (19)$$

Из последнего уравнения, следует что между частотой обменного процесса, т.е. угловой частотой биения в системе, состоящей из двух электрических контуров, связанных слабой емкостной связью, и угловой частотой свободных колебаний в контуре, состоящем из емкости C и индуктивности L , существует простая связь. Таким образом, изменяя величины L , C и C_{12} между двумя электрическими контурами, связанными слабой емкостной связью, можно добиться максимального значения частоты биений $\omega_{обм} = \omega$, что является важной практической задачей (в геологии, нефтегазовой промышленности, геологоразведочной работе и т.д.) [7].

Схема подключения генераторов приведена на рис. 4.

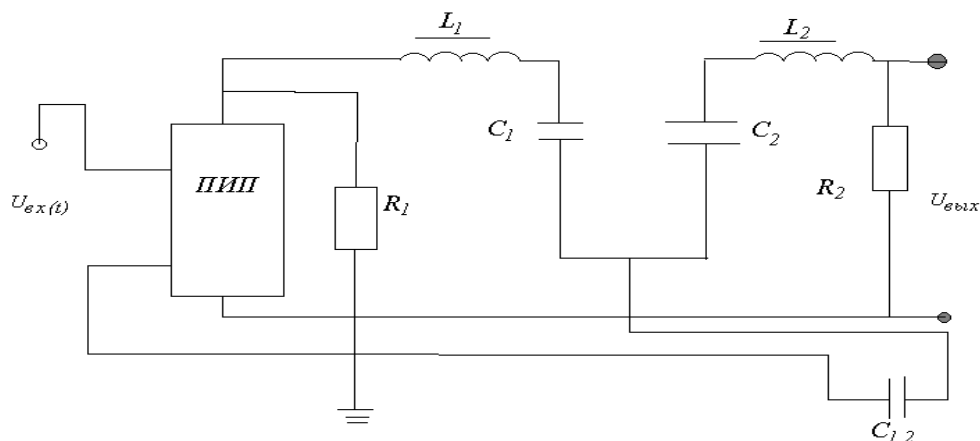


Рис. 4. Электрическая схема подключения генераторов

Экспериментальная часть

На рис. 5 приведены огибающие (сплошны линии) экспериментальных осциллограмм производных тока для двух вариантов исполнения СМКГ, работающих на емкостную нагрузку. Производна тока выбрана как величина, характеризующая процессы в генераторе и более часто измеряемая в подобных экспериментах. Производная тока и время представлены на рисунке 5 безразмерном виде.

СМКГ обоих вариантов имели одинаковую конструкцию и геометрические параметры соленоида. Оба варианта генераторов содержали соленоид диаметром 90 мм и имели по 9 витков изолированного провода. Варианты различались между собой только толщиной изоляции провода соленоида и начальным напряжением зарядки конденсатора. Фторопластовая изоляция в генераторе первого варианта (рис. 4, а) пробивалась в среднем при импульсном (время действия порядка микросекунды) напряжениях 3500 В. Фторопластовая изоляция в генераторе второго варианта (рис 4, б) пробивалась при импульсном напряжении 28000В. Начальный момент времени конденсатора генератора первого варианта был заряжен до напряжения на 16000 В, а конденсатор генератора второго варианта до напряжения 30000 В. На тех же рисунках приведены огибающие (пунктирные линии) зависимости производной тока от времени, рассчитанные по изложенной в статье методике.

Из сравнения расчетных экспериментальных огибающих видно, что предложенная математическая модель качественно правильно описывает процесс в реальном генераторе. Отличие экспериментальной огибающей осциллограммы производной тока от теоретической на конечном участке может быть объяснено наличием массивного фланца, к которому крепятся лайнер и соленоид. Наличие близко расположенного фланца способно исказить картину замыкания последних витков соленоида. При этом следует отметить, что использование математической модели, аналогичной рассмотренной в

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

настоящей статье, но не учитывающей наличие электрической изоляции проводов, дает огибающую производной тока, имеющую не более одного экстремума, что противоречит наблюдаемой в эксперименте картине. Эта особенность модели, не учитывающий наличие изоляции проводов соленоида, не может быть скомпенсирована введением эмпирических коэффициентов.

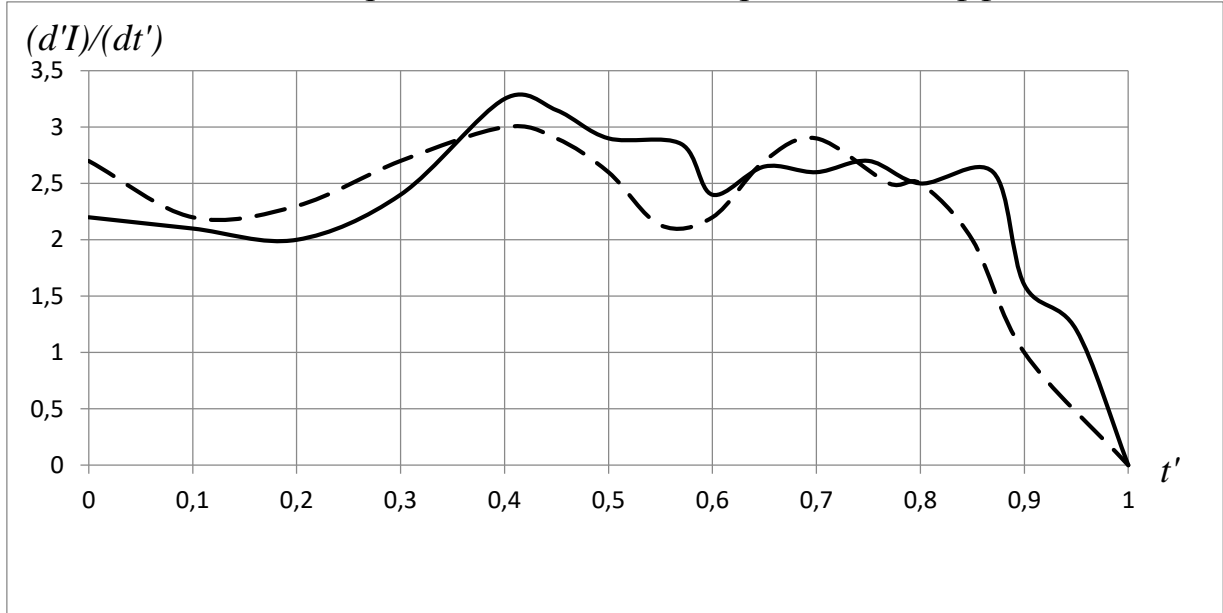


Рис. 5.1. Зависимость амплитуды производной тока от времени для генератора первого и второго вариантов:
 ----- теоретическая кривая;
 - - - - - экспериментальная кривая.

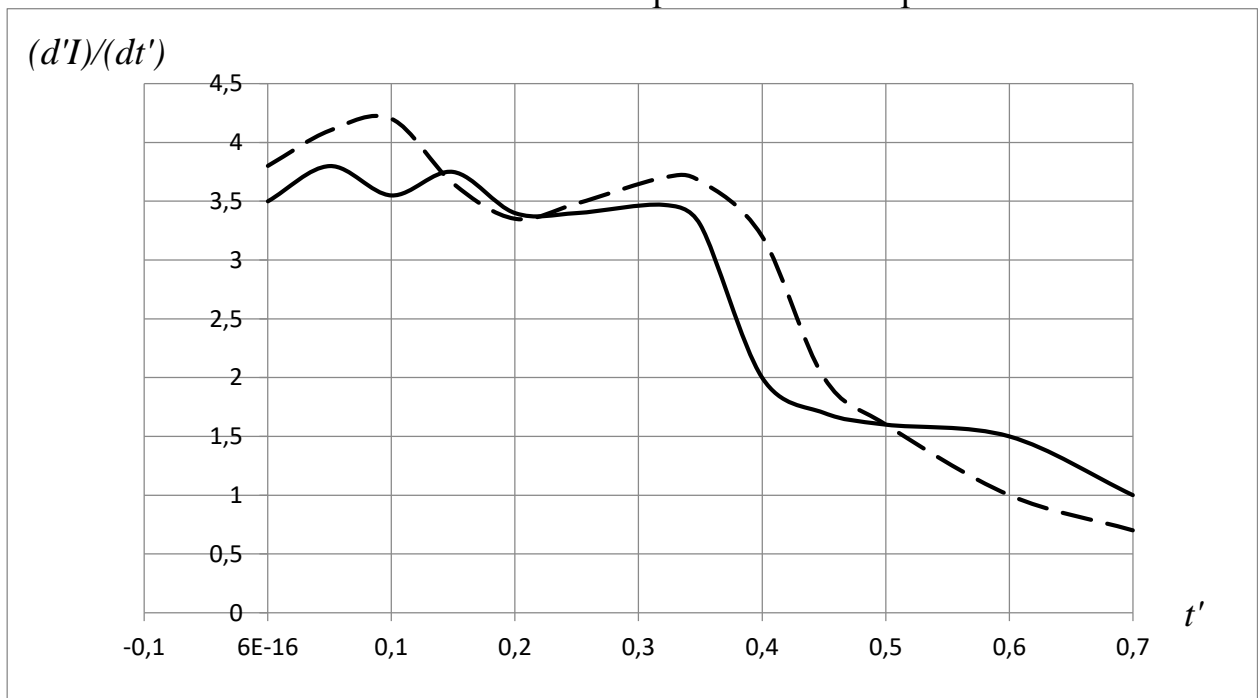


Рис. 5.2. Зависимость амплитуды производной тока от времени для генератора первого и второго вариантов:
 ----- теоретическая кривая;
 - - - - - экспериментальная кривая.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Заключение

Разработана оригинальная конструкция магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ-излучением и с возможностью его регулирования. Создана математическая модель данной конструкции, которая на основе принципиально новых концептуальных подходов, позволяет вывести аналитические зависимости, в соответствии с которыми, корректируя определенные параметры генератора, можно получить максимального значения частоты биений $\omega_{обм} = \omega$, соответствующей частоте СВЧ-излучения.

Данная разработка в перспективе может найти применение в геологии, геологоразведочной работе, исследовании Мирового океана, нефтегазовой промышленности и т.д.

Библиографический список

1. Руководящие указания по плавке гололёда на воздушных линиях электропередачи. М. ВНИИЭ. 1969.
2. Рудакова Р.М., Вавилова И.В., Голубков И.Е. Методы борьбы с гололёдом в электрических сетях энергосистем. Уфа. УГАТУ. ОАО «Башкирэнерго». 2005.
3. Левченко И.И., Засыпки А.С., Алилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах. М. МЭИ. 2007.
4. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередач.
5. Янгиров И.Ф. Датчик перемещений и ускорений. – М.: Изобретатели машиностроению. – 2002. – №1. – С.1.
6. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Электромеханический преобразователь со спиральной вторичной системой. – М.: Электротехника. – 1997. – № 4. – С. 40–43.
7. Янгиров И.Ф. Двухспиральный магнитокумулятивный генератор с улучшенными характеристиками. / И.Ф. Янгиров // XII Международная научно-практическая конференция «Современное состояние естественных и технических наук» – г. Москва. – 2013. // «Естественные и технические науки» и изд. «Спутник+». – С. 68-69.
8. Патент на полезную модель 201511270507. Россия МПК H02 N11/00/ Оpubл.в 27.22.04.2015. Бюл.№ 33. «Электромагнитный магнитокумулятивный генератор. Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов, Т.А. Волкова.
9. Третьяков Д.В. Влияние изоляции проводов спирального магнитокумулятивного генератора на его функционирование. – М.: Электричество. – 2001. – №6. – С.49-55.
10. Попов В.П. Основы теорий цепей. – М.: Высшая школа, 1985. – 495с.
11. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом. – М.: Электротехника. – 1994. – № 9. – С. 12-14.

УДК 621.313.13

4.7. Электропривод для борьбы с гололедом воздушных линий (ЭПДБГ)

Янгиров И.Ф., Кабиров А.М., Халиков А.Р., Кудрявцев Н.С.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)»

Аннотация. В работе предлагается оригинальная конструкция электропривода для борьбы с гололедом воздушных линий (ЭПДБГ). Составлена обобщенная математическая модель (ЭПДБГ) с аналитическим решением, рассмотрены частные случаи полученного решения. Исходная ЭПДБГ найдет широкое применение не только в энергетике, но и в машиностроении, станкостроении, электромашиностроении и т.д.

Ключевые слова: пружина, секции, индуктивность, математическая модель

Введение

Воздушными называются линии, предназначенные для передачи и распределения электроэнергии по проводам, расположенными на открытом воздухе и поддерживаемыми с помощью опор и изоляторов. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи сооружаются и эксплуатируются в самых разнообразных климатических условиях и географических районах, подвержены атмосферному воздействию (ветер, гололед, дождь, изменение температуры). На работу конструктивной части ВЛ оказывают воздействие механические нагрузки от собственного веса проводов и тросов, от гололёдоизморозевых образований на проводах, тросах и опорах, от давления ветра, а также из-за изменений температуры воздуха. Из-за воздействия ветра возникает вибрация проводов (колебания с высокой частотой и незначительной амплитудой), а также пляска проводов (колебания с малой частотой и большой амплитудой). Указанные выше механические нагрузки, вибрации и пляска проводов могут вызвать многократные перегибы проволок проводов и тросов, излом, обрыв проводов, что может привести к пробое или перекрытию изоляции.

В работе рассматривается один из вариантов борьбы с гололедом воздушных линии в виде использования нового оригинального электромеханического устройства, т.е. пружинного электропривода. Эта проблема является актуальной проблемой в современной энергетике, что связано с проблемой создания таких устройств, разработкой их теории, методики инженерного расчета и соответственно созданием программы для оптимизации.

Решение задачи

Электропружинный двигатель содержит полый корпус 1, внутри которого имеется ось 5 по всей длине корпуса. На ось свободно одето инерционное кольцо

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

4 с возможностью перемещения вдоль нее, а также электропроводящая цилиндрическая пружина 3, которая одним концом жестко закреплена на головке корпуса, а другим связана с кольцом. В головке корпуса установлены блоки питания и управления 2, имеющие автономное питание с целью создания импульсного напряжения. При получении импульса напряжения по электропроводящей пружине протекает ток, причем имеющий одинаковые направления в соседних ветвях. Между витками возникает притягивающая электродинамическая сила, вследствие чего пружина сжимается. Когда импульс тока равен нулю, пружина разжимается с кольцом и на корпус двигателя действует импульс реактивной движущейся силы. Далее процесс повторяется и движение двигателя стабилизируется. Конструкция проста, надежна, удобна в эксплуатации. Такой двигатель можно использовать для транспортировки диагностической аппаратуры внутри нефтегазопроводов. Двигатели такой конструкции найдут широкое применение в двигателестроении, машиностроении, приборостроении, медицине (рис.1).

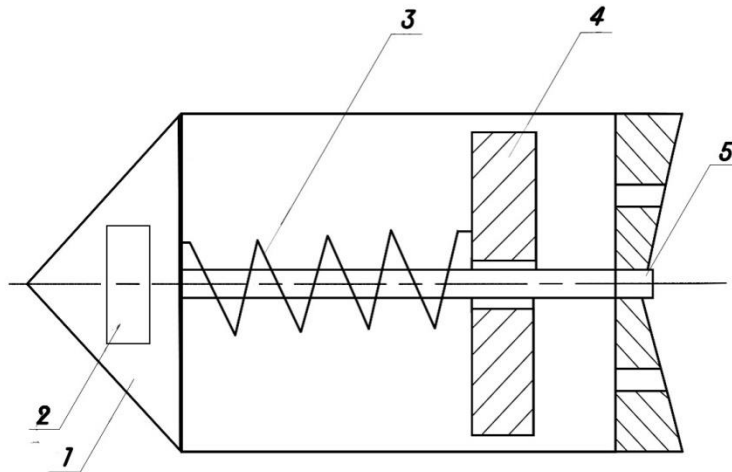


Рис. 1. Электропружинный двигатель

Математическая модель ЭПДБГ–электропружинного двигателя выглядит следующим образом [1; 2]:

$$\frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \times \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w = \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \times \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2} + 2n\xi \times \frac{\partial s_w}{\partial t} + \omega_0^2 s_w = -2\pi A_{ex} \sin \omega t \times s_w(1) +$$

$$+ \left\{ \frac{i^2}{2} \left(\left[\frac{dL_{ow}}{dL_{ow}} + 2 \sum_1^N \sum_1^N \frac{dM_{ow,n}}{dr_{ow}} \right] + \left[\sum_1^N K_{Lw} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \right] \right) + B_o il \right\} s_w,$$

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

$$\begin{aligned}
 e_w = & B_0 l_w \frac{\partial s_w}{\partial t} + iR + \frac{di}{dr} \left(\sum_1^N L_{ow} + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{ow,n} \right) + \\
 & + \frac{di}{dt} \left(\sum_1^N K_{Lw} s_w + \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} s_w \right) + \\
 & + i \left(\sum_1^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right), \\
 iR + \frac{di}{dr} \left(\sum_1^N L_{ow} + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{ow,n} \right) + \frac{di}{dt} \left(\sum_1^N K_{Lw} s_w + \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} s_w \right) + \\
 & + i \left(\sum_1^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right), \\
 & s_w \Big|_{r_w=r_0} = 0, \\
 & s_{w=N} \Big|_{r_w=R_0} = 1,
 \end{aligned}$$

где s_w – радиальное перемещение w -го витка спирали, E – модуль упругости первого рода, μ – коэффициент Пуассона, $n\xi$ – коэффициенты трения и демпфирования, ω_0 – частота собственных колебаний, ω – частота вынужденных колебаний, r_w – радиус w -го витка, l_w – длина участка витка, B_0 – индукция магнитного поля, $s_w(1)$ – форма колебаний спирали магнитного поля, R – активное сопротивление спирали, $e(t)$ – подводимое напряжение, L_{ow} и M_{ow} – индуктивность и взаимоиндуктивность спирали в статическом состоянии [4], K_{Lw} , K_{Min} – некоторые конструктивные постоянные [7].

Система дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами представляет собой математическую модель обобщенной конструкции ЭПДБГ со спиральным вторичным элементом и позволяет исследовать характеристики ЭПДБГ.

В случае подключения электропроводящей спиральной пружины к синусоидальному источнику тока $i = I_m \sin(\omega t)$, поставленная задача упрощается, и выкладки становятся более наглядными. При этом уравнение колебания точки приведения системы будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} + 2n\xi\dot{x} + \omega_0^2 x = \\
 = \sum s_w(1) \left\{ \frac{I_m^2}{2} \left[\left(\sum \frac{dL_{ow}}{dr_{ow}} + 2 \sum \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \left(\sum K_{Lw} + 2 \sum \sum K_{Mw,n} \right) \right] \sin^2 \omega t + B_0 I_m l \sin \omega t \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Решение полученного уравнения находится как сумма решений вида

$$x_1 = \frac{\Sigma s_w(1)I_m^2}{4M_{np}\omega_0^2} \left[\left(\Sigma \frac{dh_{0w}}{dr_{0w}} + 2\Sigma\Sigma \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left(\Sigma K_{lw} + 2\Sigma\Sigma K_{rwn} \right) \right], \quad (2)$$

$$x_2 = \frac{\Sigma s_w(1)I_m^2}{4M_{np}\omega_0^2 \sqrt{(1-4q^2) + 16D^2q^2}} \times \left[\left(\Sigma \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} + 2\Sigma\Sigma \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left(\Sigma K_{vw} + 2\Sigma\Sigma K_{vwn} \right) \right] \cos(2\omega t + \varphi_2), \quad (3)$$

$$x_3 = \frac{\Sigma s_w(1)I_m B_0 l}{M_{np}\omega_0^2 \sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3). \quad (4)$$

Суммарное результирующее усилие, развиваемое пружинным ЭПДБГ в режиме вибродвигателя, находится из второго закона Ньютона [4], как произведение приведенной массы на ускорение точки приведения системы:

$$F_\Sigma = M_{np} \left(\frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{d^2 x_3}{dt^2} \right). \quad (5)$$

Общая формула для расчета характеристики электропружинного двигателя:

$$F_\Sigma = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \Sigma s_w(1) \left\{ \frac{4I_m^2 \left[\left(\Sigma \frac{dl_{0w}}{dr_{0w}} + 2\Sigma\Sigma \frac{dM_{0w}}{dr_{0w}} \right) + \left(\Sigma K_{lw} + 2\Sigma\Sigma K_{mwn} \right) \right]}{\sqrt{(1-4q^2) + 16D^2q^2}} \cos(2\omega t + \varphi_3) - \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2q^2}} \sin(2\omega t + \varphi_3) \right\}. \quad (6)$$

Из полученного выражения видно, что электродинамическое усилие двигателя представляет собой сумму сил с частотой питающего источника и двойной частотой источника. ЭПРД с пружинным вторичным элементом представляет также интерес как генератор низкочастотных колебаний, поэтому необходимо, чтобы выполнялось неравенство $F_\Sigma(2\omega) \ll F_{\Sigma M}(\omega)$ для исключения нежелательные вибрации с двойной частотой. Этого можно добиться исключительно варьированием геометрических размеров пружины – шага витка, поперечных размеров, а также увеличением индукции первичного магнитного поля. В случае необходимости генерации колебаний двойной частоты необходимо исключить постоянное магнитное поле. Из этих соображений, усилие, развиваемое электропружинным двигателем, находится в общем случае из соотношения:

$$F_{\Sigma M} = I_m B_0 l \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{\sum u_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Необходимо рассмотреть предельные частные случаи для режима двигателя:

1. Аргумент функции Бесселя бесконечно малая величина. В этом случае, соотношение для действующего усилия имеет вид

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{R_1 R_0}{R_0^2 - \gamma_0^2 R_1^2} \sum_{w=1}^N \frac{\gamma_w^2 - \gamma_0^2}{\gamma_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (8)$$

или переходя к геометрическим размерам

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{R_0}{R_0^2 - r_0^2} \sum_{w=1}^N \frac{r_w^2 - r_0^2}{r_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}. \quad (9)$$

2. Аргумент функции Бесселя бесконечно большая величина. Действующее усилие в этом случае:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{\sum \left[\sin\left(l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4}\right) - A \cos\left(l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4}\right) \right]}{\sin\left(\frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4}\right) - A \cos\left(\frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4}\right)} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (10)$$

и для двухвитковой спиральной машины с бесконечно большими геометрическими размерами:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 l \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (11)$$

что совпадает с формулой, полученной ранее для расчета классических электрических машин в режиме вибрационных колебаний с линейными геометрическими размерами [4].

В соответствии с законом Ампера [5]:

$$2\pi INBr = F_{\Sigma}, \quad (12)$$

где N – число витков спирали, r – радиус витка спирали, B – индукция в спирали, I – ток в витках спирали;

магнитная индукция, создаваемая в спирали, определяется выражением:

$$B = \frac{F_{\Sigma}}{2\pi INr}, \quad (13)$$

а сила тока в витках спирали

$$I = \frac{U_{\text{ex}}}{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}, \quad (14)$$

где R – активное сопротивление цилиндрической пружины, U_{ex} – напряжение источника питания.

При подстановке (14) в (13):

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

$$B = F_{\Sigma} \frac{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}{2\pi N U_{ex}}. \quad (15)$$

Чувствительность ЭПДБГ:

$$\beta = \frac{dB}{dt}, \quad (16)$$

т.е. ЭПРД одновременно может быть и носителем дефектоскопов, и выполнять роль дефектоскопа.

Малое перемещение ЭПДБГ за один такт работы

$$kx = F_{\Sigma} \Rightarrow x = s = \frac{F_{\Sigma}}{k}, \quad (17)$$

где k – жесткость пружины.

Время перемещения ЭПРД внутри нефтегазопровода за один такт:

$$S = \frac{at^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2S}{a}}. \quad (18)$$

Из $F_{\Sigma} = (M + m)a$ ускорение перемещения:

$$a = \frac{F_{\Sigma}}{M + m}, \quad (19)$$

где M – масса установки; m – масса инерционного элемента.

Время работы пружинного привода:

$$t = \sqrt{\frac{2(M + m)}{k}}, \quad (20)$$

а скорость движения ЭПРД внутри объекта:

$$g = F_{\Sigma} \sqrt{\frac{1}{k(M + m)}}. \quad (21)$$

Таким образом, получены все необходимые соотношения для проектирования ЭПДБГ по техническим требованиям испытываемого объекта.

Экспериментальные исследования

Исследована механическая характеристика разработанного образца ЭПДБГ с цилиндрическим пружинным (обмотка) рабочим органом. Для измерения величин усилий, развиваемых двигателем, использованы тензометрические датчики с тензометрическим усилителем 4 АНЧ-22.

Эти усилия регистрировались осциллографом. Анализ полученных результатов показал их удовлетворительное совпадение с расчетными данными. Расхождение составляет не более 16% (рисунок 2), при относительной погрешности не более 7%.

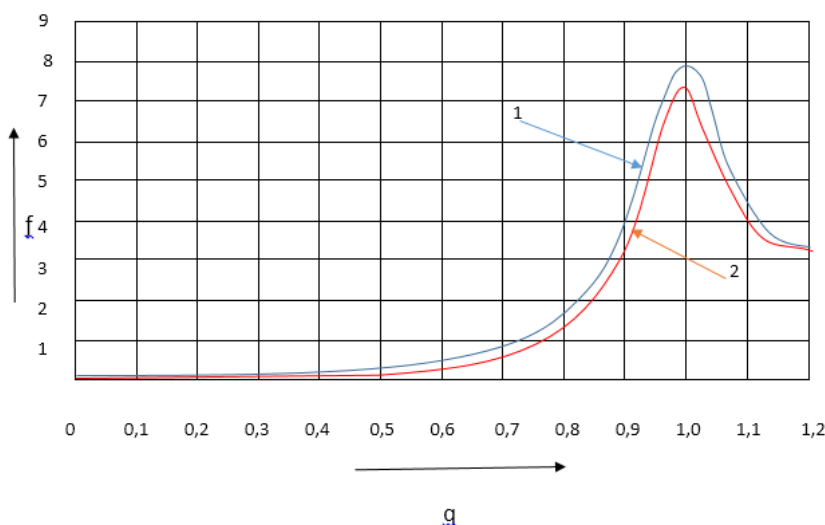


Рис. 2. Механическая характеристика физической модели ЭПДБГ:

1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая.

Базовая сила: $F_1 = 14 \cdot 10^{-7}$ Н; частота: $f = 50$ Гц

Таким образом, в работе составлена обобщенная математическая модель электропривода многодискового (ЭПДБГ) с аналитическим решением, рассмотрены частные случаи полученного решения. Полученные соотношения позволяют проектировать электропривод многодисковый с необходимыми технико-экономическими показателями с соответствующими геометрическими размерами и материалами комплектующих изделий.

Выводы

1. Разработана оригинальная конструкция ЭПДБГ.
2. Создана математическая модель ЭПДБГ, получены выражения для определения силовых приводных характеристик и чувствительности в зависимости от геометрических размеров и магнитных характеристик.
3. Разработанная конструкция ЭПДБГ экономична, технологична и проста в эксплуатации относительно известных [6].
4. В работе использованы теория и методология проектирования пружинных преобразователей, разработанные в работе авторами [7]

Библиографический список

1. Патент РФ №2028835, Устройство для возбуждения крутильных колебаний / Хайруллин И.Х., Янгиров И.Ф., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин Т.И. // БИ№5, 20.02.95.
2. Янгиров И.Ф. Электромеханические преобразователи / И.Ф. Янгиров. – М.: Машиностроитель. – 2005. – № 8. – С.14-15.
3. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров индуктивности / М.В. Немцов. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 192 с.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

4. Янгиров И.Ф., Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р. Определение собственной частоты колебаний спиральной пружины электромеханических преобразователей / И.Ф. Янгиров, И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов. – М.: Электротехника. – 2002. – №3. – С. 58-61

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа. – 1978. – 528 с.

6. Исмагилов Ф.Р. Электропривод пружинный для борьбы с гололедом воздушных линий // Ф.Р. Исмагилов, И.Ф. Янгиров, Д.В. Максудов, Х.Х. Каланов / Челябинск. Вестник ЮУрГУ. «Энергетика». – 2017. – Т.17. – №2. – С.29-33.

7. Специальные электромеханические системы с вибрационными преобразователями: монография / Ф.Р.Исмагилов и др.] – М.: «Издательство «Инновационное машиностроение», 2021. – 470 с.

© Янгиров И.Ф., Кабиров А.М., Халиков А.Р., Кудрявцев Н.С., 2024

УДК 621.316.3

4.8. Разработка алгоритма поиска оптимального деления сети для ликвидации перегруза ЛЭП или АТ

Кабиров А.М.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)»

Аннотация. В работе предлагается разработанный алгоритм поиска оптимального деления сети для ликвидации перегрузов линий электропередачи или автотрансформаторов. Выполнены расчеты установившихся режимов Янаул-Татышлинского энергорайона Республики Башкортостан для определения возможности применения алгоритма деления сети по частичному сечению.

В ПК RastrWin применены макросы деления сети по частичному сечению и поочередное отключение отмеченных ветвей.

Ключевые слова: деление сети, частичное сечение, расчетная модель.

Введение

В практической деятельности специалисту-энергетику приходится постоянно принимать различные решения: выбирать проектный вариант системы или ее части, назначать режимы в функционирующей системе и т.д. В сложных современных системах на выбор решений влияет большое количество факторов. Одни из них поддаются количественному анализу, расчету, в результате чего появляется возможность сузить область вариантов решения; другие не имеют по тем или иным причинам достаточной теоретической ясности для количественного описания. Это создает неопределенность в выборе решений. Тем не менее, специалисты вынуждены их принимать, дополняя практический опыт, интуицию и качественный анализ задачи. При этом появляется риск

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

выбора неоптимальных решений. Чем больше факторов, не поддающихся количественному анализу, тем больше вероятность неправильных решений и их отрицательных последствий. Среди всех факторов надежность занимает особое место. Практически трудно назвать решение, при принятии которого не требовали бы знания по надежности. Возможные последствия от ненадежности становятся такими существенными, что требуется постоянно совершенствовать методы проектирования, строительства и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС), позволяющие полнее учитывать надежность и наиболее экономно расходовать выделяемые на ее обеспечения средства.[1]

В работе рассмотрен один из вариантов поиска оптимального деления сети для ликвидации перегруза линий электропередачи или автотрансформаторов.

Общее описание

Работа алгоритма основана на расчетной модели, состоящей из узлов (U) и ветвей (V).

Блок-схема алгоритма поиска оптимального деления сети при возникновении перегруза ЛЭП (АТ) приведена на рисунке 1.

Для работы алгоритма необходимо задаваемое исходное значение $I_{уст}$ – уставки по току линии электропередачи или автотрансформатора.

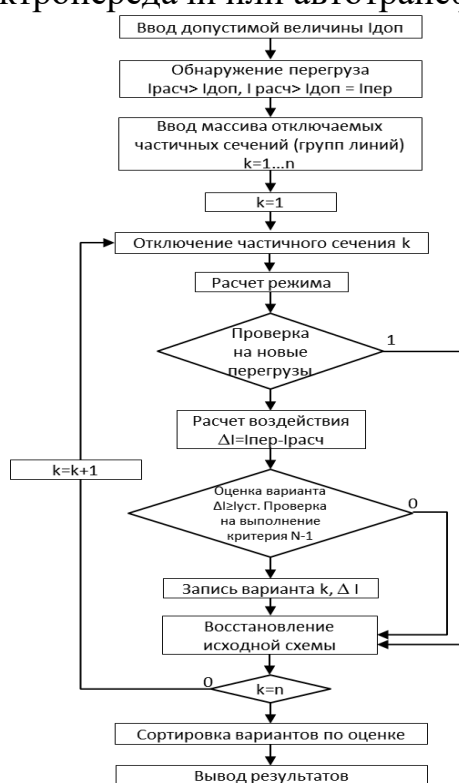


Рис. 1. Блок-схема алгоритма поиска оптимального деления сети для ликвидации перегруза ЛЭП или (и) АТ

Факт возникновения нарушения по току фиксируется сравнением расчетных токовых нагрузок сетевых элементов расчетной схемы с допустимыми. После фиксации, определения места перегруза по току вводится массив частичных сечений (групп линий, состоящих из ветвей).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

при максимуме потребления и генерации. Баланс мощности, принятый в качестве примера на 2010 год, следующий:

Потребление летом - 120, МВт

Потребление зимой - 155, МВт

Особенностью Янаул-Татышлинского энергорайона является отсутствие собственной генерации. Питание Янаул-Татышлинского энергорайона осуществляется с шин 110 кВ ПС Янаул.

Согласно Инструкции по режимам Башкирского РДУ:

В случае превышения максимально допустимого перетока по сечению Янаул-Татышлинского энергорайона необходимо поочередно выполнить следующие мероприятия:

1) потребовать у диспетчера Пермского РДУ замыкания транзита 110 кВ Печень – Константиновка;

2) ввести в работу из ремонта в наименьший срок элементы, входящие в сечение Янаул-Татышлинского энергорайона;

3) если указанных выше мер недостаточно, а специальное решение на работу электрической сети с превышением максимально допустимых перетоков отсутствует, ввести график временного отключения потребления.

При расчете установившихся режимов вывод в ремонт воздушных линий и автотрансформаторов осуществлялся согласно ремонтным режимам ВЛ-110 кВ (на примере данных 2010 года) Нефтекамских РЭС БашРЭС - Нефтекамск Филиала ООО «БашРЭС» и ремонтным режимам ВЛ 220 кВ, автотрансформаторов 500, 220 кВ.

Расчет установившихся режимов

В качестве примера возмущения, а также определения применимости алгоритма поиска оптимального места деления сети по частичному сечению, рассмотрено аварийное отключение 1 СШ 110 кВ на ПС Янаул.

Аварийное отключение 1 СШ 110 кВ на ПС Янаул.

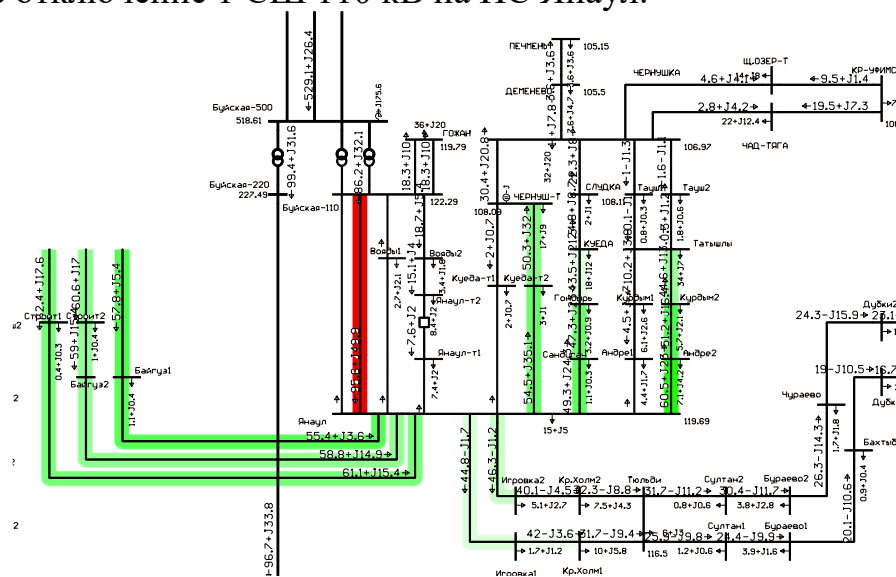


Рис. 3. Аварийное отключение 1 СШ 110 кВ на ПС Янаул

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Таблица 1. Параметры частичных сечений

N_сеч	Имя	N_нач	N_кон	Отключаемое оборудование (N_Откл. об)
18	чернуш-т-чернушка	446	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Черн. Тяга
18	слудка-чернушка	495	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Слудка
18	Тауш2-чернушка	5533	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Тат 2ц
18	Султан2-Тюльди	8482	8118	ПС Тюльды ВМ ВЛ-110 Бирск-Иц
18	Султан1-Тюльди	8483	8118	ПС Тюльды ВМ ВЛ-110 Бирск-Иц
18	Тауш1-чернушка	5532	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Тат 1ц
19	Тюльди-Кр.Холм2	8118	8424	ПС Тюльды ВМ ВЛ-110 Янаул Иц
19	слудка-чернушка	495	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Слудка
19	чернуш-т-чернушка	446	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Черн. Тяга
19	Тауш1-чернушка	5532	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Тат 1ц
19	Тауш2-чернушка	5533	449	ПС Чернушка В ВЛ-110 Тат 2ц

Далее необходимо осуществить проверку полученных вариантов деления сети по частичному сечению на выполнение критерия N-1 в данном энергорайоне. Проверка выполняется с помощью макроса «Поочередное отключение отмеченных ветвей». Макрос поочередно отключает все отмеченные ветви и заносит результаты в таблицу контролируемых параметров. Отмеченные ветви – это элементы сечения Янаул-Татышлинского энергорайона:

- ВЛ-110 кВ Янаул-Чернушка-т-3,4
- ВЛ-110 кВ Янаул-Сандугач
- ВЛ-110 кВ Янаул-Татышлы-1,2
- ВЛ-110 кВ Константиновка-Печмень
- ВЛ-110 кВ Чернушка-Чад-т
- ВЛ-110 кВ Чернушка-Щучье озеро-т.

Ремонт ВЛ 110 кВ Янаул – Буйская «Красная» с отпайкой на ПС 110 кВ Вояды. Аварийное отключение1, 2 СШ 110 кВ КГРЭС.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

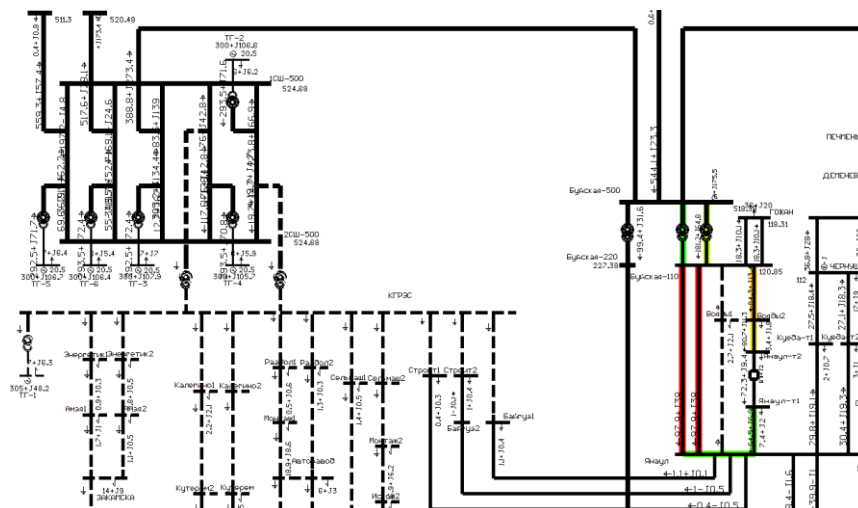


Рис. 4. Ремонт ВЛ 110 кВ Янаул – Буйская «Красная» с отпайкой на ПС 110 кВ Вояды. Аварийное отключение 1, 2 СШ 110 кВ КГРЭС.

Выполнение расчета. Расчет производится в ПК RastrWin с помощью макроса, автоматизирующего процесс поочередного отключения ветвей.

Результат выполнения макроса сведен в таблицу 2. В столбце «Токовая нагрузка» - приведены значения токовой нагрузки в процентах ранее перегруженного по току элемента (ВЛ 110 кВ Янаул – Буйская Ц, Ц) при исходном режиме (Ремонт ВЛ 110 кВ Янаул – Буйская «Красная» с отпайкой на ПС 110 кВ Вояды. Аварийное отключение 1 СШ 110 кВ КГРЭС) и при расчете с «плоского старта»- то есть расчета исходного режима с номинальных напряжений.

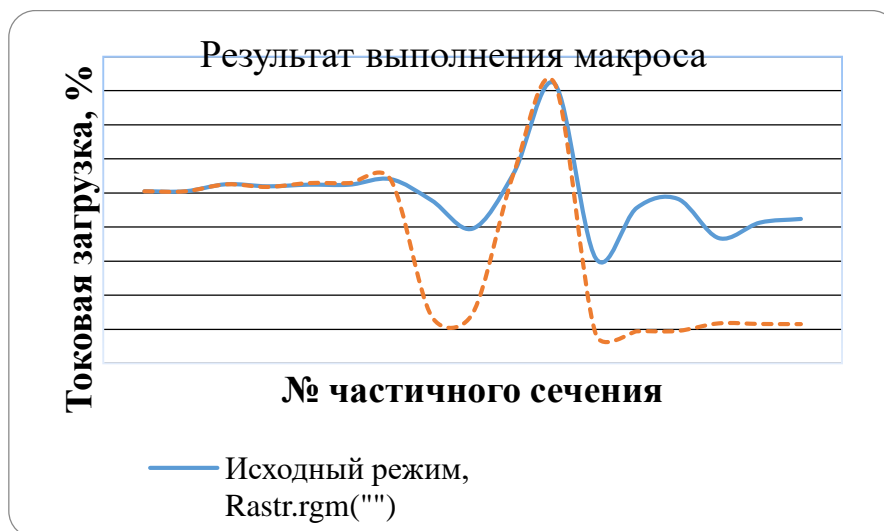


Рис. 5. Результат выполнения макроса

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Таблица 2. Результат расчета в ПК RastrWin:

№ ч.сеч.	Токовая нагрузка, %	Токовая нагрузка (плоский старт), %
1	101,01	101,01
2	101,01	101,01
3	105,13	105,13
4	103,91	103,58
5	104,85	105,85
6	104,85	105,85
7	108,11	107,91
8	95,67	27,64
9	79,08	29,33
10	111,54	111,58
11	164,03	164,23
12	61,67	17,24
13	91,28	18,87
14	96,55	19,08
15	73,52	23,52
16	82,60	23,17
17	84,77	23,09

Далее необходимо осуществить проверку полученных вариантов деления сети по частичному сечению на выполнение критерия N-1 в данном энергорайоне. Проверка выполняется с помощью макроса «Поочередное отключение отмеченных ветвей». Макрос поочередно отключает все отмеченные ветви и заносит результаты в таблицу контролируемых параметров. Отмеченные ветви – это элементы сечения Янаул-Татышлинского энергорайона:

ВЛ-110 кВ Янаул-Чернушка-т-3,4

ВЛ-110 кВ Янаул-Сандугач

ВЛ-110 кВ Янаул-Татышлы-1,2

ВЛ-110 кВ Константиновка-Печмень

ВЛ-110 кВ Чернушка-Чад-т

ВЛ-110 кВ Чернушка-Щучье озеро-т.

Результаты проверки полученных вариантов деления сети по частичному сечению на выполнение критерия N-1 сведены в таблицу 3. Из таблицы видно, что критерию N-1 соответствуют частичные сечения 15, 16, 17, 13, 8 со степенью разгрузки 26, 17, 15, 9, 4% соответственно.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Таблица 3. Результаты проверки по критерию N-1

№ част. сеч.	Токовая загрузка, %	Степень разгрузки, %	Выполнение критерия N-1
12	62	38	0
15	74	26	1
9	79	21	0
16	83	17	1
17	85	15	1
13	91	9	1
8	96	4	1

Таким образом, для режима «Ремонт ВЛ 110 кВ Янаул – Буйская «Красная» с отпайкой на ПС 110 кВ Вояды. Аварийное отключение 1, 2 СШ 110 кВ КГРЭС» по алгоритму поиска оптимального деления сети при возникновении перегруза ЛЭП наиболее оптимальным будет деление по одному из частичных сечений: 15, 16, 17, 13, 8.

Выводы

В результате проделанной работы был произведен анализ современных методов предупреждения и ликвидации аварийных режимов. Разработан и предложен новый подход к ликвидации перегруза ЛЭП или АТ путем деления сети по частичному сечению. С использованием расчетной базы программного комплекса RastrWin разработан макрос, выполняющий разработанный алгоритм.

Библиографический список

1. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем: учеб. пособие. Ч. 1. Теоретические основы / В.Г. Китушин. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2003. – 256 с.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд.
3. Оперативное управление в энергосистемах: учеб. пособие / Е.В. Калентионок, В.Т. Прокопенко. В.Т. Федин: под общ. ред. В.Т. Фебина. – Минск: Высш. шк., 2007. – 351 с.: ил.
4. Модели оптимизации развития энергосистем: учебник для электроэнергет. спец. вузов / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин / под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высш. шк., 1987. 272 с.
5. Бондаренко А.Ф., Герих В.П. О трактовке критерия надежности N-1 // «Электрические станции», 2005, № 6.
6. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлингер, Г.А. Илларионов и др.; под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, В.А. Стенников; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – С. 314. – ISBN 978-5-6043021-9-4 (в пер.).

© Кабиров А.М., 2024

СЕКЦИЯ V. ЗЕЛЕНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

**5.1. Оптимизация внутростанционных электрических сетей
ветропарка**

Голобоков С.В., Медведева С.Н.,

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Агеев В.А., Токарева О.Н.,

Мордовский национальный исследовательский университет им. Н.П. Огарева,
г. Саранск

Концепция зеленой энергетики предполагает полный отказ от углеводородного топлива и увеличение доли альтернативной энергетики в годовом объеме выработки электроэнергии. В Европе получила признание теория, согласно которой глобальное потепление вызвано антропогенной деятельностью человека и связано с выделением парниковых газов. Снижение объемов сжигания углеводородного топлива призвано остановить глобальное потепление.

Зеленая энергетика направлена на снижение углеродного следа в товарах и услугах, производимых цивилизацией. Основной упор делается на возобновляемую или альтернативную энергетику. Значительную долю генерации электрической энергии составляют ветровые и солнечные электростанции.

Второй причиной является снижение зависимости экономики от колебаний цен на нефть и природный газ на мировых рынках, сокращение добычи и повышение себестоимости переработки углеводородного топлива [1]. Мировая тенденция на сокращение запасов ископаемого топлива и повышение его цены требует поиска источников, заменяющих углеводородное топливо.

Частичная замена объемов генерации электрической и тепловой энергии на тепловых электростанциях возможна объектами распределенной генерации. К возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) относятся ветровые парки (ВЭС) [4]. Одной из ведущих компаний в сфере ветроэнергетики в России является компания «Фортум» [2]. Производство основных компонентов, лопастей и башен, организовано в Ульяновске и Таганроге на предприятиях «РОСНАНО». В условиях санкций поставки оборудования и запчастей в нашу страну прекращены полностью. Дальнейшее развитие ветроэнергетики необходимо решать на основе производственной базы и научного потенциала нашей страны.

Проектирование ВЭС выполняется с целью эффективного использования ветропотенциала в регионе. Необходимо обеспечить наиболее выгодное расположение ВЭС на территории района, снизить потери мощности и расстояние транзита. Для ВЭС необходимо оптимизировать размещение ветрогенераторов (ВГ) на местности, уменьшить длину кабелей, упростить эксплуатацию и обслуживание [4, 5]. Исходными данными является суточный график нагрузок. Разработка проекта начинается с выбора главной схемы.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Главная схема ВЭС построена по иерархическому принципу с направлением транзита мощности снизу вверх [5]. ВЭУ вырабатывают электроэнергию с номинальным напряжением 11 кВ [3]. Подключение ВЭУ к секциям шин 11 кВ главной повышающей подстанции (ГПП) выполнено линиями электропередач (ЛЭП). Повышающий трансформатор ТС1 принимает электроэнергию из распределительной сети ВЭС и выдает в магистральные сети 110 кВ.

Ключевое решение проекта – выбор ветроэнергетической установки (ВЭУ). Эффективность работы ВЭУ определяется ее техническими характеристиками [3] и климатическими условиями района [4]. Для сравнения эффективности были выбраны ВГ марки Acciona «AW80-1500», Acciona «AW 102-3000» и «ADVEN 5-135». Технические характеристики ВГ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики ВГов

Марка	Мощность	Диаметр D	Высота h	Скорость v мин,	Скорость v ном,	КПД
	МВт	м	м	м/с	м/с	
ADVEN 5-135	5	135	150	3,5	11,4	0,4
Acciona AW 100-3000	3	102	120	4	11,7	0,37
Acciona AW80-1500	1,5	85	80	3	10,5	0,45

Мощность ВЭУ зависит от погодных условий - скорости ветра и плотности воздуха, погода и мощность в течение года изменяется. Для исследования режимов работы ВГ была создана математическая модель. В Поволжье самый высокий ветропотенциал - в январе [4]. На Рис. 1 представлена диаграмма, на которой показаны зависимости выдаваемой мощности и времени работы генераторов от скорости ветра за январь месяц.

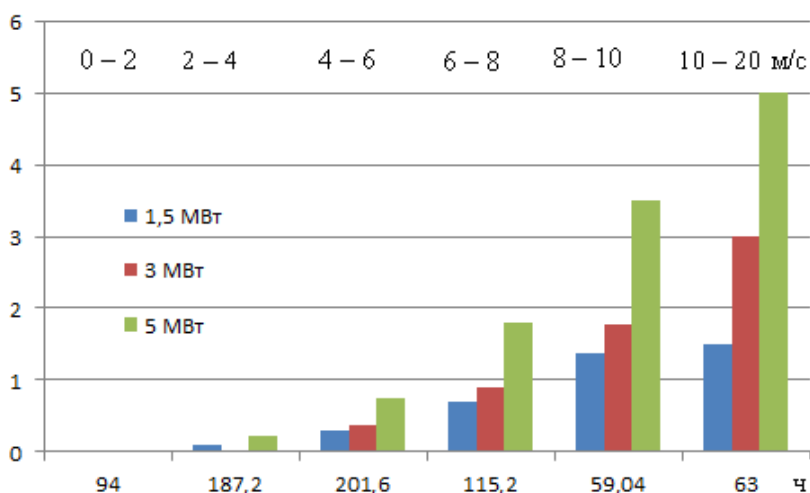


Рис. 1. Режимы работы ВГ за январь 2020 г.

Диаграмма показывает, что ВГ работают в номинальном режиме 63 часа в месяц. В течение 94 часов - штиль и 187 часов скорость ветра менее 4 м/с,

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

генерации нет. ВГ 280 часов в месяц мощность не выдает. В течение месяца ВЭУ работают 375 часов, генерируют мощность 20-60% от номинальной. Распределение мощности по дням и времени суток носит случайный характер.

Генератор Acciona AW80-1500 развивает среднемесячную мощность 467 кВт. Генератор Acciona AW 102-3000 и ADVEN 5-135 выдает 740 и 1290 кВт соответственно. Генератор Acciona AW80-1500 наиболее эффективный в условиях Поволжья. Результаты расчета за год даны в таблице 3.

С целью повышения эффективности ВЭУ проведены исследования для различных схем подключения и сечения применяемых кабельных ЛЭП разработана математическая модель. Основные задачи исследований - расчет максимальной длины линий от ВЭУ до ГПП, выбор сечения токоведущих жил кабелей и повышение мощности генерации электроэнергии всеми ВЭУ. При подключении ВЭУ на общую нагрузку ток между ними распределяется неравномерно. Величина тока, отдаваемого ВЭУ в сеть, зависит от длины и сопротивления ЛЭП. Сопротивление ЛЭП, удаленных на большое расстояние, будет больше, ток снижается, мощность падает. Мощность ветропарка будет меньше суммарной установленной для всех ВЭУ.

Таблица 2. Показатели работы ВГа Acciona AW80-1500 за год

№	Месяц	Плотность	Скорость ветра $v_{cp, мес}$	P_{cp}	Относит скорость	$W_{мес}$, тыс
		кг/м ³	м/с	кВт		кВт-ч
1	Январь	1,25	4,9	166,24	1	336,40
2	Февраль	1,25	4,8	156,27	0,979	316,22
3	Март	1,23	5	173,80	1,020	357,42
4	Апрель	1,23	4,6	135,34	0,938	278,32
5	Май	1,22	4,5	125,67	0,918	260,56
6	Июнь	1,22	4	88,26	0,816	183,00
7	Июль	1,22	3,7	69,85	0,755	144,83
8	Август	1,23	3,7	70,43	0,755	144,83
9	Сентябрь	1,23	4,5	126,70	0,918	260,56
10	Октябрь	1,25	5	176,63	1,020	357,42
11	Ноябрь	1,25	4,9	166,24	1	336,40
12	Декабрь	1,25	4,6	137,54	0,938	278,32
	Итого					3254

Выбор сечения токоведущих жил кабелей для стационарных ЛЭП выполняется по предельно допустимому длительному току по нагреву. По существующим методикам проектирования [6], в качестве расчетной берется среднесменная или среднесуточная мощность нагрузок. В режиме полной мощности ВЭУ работает 59 часов в месяц или 9%. Применение классической методики проектирования сетей приведет к завышению сечения жил кабелей, перерасходу металла и завышению стоимости проекта.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Для повышения надежности и снижения длины кабелей можно применить три схемы подключения: Радиальная, Магистральная и Кольцевая. На рис. 3 для примера представлена расчетная схема магистральной ЛЭП для подключения ВЭУ.

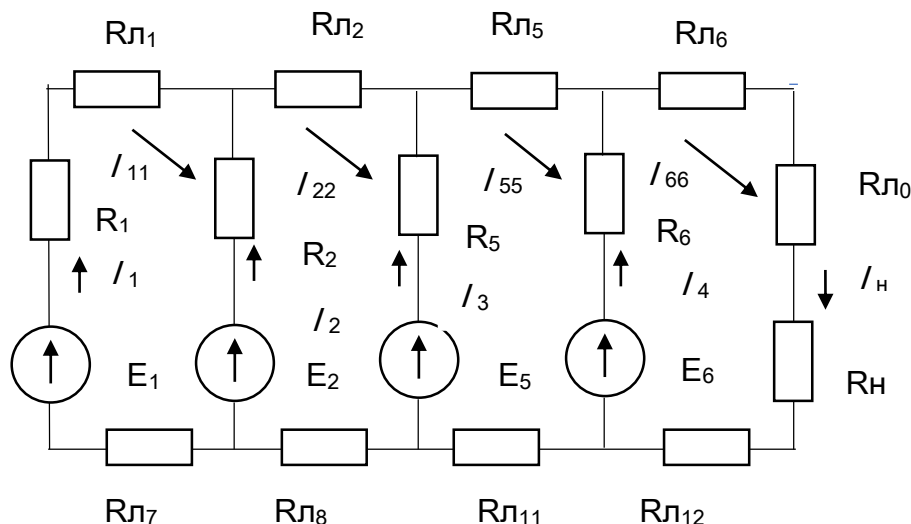


Рис. 2. Подключение ВЭУ к ГПП по магистральной схеме.

Группа из шести ВГ ЭДС $E_1 - E_6$ равной 12 кВ и внутренним сопротивлением 7 Ом подключена к магистральной шине с сопротивлением участков $R_{л1} - R_{л12}$. Кабелем с сопротивлением $R_{л0}$ магистральная шина ВЭУ подключена к ГПП. Через каждый генератор протекает ток $I_1 - I_6$, которые в сумме формируют ток нагрузки $I_н$. Расчет цепи выполнен методом контурных токов с применением программы решения системы линейных уравнений ПО MatLab. Ток в каждом элементе равен разности контурных токов.

На рис. 3 представлены графики зависимости тока от сечения проводов и длины ЛЭП для радиальной и магистральной схемы подключения ВЭУ.

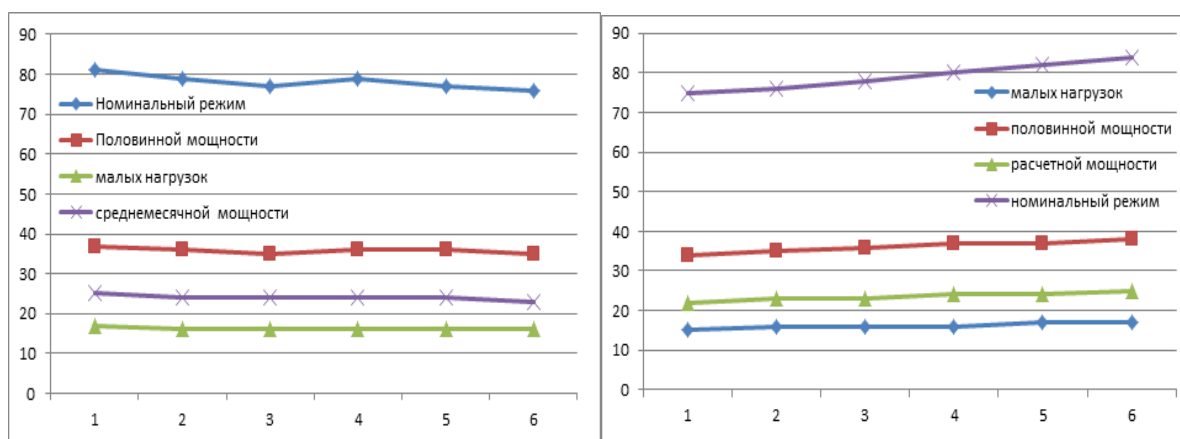


Рис. 3. Величина тока радиальной и магистральной схемы включения ВГ

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

- по радиальной схеме с увеличенным сечением кабелей
- по магистральной схеме с уменьшенным сечением кабелей.

Анализ графиков показывает, что разница тока первой и шестой ВЭУ для радиальной схемы подключения составляет 13%. Для магистральной схемы разница возрастает до 16%. Это приводит к снижению отдаваемой мощности самых удаленных ВЭУ. Ветропарк не развивает заявленную мощность. металлоемкость кабелей магистральной схемы увеличилась в 1,5 раза. Изменение сечения кабелей приводит к выравниванию тока, но полностью проблему неравномерной загрузки ВЭУ не решает.

Кольцевая схема дает снижение неравномерности тока и рост мощности. При этом ее надежность выше, но и удельный расход металла возрастает в 2 раза. Но в аварийном режиме одна ЛЭП отключается. Транзит максимальной мощности ВЭУ по одной ЛЭП невозможен. Мощность ВЭС снижается почти на 30 %.

Для оптимизации внутростанционных электрических сетей предложен критерий – удельный расход металла кабельных линий на 1 кВт среднесменной мощности, выдаваемой в нагрузку. Увеличение мощности ГПП приводит к росту длины ЛЭП 10 кВ и увеличению показателя металлоемкости. На очень длинных ЛЭП переменного тока сопротивление возрастает, а мощность ВЭУ падает. Расход металла кабельных линий будет больше, чем прирост мощности. Результаты исследования на модели для трех схем включения ВЭУ одинаковой мощности представлены в таблице 3.

Анализ данных показывает, что радиальная схема подключения имеет самую низкую металлоемкость, но высокую трудоемкость и малую выдаваемую мощность. Магистральная схема требует увеличения металлоемкости в 1,5 раза, но при этом дает прирост мощности ВЭС на 4%. Наилучшие показатели по мощности дает кольцевая схема, но удельный расход металла кабелей в 2 раза выше, чем у радиальной.

Таблица 3. Сравнительный анализ схем подключения ВЭУ

№	Схема подключения	L м	m кг	I А	ΔP кВт	P сум МВт	m / P сум кг/кВт
1	Радиальная	7840	7326	467	803	9250	0,792
2	Радиальная, увеличенного сечения.	7840	9409	469	517	9302	1,01
3	Магистральная	1840	11780	475	470	9364	1,254
4	Магистральная Уменьшенного сечения.	1840	9003	475	582	9368	0,957
5	Кольцевая	2320	14867	478	464	9487	1,57
6	Кольцевая аварийная	2320	14867	476	767	9423	1,57

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований установлено, что ВЭС теряет до 20% мощности, добиться равномерного распределения тока и выдаваемой мощности между ВГ, удаленными на разные расстояния, невозможно.

Удельный расход металла кабельных линий для радиальной схемы подключения ВЭУ равен 0,8 кг/кВт. Для магистральной и кольцевой схемы подключения этот показатель равен 1,2 и 1,57 кг/кВт соответственно. Применение кабелей с завышенным сечением незначительно снижает разброс мощности между ВЭУ, но многократно приводит к росту металлоемкости.

Максимальное расстояние, на которое можно вести транзит электрической энергии не превышает 3 км. Для ВЭУ с большой длиной ЛЭП неравномерность загрузки возрастает и эксплуатировать их с высокой эффективностью нельзя.

На основе сравнительного анализа показателей работы ветропарка с разными схемами, минимальный расход металла получен для радиальной схемы. Магистральную схему можно рекомендовать как оптимальную по сравнению с радиальной и кольцевой по надежности и стоимости кабелей.

Библиографический список

1. Пакина А.А., Горбанёв В.А. Перспективы зелёной экономики как новой парадигмы развития. – URL: <https://doi.org/10.24833/2071-8160-2019-5-68-134-155> (дата обращения 11.09.2022). - Текст: электронный.
2. Развитие ветроэнергетики в России – URL: <https://www.fortum.ru/razvitie-vetroenergetiki-v-rossii> (дата обращения 02.21.2022). - Текст: электронный
3. Каталог продукции компании Energy Wind. – URL: <https://energywind.ru/vetryanyie-elektrostantsii/promyshlennye-vetrogeneratory-dlya-biznesa> (дата обращения 18.10.2022). - Текст: электронный.
4. Климат Пензы. Под ред док-ра гергр. наук Ц.А. Швер. Л: Гидрометеоиздат. – 1988 – URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-125132333.pdf (дата обращения 12.11.2022). – Текст: электронный.
5. Повышение эффективности применения ВГов в Поволжском регионе / Агеев В.А., Голобоков С.В., Александрин А.А. – Текст: непосредственный // В сборнике: «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе». Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов. – Тюмень, 2020. С. 162-165.

Правила устройства Электроустановок. – URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html> (дата обращения 14.12.2022). – Текст: электронный.

© Голобоков С.В., Медведева С.Н., Агеев В.А., Токарева О.Н., 2024

УДК 620.92

5.2. Использование низкоскоростных индукторных электрических машин дугостаторного (секционного) типа в качестве генераторов для микроГЭС

Бутко В.П., Кузьмин Р.В.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Аннотация: В статье рассматриваются особенности использования и реализации систем электроснабжения с применением микроГЭС на основе низкоскоростных индукторных генераторов. Предложена конструкция на базе дугостаторного индукторного генератора, позволяющая преобразовывать низкопоточную энергию рек без дополнительных преобразовательных устройств. Представлены математическое описание и имитационная модель генератора.

Ключевые слова: микроГЭС, дугостаторный индукторный генератор, математическое описание, имитационная модель.

В настоящее время существует проблема обеспечения энергией потребителей, удаленных от централизованной энергосистемы. Причем население около 25% территорий России вообще не имеет доступа к электроэнергии. Данная проблема может быть решена при помощи использования различных стандартных автономных установок и устройств, основанных на возобновляемых источниках электроэнергии (ВИЭ).

Среди ВИЭ особенно выделяются гидроэнергетические установки, поскольку именно гидроэнергия имеет самый высокий показатель КПД. Создание систем генерирования электрической энергии на основе микроГЭС является актуальной задачей, поскольку территория нашей страны имеет обширную систему как крупных, так и малых водных артерий [1]. Однако большинство бассейнов рек являются низкопоточными, то есть равнинными, и использование стандартных электрических машин в качестве генераторов без редуцирования скорости водного потока не представляется возможным [2]. Для этой цели предлагается использовать специальную электрическую машину, одной из которых является дугостаторный индукторный генератор (рис.1) [3].

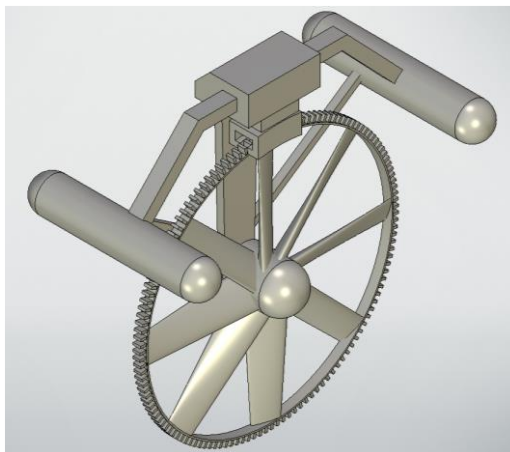


Рис. 1. МикроГЭС на основе дугостаторного индукторного генератора

Статор генератора представляет из себя усеченную дугу, которая набирается из листов электротехнической стали специальной С-образной формы (рис. 2). Обмотка возбуждения наматывается непосредственно на дугу, а на зубцы устанавливаются катушки обмотки якоря.

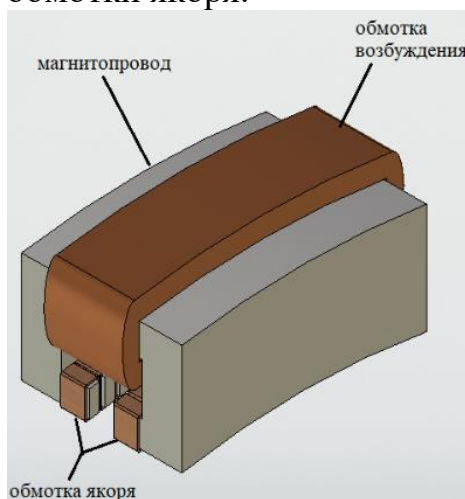


Рис. 2. Статор генератора

Ротор генератора совмещается с гидротурбиной, тем самым исключая наличие промежуточных механических преобразователей. Зубцы ротора набираются из листов стали и закрепляются на ободе гидроколеса (рис. 3).

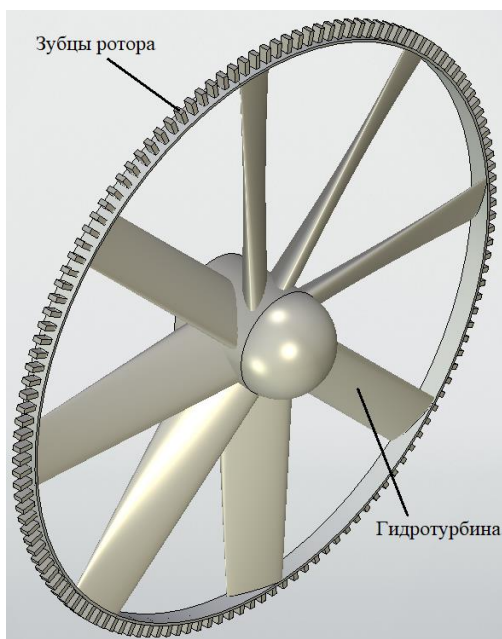


Рис. 3. Ротор генератора, совмещенный с гидротурбиной

Совмещенная конструкция и установка статора в верхнем положении позволяет осуществлять погружение ротора на 65-80% от его диаметра.

Основные процессы в генераторе можно описать при помощи математической модели, то есть системы дифференциальных уравнений [4, 5].

Уравнения напряжений обмоток статора и возбуждения в фазной системе координат записываются через потокосцепления:

$$\begin{aligned} -U_s &= \frac{d\psi_s}{dt} + r_s \cdot i_s ; \\ U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f \cdot i_f ; \end{aligned}$$

где Ψ_s, Ψ_f – потокосцепления обмоток статора и возбуждения; r_s, r_f – активные сопротивления обмоток статора и возбуждения; i_s, i_f – токи обмоток статора и возбуждения.

Отличие данной математической модели от стандартных состоит в том, что дугостаторный индукторный генератор имеет явно выраженную не симметрию магнитной системы, что дает некоторые характерные особенности при определении взаимной индуктивности обмоток статора:

$$M_{sf} = m_{of} + m_{2f} \cos 2\gamma ;$$

где m_{of} – среднее значение взаимной индуктивности обмоток; m_{2f} – амплитуда переменной составляющей взаимной индуктивности обмоток;

$$\begin{aligned} m_{of} &= \frac{L_{ad} + L_{aq}}{2} ; \\ m_{2f} &= \frac{L_{ad} - L_{aq}}{2} ; \end{aligned}$$

где L_{ad}, L_{aq} – индуктивности реакции якоря по продольной и поперечной оси, Гн.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Электромагнитный момент на валу индукторного генератора является тормозным, поэтому для его определения используется общее выражение или, подставляя потокосцепление:

$$M_{\text{ЭМ}} = p \frac{d\psi_s \cdot i_s + d\psi_f \cdot i_f}{\omega_r};$$

Электромагнитная энергия генератора определяется произведением потокосцепления и тока соответствующей обмотки:

$$W_{\text{Э}} = \frac{1}{2} (d\psi_s \cdot i_s + d\psi_f \cdot i_f);$$

Мгновенные значения токов определяются как:

$$i_s = \frac{M_{sf} \cdot \psi_f - L_f \cdot (\psi_s - \psi_m \cdot \cos\gamma)}{L_f L_s - M_{sf}^2};$$

$$i_f = \frac{M_{sf} \cdot (\psi_s - \psi_m \cdot \cos\gamma) - \psi_f \cdot L_s}{L_f L_s - M_{sf}^2}.$$

Уравнение вращающихся масс, описывающих вращение ротора имеет вид:

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = M_M - M_{\text{ЭМ}},$$

где J – момент инерции вращающихся масс установки; M_M – момент, развиваемый гидротурбиной.

В конечном виде математическая модель индукторного генератора будет представлять собой следующую систему:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = -U_s - r_s \cdot i_s;$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = -U_f - r_f \cdot i_f;$$

$$i_s = \frac{M_{sf} \cdot \psi_f - L_f \cdot (\psi_s - \psi_m \cdot \cos\gamma)}{L_f L_s - M_{sf}^2};$$

$$i_f = \frac{M_{sf} \cdot (\psi_s - \psi_m \cdot \cos\gamma) - \psi_f \cdot L_s}{L_f L_s - M_{sf}^2};$$

$$M_{\text{ЭМ}} = p \frac{i_s \cdot (-U_s - i_s \cdot r_s) + i_f \cdot (U_f - i_f \cdot r_f)}{\omega_r};$$

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = M_M - M_{\text{ЭМ}};$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_r.$$

Для исследования режимов работы системы создана имитационная модель, на основе математического описания дугостаторного индукторного генератора, в программном пакете Matlab (рис. 4).

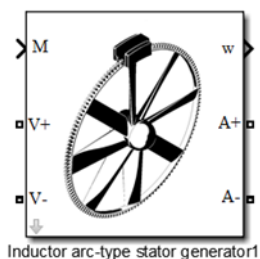


Рис. 4. Блок модели в Matlab Simulink

Кривая выходного напряжения (рис. 5) представляет собой стандартную синусоиду с частотой 50 Гц. Действующее значение напряжения составляет 230 В.

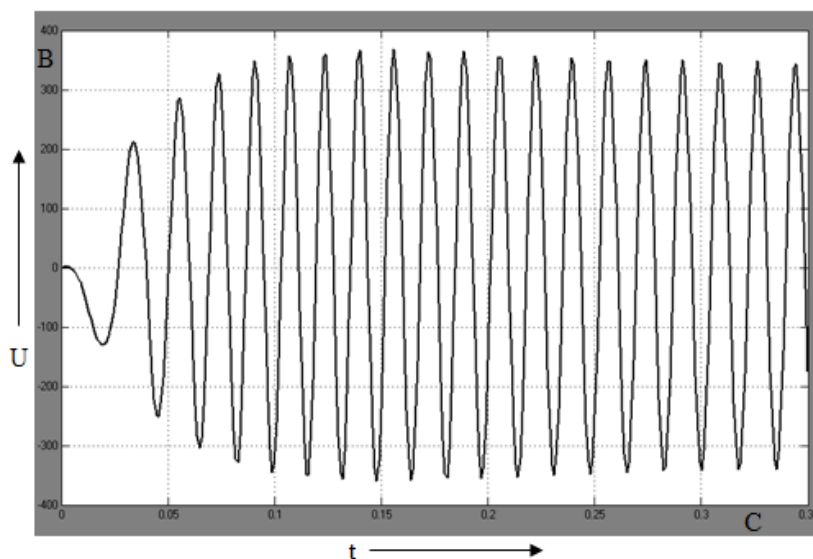


Рис. 5. Кривая выходного напряжения генератора при работе на номинальную активную нагрузку

По результатам исследований генератор предложенной конструкции позволит получать электрическую энергию в период весна-осень, с качеством электрической энергии, соответствующим ГОСТу [6, 7]. Суммарный коэффициент нечетных высших гармонических составляющих не превышает 5%, что полностью соответствует требованиям.

Использование бесплотинной микроГЭС многократно снижает затраты на установку и обслуживание, а также сводит к минимуму негативное воздействие на природу. Рассмотренная конструкция микроГЭС представляет генератор, который позволяет избежать использование дополнительных преобразователей электроэнергии, позволяет полностью отказаться от различных промежуточных звеньев (редуктор, направляющий аппарат) и получить высокие энергетические показатели и высокое качество электрической энергии.

Библиографический список

1. Суслов К.В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода / К.В. Суслов, И.Н. Шушпанов,

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Д.В. Воронцов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 1-2. – С. 70-79. – EDN XWBLNZ.

2. Adnan M., Tahir M.A., Jamal M.A. [et al.]. Design, Analysis, and Fabrication of Water Turbine for Slow-Moving Water Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2022. Vol. 144 (8). 082102. DOI: 10.1115/1.4052773

3. Генератор микроГЭС для низкопотенциальных водотоков / Р.Н. Хамитов, Р.В. Кузьмин, А.С. Мешков [и др.] // Омский научный вестник. – 2022. – № 2 (182). – С. 59-63. – DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-59-63. – EDN: RYRIFQ.

4. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С.Н. Иванов, К.К. Ким, А.А. Просолович, М.И. Хисматулин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2021. – № 3(51). – С. 29-38. – DOI 10.17084/20764359-2021-51-29. – EDN CLTWBH.

5. Mohammadi S., Hassanalian M., Arionfard H. [et al.]. Optimal design of hydrokinetic turbine for low-speed water flow in Golden Gate Strait // Renewable Energy. 2020. Vol. 150. P. 147-155. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.142

6. Бутко В.П. Система децентрализованного электроснабжения на базе микроГЭС с автобалластной системой стабилизации выходных параметров / В.П. Бутко, Р.В. Кузьмин // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2024. – № 1(38). – С. 26-30. – EDN FISDXQ.

7. Susdorf V. I. Control correlation when adjusting parameters of microhydroelectric power plant at variable load / V.I. Susdorf, R.V. Kuzmin, K.V. Galamaga // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings: electronic edition, Chelyabinsk, 16–19 мая 2017 года. – Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. – P. 8076336. – DOI 10.1109/ICIEAM.2017.8076336. – EDN XYCYVN.

© Бутко В.П., Кузьмин Р.В., 2024

УДК 621.3.05

5.3. Обзор аддитивных технологий и их применение при изготовлении обмоток электрических машин

Шайхлисламов А.И., Исмагилов Ф.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

В стремительно развивающейся области электрических машин (ЭМ) непрерывный поиск инноваций привел к новым возможностям их проектирования и производства. Спрос на более производительные, энергоэффективные и экологичные ЭМ неуклонно растет, толкая исследователей и инженеров к поиску радикально новых решений. Одной из таких революционных технологий, кардинально меняющих парадигму

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

производства ЭМ, стала аддитивная технология (АТ), более известная как 3D-печать.

Изначально предназначенная для быстрого прототипирования, 3D-печать сегодня превратилась в мощный инструмент для создания сложных и высокоточных изделий, нашедший широкое применение в самых разных отраслях, от аэрокосмической и автомобильной до биомедицинской и морской. В контексте проектирования и производства ЭМ, особое внимание уделяется оптимизации обмоток, поскольку именно они являются ключевым элементом, определяющим эффективность, мощность и надежность ЭМ. Здесь АТ предоставляют беспрецедентные возможности.

Традиционные методы намотки обмоток ЭМ, основанные на использовании круглого провода, имеют ряд ограничений. Они трудоемки, не позволяют создавать сложные геометрии и, как следствие, ограничивают возможности оптимизации теплоотвода. АТ, напротив, открывают путь к созданию обмоток с индивидуальной геометрией, идеально адаптированной к конкретным требованиям. Это позволяет значительно повысить коэффициент заполнения пазов статора или ротора, что напрямую влияет на увеличение мощности ЭМ при сохранении тех же габаритных размеров.

Более того, АТ позволяет интегрировать в обмотку специальные каналы для улучшения теплоотвода. В традиционных обмотках теплоотвод осуществляется главным образом за счет конвекции и теплопроводности через изоляцию и металл, что часто является узким местом, ограничивающим максимальную мощность и долговечность ЭМ. АТ дают возможность создавать обмотки с внутренними каналами, по которым циркулирует охлаждающая жидкость (масло или специальные хладагенты), значительно улучшая теплоотвод и, как следствие, повышая допустимую плотность тока и мощность. Это особенно актуально для высокопроизводительных ЭМ, используемых, например, в электромобилях или авиации.

Кроме того, АТ обеспечивают высокую степень автоматизации процесса производства обмоток. Традиционные методы требуют значительного ручного труда, что приводит к высокой стоимости и потенциальным ошибкам. Автоматизированные процессы 3D-печати минимизируют человеческий фактор, повышая воспроизводимость и снижая затраты. Возможность создавать обмотки из различных материалов, включая проводники с улучшенными электрическими и тепловыми свойствами (например, сплавы меди с добавлением серебра или других легирующих элементов), также является существенным преимуществом АТ. Эксперименты с различными материалами и геометриями в рамках итерационного процесса проектирования становятся значительно проще и быстрее.

Технологии аддитивной печати

Существует широкий спектр различных АТ [1]. Наиболее распространенные и известные технологии представлены в таблице 1.

**ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Таблица 1

Семейство технологий	Технология
VPP – фотополимеризация в ванне	SLA – стереолитография
	DLP – цифровая светодиодная проекция
	CDLP – непрерывная цифровая светодиодная проекция
ME – экструзия материала	FDM – моделирование методом послойного наплавления
	FGF – моделирование методом наплавления гранулами пластика
MJ – струйное нанесение материала	MJ – струйное нанесение материала
VJ – струйное нанесение связующего	VJ – струйное нанесение связующего
PBF – синтез на подложке	SLM – селективное лазерное плавление металлов
	EBM – электронно-лучевая плавка
	SLS – селективное лазерное спекание
DED – прямой подвод энергии и материала	EBAM – электронно-лучевая проволочная наплавка
	DED-LB – прямое лазерное выращивание
	WAAM – электродуговая наплавка проволоки
LOM – печать объектов методом ламинирования	LOM – изготовление объектов методом послойного ламинирования

АТ постоянно развиваются, появляются новые материалы и методы обработки, расширяющие возможности 3D-печати. Например, активно исследуются и внедряются технологии многоматериальной печати, позволяющие создавать объекты из нескольких материалов с разными свойствами в рамках одной модели. Но наиболее популярная и применимая для печати обмоток является SLM как технология, дающая наилучшую точность и имеющая широкий спектр применяемых материалов. Передовым промышленным 3D-принтером в Российской Федерации [2], использующая

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

технологии SLM является установка M350 (рис. 1) с рабочей зоной построения до 350×350×350 мм.



Рис. 1. Внешний вид установки M350

При использовании технологии SLM (рис. 2) используют лазер для спекания металлических порошков. Процесс начинается с нанесения тонкого, равномерного слоя металлического порошка на рабочую платформу. Для этого используется специальный механизм, выравнивающий поверхность слоя с заданной толщиной (обычно от 20 до 100 микрон, в зависимости от размера частиц порошка и требуемого качества поверхности). Точность дозировки порошка важна для получения качественного изделия, и современные SLM-установки оснащаются системами контроля уровня слоя.

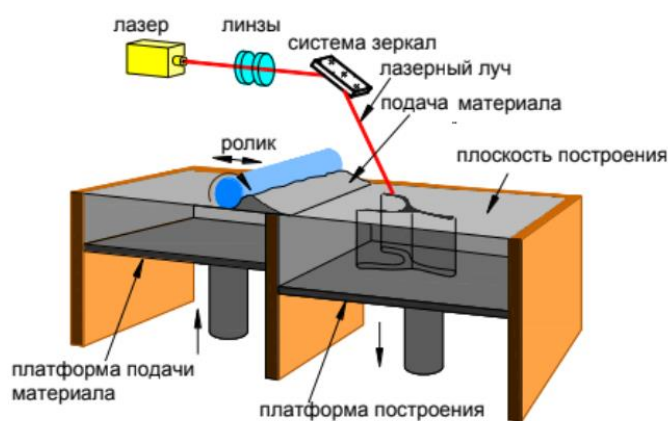


Рис. 2. Технология SLM

После формирования слоя, высокоточный лазерный луч сканирует его поверхность, выборочно сплавляя частицы металлического порошка в соответствии с цифровой моделью детали. Мощность лазера, скорость сканирования и размер фокусного пятна – все эти параметры тщательно контролируются и оптимизируются для достижения наилучшего

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

результата. Процесс повторяется слой за слоем, пока не будет создана вся трехмерная структура.

Однако, процесс SLM имеет свои особенности. Высокая концентрация энергии лазерного луча приводит к локальному перегреву материала и образованию так называемой "термически пораженной зоны" вокруг сплавленных частиц. Этот эффект приводит к изменению микроструктуры и свойств материала вблизи границ сплавления, потенциально снижая прочностные характеристики детали в этих областях. Помимо этого, остатки порошка, не участвующий в процессе сплавления, также подвергается воздействию тепла и лазерного излучения, изменяя свои свойства и делая их непригодным для повторного использования без дополнительной обработки.

Для решения этой проблемы применяется многоступенчатая система просеивания отработанного порошка. Отработанный порошок извлекается из рабочей камеры и проходит через серию фильтров, удаляющих крупные частицы, остатки не сплавившегося материала и частицы с поврежденной структурой. Очищенный порошок смешивается со свежим материалом в определенной пропорции, что позволяет снизить расход дорогостоящих металлических порошков и делает процесс производства более экономичным.

Материалы для печати

Выбор материалов для аддитивного производства (АП) обмоток критически важен и существенно влияет на их конечные характеристики. В отличие от традиционных методов изготовления, где свойства материалов хорошо изучены и стандартизованы, АТ вносят новые сложности, связанные с послойным построением объекта и, как следствие, анизотропией полученных материалов. Это означает, что свойства материала будут отличаться в зависимости от направления измерения – например, прочность на разрыв может быть существенно выше вдоль оси наплавления, чем перпендикулярно ей. Такая анизотропия напрямую влияет на электрические и тепловые характеристики обмотки, что в целом может привести к непредсказуемому изменению характеристик ЭМ.

Традиционно используемые для обмоток материалы, такие как медь и алюминий, в контексте АТ представлены в виде порошков. Размер частиц этих порошков существенно влияет на качество конечного продукта. Стандартные диапазоны размеров частиц металлических порошков [5], применяемых в АП, варьируются от мелкодисперсных (0-25 мкм) до относительно крупных (75-150 мкм). Выбор конкретного диапазона определяется необходимыми свойствами обмотки – более мелкие частицы обеспечивают более высокую плотность и, как следствие, улучшенную электропроводность, но могут быть сложнее в обработке и склонны к образованию пор. Крупные частицы проще обрабатывать, но могут привести к снижению плотности и ухудшению электропроводности. Важно отметить, что размер частиц – это лишь один из многих параметров, определяющих качество порошка. Форма частиц, их химический состав, чистота

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

и наличие примесей – все это оказывает существенное влияние на свойства готовой обмотки.

Одной из ключевых проблем, связанных с применением металлических порошков в АП, является отсутствие общепринятых стандартов. В отличие от традиционных технологий, где существуют детальные стандарты на состав и свойства материалов, в области АТ эта область стандартизации находится в стадии активного развития. За рубежом вопросы стандартизации по материалам для АТ находятся в компетенции таких организаций, как NIST – National Institute of Standards and Technology (США), Международной организации по стандартизации ISO (комитет TC261 по аддитивным технологиям) и ASTM (международный комитет F42 по аддитивным технологиям).

Идеальная форма частиц для АП – сферическая. Она обеспечивает наиболее плотное равномерное распределения материала в процессе печати, что минимизирует пористость и улучшает текучесть порошка. На практике, однако, идеально сферические частицы получить сложно и дорого, поэтому используются частицы близкие к сферической форме.

В качестве материалов для АП обмоток наиболее распространены алюминиевые сплавы, например, Al-Si-Mg (алюминий-кремний-магний), и медные сплавы, такие как Cu-Cr-Zr (медь-хром-цирконий). Алюминиевые сплавы привлекательны своей легкостью и относительно низкой стоимостью, а медные сплавы – высокой электропроводностью и теплопроводностью. Выбор между ними зависит от конкретных требований к обмотке.

Кроме того, активно исследуются и другие материалы для аддитивного производства обмоток, включая материалы с добавлением различных наполнителей для улучшения механических, электрических или тепловых свойств. Например, добавление углеродных нанотрубок может значительно улучшить электропроводность, а добавление керамических частиц – теплопроводность. Дальнейшее развитие аддитивных технологий и стандартизации материалов позволит создавать обмотки с улучшенными характеристиками и расширит область их применения. Однако, необходимо учитывать, что каждый конкретный материал и технологический процесс требует тщательной оптимизации для достижения наилучших результатов.

Аддитивная печать обмоток

В [3-7] применяя АП изготовлен экспериментальный образец обмотки ЭМ из алюминиевого сплава с добавлением углеродных нанотрубок. Приведены оптимальные режимы печати, полученные по SLM технологии. Выявлено, что при добавлении углеродных нанотрубок наблюдается значительное увеличение пористости напечатанной обмотки, а также ухудшение электрических характеристик.

В [8] перечислены методы АП в области электрических машин для изготовления обмоток, элементов электрической изоляции, сердечников статора/ротора. Во всех методах используется лазерный луч, позволяющие работать с определенным набором материалов, например: алюминий, медь и др.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

В [9] применяя АП, изготовлены полые катушки с использованием двух различных материалов Al-Si-Mg и Cu-Cr-Zr (рис. 3), для ЭМ с постоянными магнитами с высокой удельной мощностью 250 кВт и с частотой вращения 5000 об/мин. Интеграция каналов охлаждения в обмотках обеспечивает повышение плотности тока и улучшает теплоотвод в ЭМ с высокой удельной мощностью.

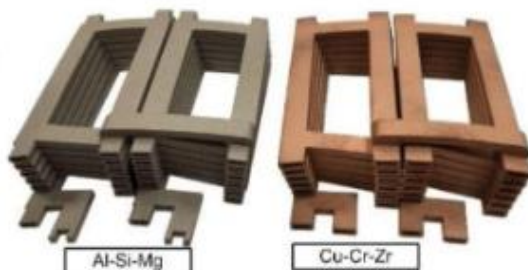


Рис. 3. Напечатанные полые катушки из материалов Al-Si-Mg и Cu-Cr-Zr

При дальнейшем развитии вышеупомянутых катушек изготовлена АП уникальная обмотка из нескольких материалов и элементов [10,11]. В обмотку интегрированы теплообменники (рис. 4). Сам теплообменник состоит из чистого серебра, а входные и выходные трубки из медно-серебряных сплавов.

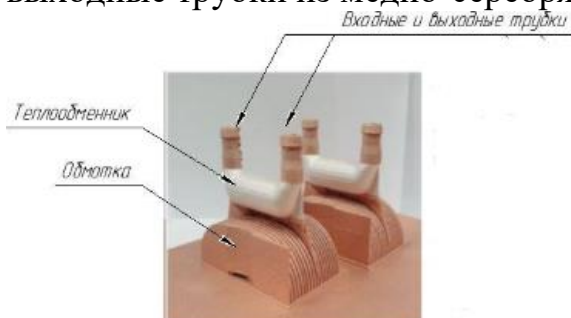


Рис. 4. Напечатанная обмотка с интегрированными теплообменниками

АП из-за своей высокой точности, дает возможность изготавливать обмотки с идеальной геометрией, что позволяет добиться высокого коэффициента заполнения и уменьшения массы обмоток, путем уменьшения вылета лобовых частей. В [12] для гоночной машины разработана ЭМ с напечатанной обмоткой из одиночных катушек (рис. 5). Такая концепция обмоток увеличивает удельную мощность ЭМ и снижает затраты на производство путем сокращения количества отходов и времени изготовления.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Рис. 5. Напечатанная обмотка ЭМ для гоночной машины

В [13,14] применяя АП изготовлены профилированные катушки из алюминиевых и медных сплавов (рис. 6). Катушки имеет эксклюзивную геометрию, которая улучшает электромагнитные характеристики. Обмотка изготавливается с помощью вспомогательных опор (поддержек) таким образом, что она ориентирована под углом 45° к платформе печати. Такой подход гарантирует, что конструкция является жесткой при печати. Вспомогательные опоры также обеспечивают достаточный зазор между витками. После завершения печати, вспомогательная опорная конструкция механически удаляется в процессе последующего технологического этапа, прежде чем катушка будет окончательно покрыта электроизоляционным лаком. Обмотки такого профиля обладают потенциалом для повышения эффективности в различных областях применения, таких как электромобили, вентиляторы аэрокосмических двигателей и генераторы.

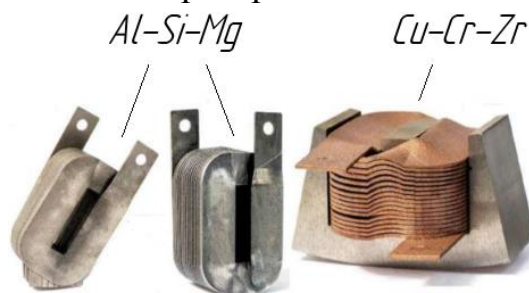


Рис. 6. Напечатанные профилированные катушки

В [15] рассматриваются напечатанные обмотки типа Hairpin (формованные жесткие секции из проводников прямоугольного сечения). АП осуществляется в рамках процесса селективного лазерного плавления. В отличие от традиционных проводников Hairpin, 3D-печатные проводники не имеют изоляционного покрытия. Это применяется на последующем этапе технологического процесса, наиболее подходящим методом является вакуумно-нагнетательная пропитка. В этом процессе изоляционная пропитка проникает между медными слоями вытесняя воздух. Это обеспечивает, с одной стороны, хорошую электроизоляцию, а с другой – эффективный отвод тепла.



Рис. 6. Напечатанные профилированные катушки

АП обмоток ЭМ – перспективное, но пока не полностью освоенное направление. Несмотря на очевидные преимущества, такие как возможность создания сложных геометрий, снижение затрат на материалы и ускорение процесса производства, технология сталкивается с рядом технологических вызовов. Один из основных – это сложность печати обмоток из чистой меди. Лазерное луч, необходимый для плавления и спекания металлического порошка, в значительной степени отражается от поверхности меди, приводя к неравномерному нагреву и снижению качества печати.

Открытая структура напечатанных обмоток, содержащая каналы для охлаждения, представляет еще одну проблему. Выбор подходящей технологии пропитки, необходимой для повышения электроизоляционных свойств ограничен, поскольку пропиточный материал не должен закупоривать каналы охлаждения, важные для эффективного охлаждения.

Наконец, пористость напечатанной обмотки является значительным недостатком. Поры снижают электропроводность материала, увеличивают электрическое сопротивление. Для минимизации пористости используются различные методы, включающие изменение параметров печати (скорость печати, мощность лазера, высота слоя), использование специальных добавок к металлическому порошку (например, легирующих элементов) для улучшения его спекаемости, а также последующую обработку напечатанных образцов.

Тем не менее, потенциал 3D-печати в области производства обмоток ЭМ огромен, и дальнейшее развитие этой технологии обещает революционные изменения в индустрии электропривода. Изучение новых материалов, с высокой теплопроводностью и электропроводностью, и совершенствование программного обеспечения для моделирования и оптимизации геометрии обмоток, является ключевыми направлениями для дальнейшего прогресса в этой области. В перспективе, 3D-печать позволит создавать не только высокоэффективные, но и персонализированные ЭМ, идеально подходящие для конкретных применений и условий эксплуатации.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Библиографический список

1. Толочко Н.К. и др. Аддитивные технологии в производстве и ремонте машин. – 2022.
2. Lsystems. [Электронный ресурс] URL: <https://www.lsystems.ru/company/> (дата обращения 30.09.2024).
3. Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Зайнагутдинова Э.И. Применение аддитивных технологий в проектировании и создании электрических машин //Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докл.: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 23–25 июня 2021 г.: в 2 т.-Текст: эле. – 2021.
4. Vavilov V.E. et al. Improving the processibility of manufacturing windings of electrical machines using additive manufacturing methods: experience of using AlSi10Mg and carbon nanotubes //2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – IEEE, 2021. – С. 636-641.
5. Ismagilov F. et al. Comprehensive study of additively manufactured windings of aircraft electric machines made of powder alloy based on aluminum with carbon nanotubes //Electrical Engineering. – 2023. – Т. 105. – №. 5. – С. 2961-2970.
6. Зайнагутдинова Э.И., Вавилов В.Е., Подгузов А.А. Изменение электрических характеристик аддитивных обмоток из алюминиевого порошка при добавлении углеродных нанотрубок //Электротехника. – №. 12. – С. 11-13.
7. Zaynagutdinova E.I., Vavilov V.E., Podguzov A.A. Changes in the Electrical Characteristics of Additive Windings Based on Aluminum Powder with Carbon Nanotubes // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Т. 93. – №. 12. – С. 750-752.
8. Саяхов И.Ф., Зиннатуллина Г.С. Аддитивные технологии в электромеханических преобразователях энергии //Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2022. – С. 18-20.
9. Wu F., EL-Refaiе A.M., Al-Qarni A. Additively manufac-tured hollow conductors for high specific power electrical machines: Aluminum vs copper //2021 IEEE Energy Con-version Congress and Exposition (ECCE). – IEEE, 2021. – С. 4397-4404. doi:10.1109/ECCE47101.2021.9595470.
10. Additiv-tech. [Электронный ресурс] URL: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-pechat-polimetallami-vy-gotovy.html> (дата обращения 30.09.2024)
11. Simpson N. et al. Direct thermal management of windings enabled by additive manufacturing //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2022. – Т. 59. – №. 2. – С. 1319-1327.
12. Additive-drives. [Электронный ресурс] URL: <https://www.additive-drives.de/en/3d-printed-electric-motors> (дата обращения 30.09.2024).
13. Simpson N. et al. Additive manufacturing of shaped profile windings for minimal AC loss in electrical machines //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 56. – №. 3. – С. 2510-2519. doi:10.1109/ECCE.2018.8557999
14. Ayat S. et al. Design of shaped-profile electrical machine windings for multi-material additive manufacture //2020 International Conference on Electrical Machines

(ICEM). – IEEE, 2020. – Т. 1. – С. 1554-1559.
doi:10.1109/ICEM49940.2020.9170945.

15. Jung J., Helm A., Liebold J. Effizientere Elektroantriebe durch additiv gefertigte Roebelstäbe in der Wicklung //MTZ-Motortechnische Zeitschrift. – 2021. – Т. 82. – №. 4. – С. 56-60. doi:10.1007/s35146-021-0652-2.

© Шайхлисламов А.И., Исмагилов Ф.Р., 2024

УДК 621.311.243

5.4. Солнечная энергетика в космосе

Максудов Д.В.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

В настоящее время расширяется использование солнечной энергии в космическом пространстве. На околоземной орбите плотность солнечного излучения составляет 1367 Вт/м^2 , что позволяет обеспечить нужды спутников и космических станций.

1. Ближний космос

Принципиальная возможность преобразования света в электрическую энергию была открыта Беккерелем в 1839 году. Однако первые солнечные батареи появились только примерно сто лет спустя, причем их КПД тогда составлял всего 1%.

Использование солнечной энергии в космосе начинается с 1958 года. Тогда СССР запустил Спутник-3, у которого имелся 0,25-ваттный радиопередатчик, питающийся от солнечной батареи [1]. В том же году США отправили в космос Vanguard 1. Это был крошечный спутник весом менее 1,5 кг. Кремниевые солнечные батареи на его борту имели 10-процентный КПД и вырабатывали всего 1 Вт [2], но это позволило поддерживать связь с этим спутником в течение 6 лет.

В дальнейшем совершенствование технологий позволило разработать солнечные батареи с гораздо более высоким КПД благодаря применению многопереходных ячеек. Батареи, используемые в настоящее время в космосе, состоят из нескольких тончайших чередующихся слоев индия-галлия и германия и имеют КПД, достигающий до 47%. По мнению разработчиков и это не является пределом и КПД можно поднять выше 50%. Срок службы современных батарей (15 лет) также значительно выше, чем во времена первых спутников [3].

Крупнейшие солнечные батареи, работающие в космосе, применяются для питания международной космической станции (МКС). Их суммарная площадь составляет 2500 м^2 , что обеспечивает выработку 240 кВт в момент, когда станция находится над дневной стороной Земли, или же 120 кВт среднесуточной выработки с учетом того, что 50% времени станция находится в земной тени.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Солнечные батареи МКС сгруппированы в 8 крыльев (см. рис. 1), каждое размером 35×12 м и весом около тонны (полная масса МКС – 450 тонн).

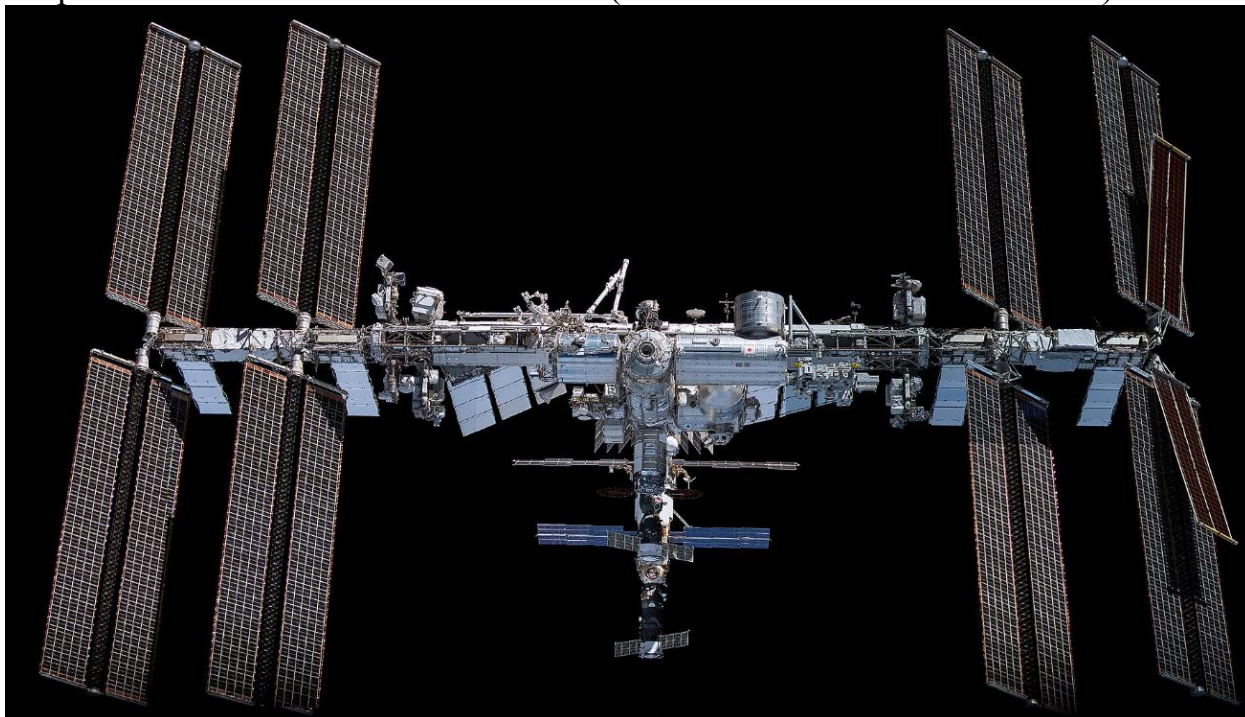


Рис. 1. МКС и ее солнечные батареи

2. Исследование дальних планет

Если на околоземной орбите поток солнечного излучения имеет достаточно высокую плотность для того, что бы сравнительно небольшие батареи обеспечивали нужды спутников и станций (обогрев, питание научных приборов и компьютера, связь с Землей и т.д.), то по мере удаления от Солнца его свет ослабевает пропорционально квадрату расстояния.

Поэтому в прошлом, при отправке космических миссий к внешним планетам в качестве источника энергии всегда использовались ядерные RTG-батареи (радиоизотопные термоэлектрические генераторы, содержащие плутоний). Такими батареями оснащены, например, Пионер-10, Пионер-11, отправленные в 1972 году к Юпитеру и Сатурну, Вояжеры 1 и 2, запущенные к дальним планетам в 1977 году. Ядерные батареи являлась источником питания также и для станций Викинг, которые работали на Марсе в 1976-1982 годах.

Однако с 90-х годов появилась тенденция к отказу от использования ядерных батарей даже для межпланетных станций, отправляемых к внешним планетам. Это обусловлено следующими причинами:

1. Россия и США после окончания холодной войны прекратили выработку оружейного плутония, который используется в этих батареях.

2. Развитие экологического сознания заставило людей задуматься о возможных последствиях в случае разрушения космической станции с ядерной батареей на борту, когда эта станция еще не покинула воздушную оболочку Земли.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

3. Рост КПД солнечных батарей в настоящее время позволяет обеспечить приемлемое отношение масса/мощность для данных батарей даже на орбитах Марса и Юпитера.

В 2011 году была отправлена межпланетная космическая станция (МКС) Juno, которая в 2016 году достигла Юпитера. В настоящее время станция все еще продолжает исследовать систему Юпитера. Это была первая миссия к Юпитеру, питание которой осуществляется исключительно за счет солнечной энергии.

Станция Juno имеет три солнечных панели размером $8,9 \times 2,7$ м каждая (см. рис. 2). Их общая масса составляет 340 кг при суммарной поверхности ячеек 50 м^2 [4]. На земной орбите они вырабатывали бы 14 кВт электрической энергии, но на орбите Юпитера, который примерно в 5 раз дальше от Солнца, их выработка составила бы 486 Ватт. В действительности, вследствие некоторой деградации элементов под действием космической радиации, мощность панелей к моменту прибытия к Юпитеру оказалась меньше – 420 Вт, но все же достаточной для питания станции.

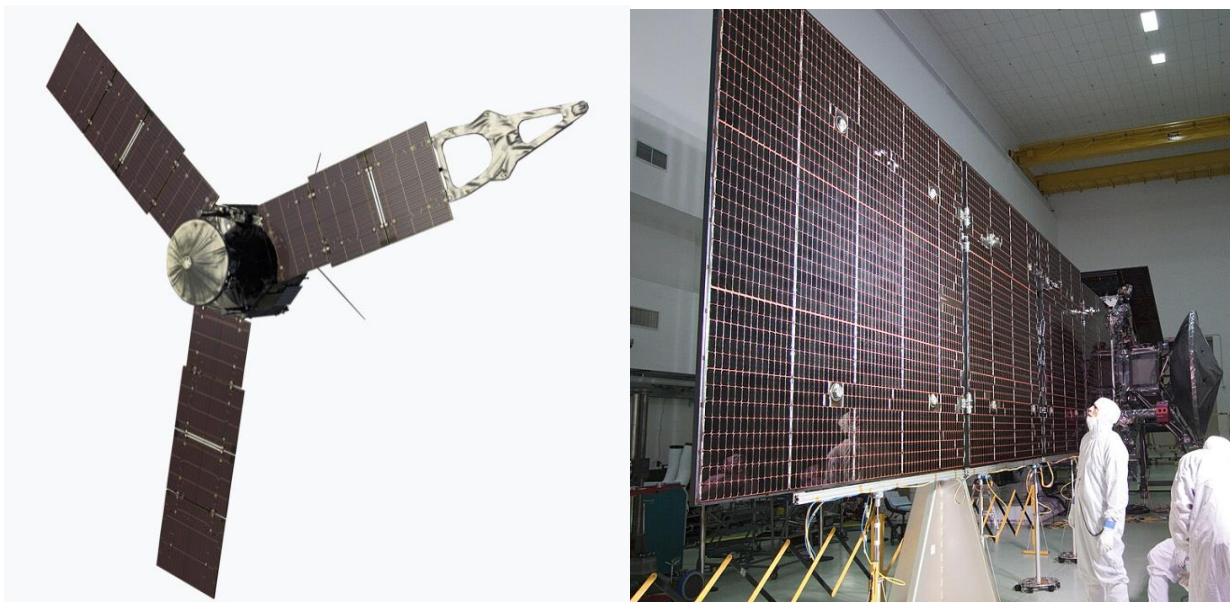


Рис. 2. Общий вид станции Juno и предполетная проверка ее солнечных панелей

В этом году состоялся запуск новой МКС к Юпитеру - Europa Clipper, которая должна провести исследование одного из его спутников – Европы, на котором имеется глобальный подледный океан и предполагается возможность существования жизни. Europa Clipper имеет две солнечные панели, которые обеспечат выработку 600 Вт электроэнергии на орбите Юпитера [5]

3. Перспективы будущего

Поток солнечного излучения, достигающий поверхность Земли, намного слабее, чем в космосе, поскольку он ослабляется облачностью, содержащейся в воздухе пылью и т.д. Это делает привлекательной идею о переносе солнечной

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

энергетики в космос. Один из проектов предполагает размещение солнечных панелей на Луне, где они могли бы быть изготовлены из местных материалов. Другая возможность – размещение спутников на геостационарной орбите, где панели могли бы вырабатывать в 8 раз больше электроэнергии, чем на поверхности Земли. Передача энергии земным потребителям предусматривается при помощи лазеров или СВЧ-радиопередатчиков.

На данный момент препятствием для реализации данных проектов является высокая стоимость выведения грузов на космические орбиты.

Библиографический список

1. Скребушевский Б.С. Космические энергетические установки с преобразованием солнечной энергии. Москва: Машиностроение, 1992.
2. Rauschenbach H. S. Solar cell array design handbook, 1976, 578 p.
3. Роскосмос. Как приручить Солнце, 2013. URL: <https://www.roscosmos.ru/19540/>
4. Jet Propulsion Laboratory. Calculating solar power in space. 2023. URL: [https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/powering-through-the-solar-system-with-exponents/#:~:text=To%20achieve%20the%20feat%2C%20engineers,feet\)%20of%20active%20solar%20cells.](https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/powering-through-the-solar-system-with-exponents/#:~:text=To%20achieve%20the%20feat%2C%20engineers,feet)%20of%20active%20solar%20cells.)
5. Barry Goldstein (Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology). Europa Clipper Update. 2015 URL: https://www.lpi.usra.edu/opag/feb2015/presentations/04_Clipper%20OPAG%20Feb%202015.pdf

© Максудов Д.В., 2024

УДК 620.92

5.5. О применении активных магнитных подшипников в возобновляемой энергетике

Ямалов И.И., Шарафутдинов Ш.Н., Ильясов Д.Р., Нагорнов А.С.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Ключевым фактором успеха в области возобновляемой энергетики является повышение эффективности и надежности ключевых элементов энергетических систем. В этом контексте активные магнитные подшипники (АМП) представляют собой перспективную технологию, способную внести значительный вклад в развитие зеленой энергетики.

АМП – это система подвески, которая позволяет свободно левитировать объект без какого-либо физического контакта. Она позволяет вращающимся валам достигать очень высокой скорости без какого-либо трения или механического износа [1]. Работа АМП зависит от использования магнитных полей для точного управления положением ферромагнитного объекта (как

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

правило, ротора). Эти силы могут быть притягивающими или отталкивающими в зависимости от сферы применения. На рис. 1 представлена схема АМП.

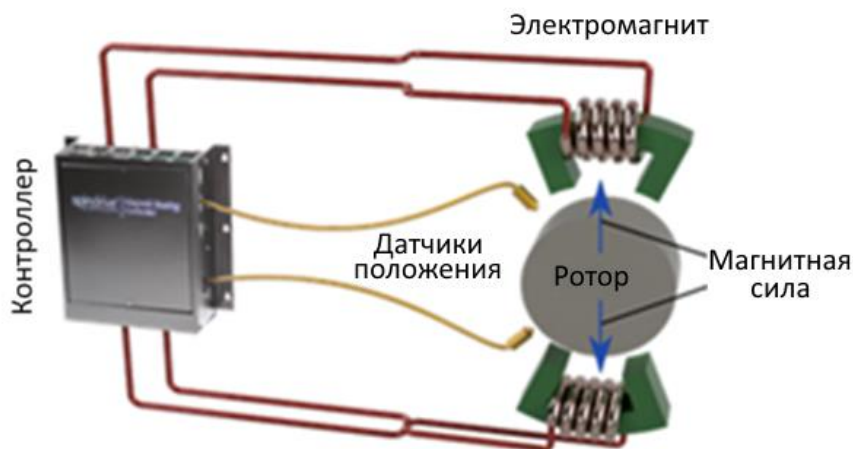


Рисунок 1 – Схема АМП

Данное устройство работает за счет электромагнитного поля, которое создается электромагнитами, расположенными вокруг вращающегося вала. Это поле удерживает вал в подвешенном состоянии, не позволяя ему соприкоснуться с опорами. АМП включают в себя радиальные (РМП) и осевые (ОМП) электромагниты, датчики положения и систему управления, которая непрерывно анализирует положение вала и регулирует силу электромагнитного поля для поддержания его в заданном положении.

АМП, в отличие от традиционных механических подшипников, не имеют механического контакта и работают на основе электромагнитного поля. Это позволяет им обеспечивать высокую точность позиционирования, отсутствие трения и износа, что приводит к значительному повышению срока службы, снижению эксплуатационных расходов и улучшению энергоэффективности [2].

АМП в производственно-сбытовой цепочке водорода.

АМП уже успешно зарекомендовали себя в транспортировке углеводородов, обеспечивая высокую надежность и эффективность работы насосов и центробежных компрессоров. Отсутствие маслосмазочной системы и контакта между ротором и агрегатом исключает эмиссию примесей в транспортируемый газ и позволяет обеспечить герметичность установки [3]. В перспективе, АМП представляют собой перспективную технологию для транспортировки водорода, который отличается высокой реакционной способностью и требует специальных материалов и решений для обеспечения безопасности. Благодаря своей устойчивости к коррозии и способности работать в условиях низких температур, АМП могут стать ключевым элементом в создании безопасных и эффективных систем транспортировки водорода.

На рис. 2 показано применение АМП в цикле производства, транспортировки и применения водорода.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

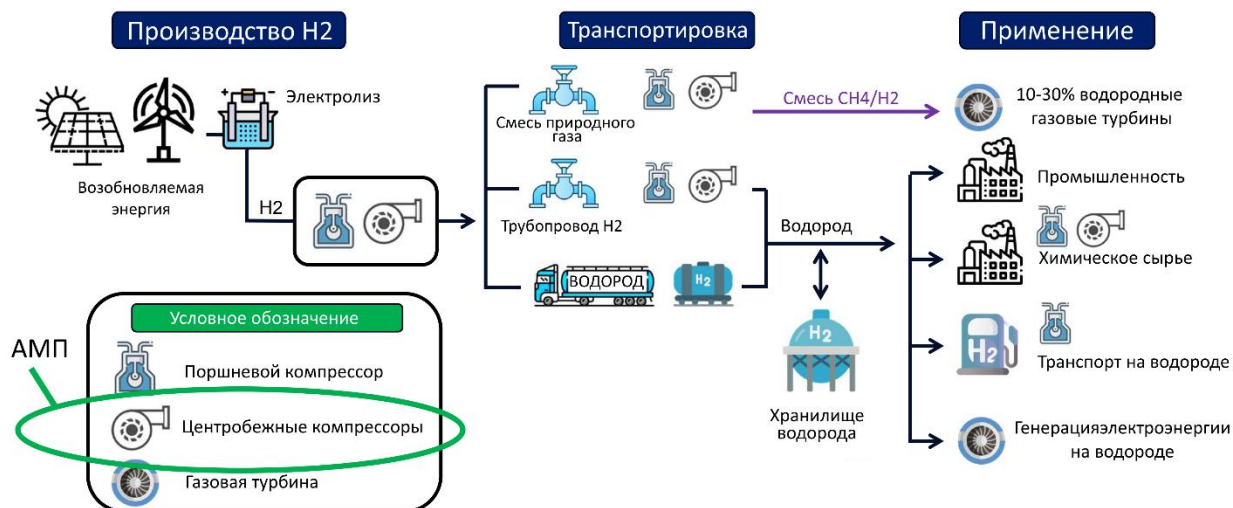


Рис. 2. Производственно-сбытовая цепочка водорода

АМП обеспечивает безопасную и эффективную работу компрессоров и насосов, необходимых для сжатия, транспортировки и хранения водорода.

Энергетическая стратегия до 2035 года предусматривает развитие производства и потребления водорода в стране, а также его экспорт. Утвержденный в 2020 году План мероприятий по развитию водородной энергетики до 2024 года направлен на внедрение экологичных технологий производства водорода и развитие международного сотрудничества в этой области. Водородная энергетика является приоритетным направлением научно-технического развития "Росатома" с 2018 года [4].

АМП в ветроэнергетике

АМП позволяют создавать системы с более высокими скоростями вращения ротора, что повышает эффективность преобразования ветровой энергии. Кроме того, АМП могут использоваться для реализации активных систем демпфирования, которые снижают вибрацию и нагрузку на конструкцию турбины, особенно в условиях турбулентности ветра. Это позволяет повысить надежность и срок службы ветроэнергетических установок, особенно в сложных условиях эксплуатации [5].

Рис. 3 демонстрирует схему ветрогенератора, оснащенного магнитными подшипниками.

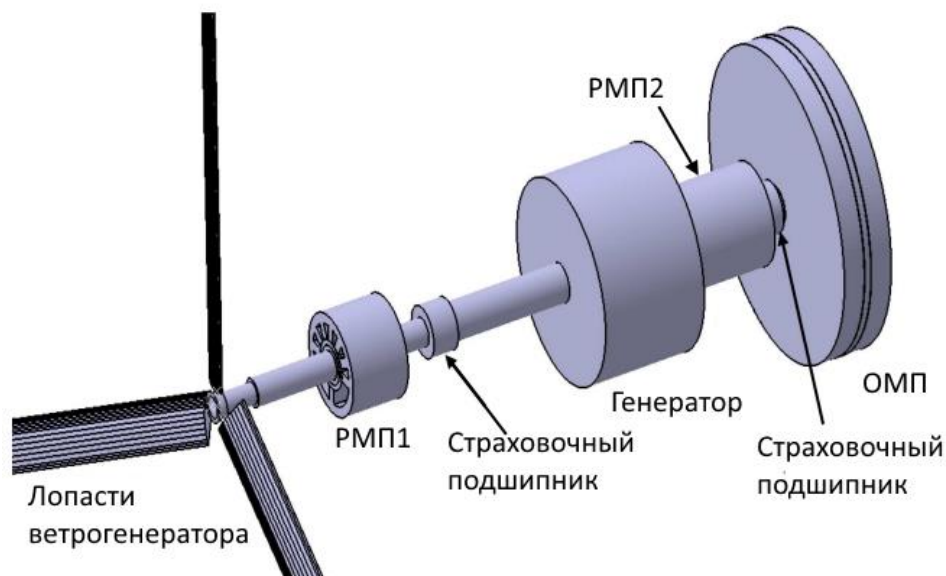


Рис. 3. Схема ветрогенератора с активными магнитными подшипниками

Основные преимущества АМП в ветроэнергетике включают в себя, предотвращение отказов ветряной турбины, увеличение срока службы и сокращение мероприятий по техническому обслуживанию. Кроме того, АМП позволяют повысить скорость вращения ветряной турбины, минимизировать пусковой момент, снизить скорость включения и компенсировать возмущения ветра [6].

АМП в маховиковых накопителях энергии

Маховиковые накопители энергии (МНЭ) можно использовать в случаях, когда требуется обеспечить выработку большой мощности в короткие сроки, например, для городских автобусов, рекуперации тормозной энергии, судостроительных кранов, а также для хранения энергии в интеллектуальных сетях [7]. В МНЭ критически важно снизить потери на трение и собственное потребление энергии.

На рис. 4 представлен МНЭ, поддерживаемый магнитными подшипниками

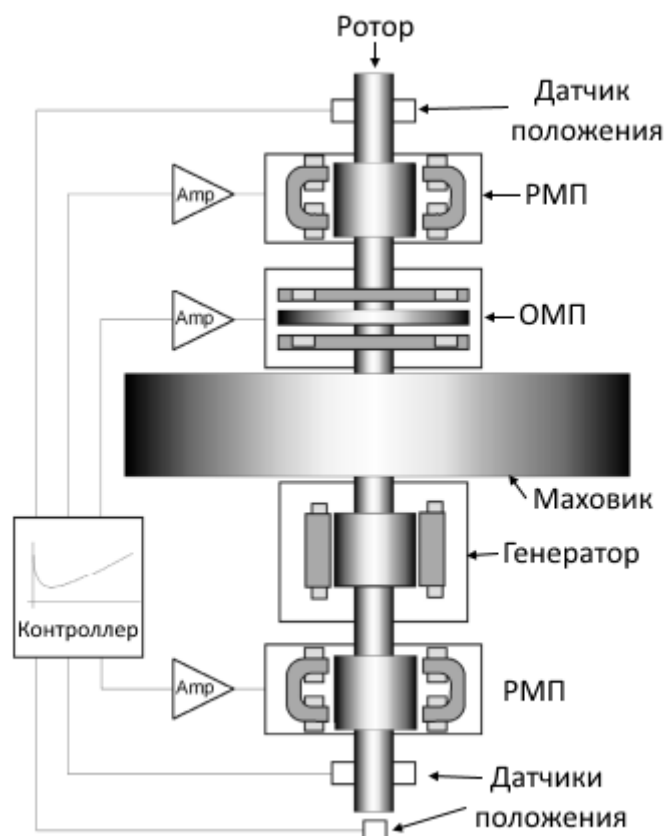


Рис. 4. МНЭ на АМП

Для полной подвески ротора во всех степенях свободы, требуются три подшипниковых узла – два радиальных и один осевой. Как показано на рисунке 2 (справа), два РМП смещены друг от друга к концам вала, таким образом охватывая вредную радиальную силу, вызванные генераторным узлом и маховиком. Упорный подшипник состоит из двух элементов: статора и вращающегося диска, так что ротор может быть притянут в обоих осевых направлениях [8].

Маховик подвешен в магнитном поле, создаваемом электромагнитами, расположенными вокруг него. Это позволяет маховику вращаться без контакта с опорами. Система управления АМП непрерывно отслеживает скорость вращения маховика и регулирует силу магнитного поля, чтобы поддерживать необходимую скорость. Отсутствие трения в АМП минимизирует потери энергии, которые неизбежны в механических подшипниках. Это позволяет маховику сохранять энергию дольше, что повышает эффективность накопителя. Благодаря высокой скорости вращения, маховик с АМП может хранить больше энергии в том же объеме, что делает накопитель более компактным и легким.

АМП в электростанциях на органическом цикле Ренкина

Электростанции, работающие по органическому циклу Ренкина (ОЦР), преобразуют отработанное тепло промышленных процессов в электроэнергию. Технология используется для распределенной выработки электроэнергии из

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

возобновляемых источников тепла (таких как геотермальная энергия, биомасса, солнечная энергия) и повышения энергоэффективности промышленных процессов (рекуперация тепла из промышленных процессов, известная как утилизация тепла в электроэнергию). Самая большая технологическая проблема заключается в извлечении энергии из теплого отработанного тепла. Более 60% отработанного тепла в мире находится ниже температуры кипения воды. Чем холоднее вода, тем сложнее извлечь из нее полезную энергию. Решением этой проблемы является использование более высоких скоростей вращения рабочего колеса. Часто это достигается за счет использования громоздкого низкооборотного двигателя и редуктора, что снижает эффективность, надежность и вводит требования к техническому обслуживанию.

Турбогенератор ОЦР состоит из радиальной турбины, соединенной с генератором на валу которого закреплены активные магнитные подшипники. Благодаря АМП работа выполняется без трения, исключая энергетические и механические потери, износ и сокращая объем технического обслуживания, связанного с другими типами подшипников. При этом снижается риск загрязнения хладагентов смазкой и повышается термическая стабильность органической жидкости. Заключение

АМП представляют собой перспективную технологию для повышения эффективности и надежности систем возобновляемой энергетики. Отсутствие механического трения, возможность работы при высоких скоростях вращения и активное управление позволяют АМП оптимизировать работу ветровых турбин, маховиковых накопителей энергии, а также насосов и компрессоров, применяемых в цикле производства возобновляемой энергии. Дальнейшее развитие технологии АМП, в том числе разработка более компактных и экономичных решений, откроет возможности для их внедрения в большее число областей. Однако, АМП имеют и ряд недостатков. К ним относятся высокая стоимость, сложность в пусконаладке и чувствительность к перебоям в электроснабжении.

Библиографический список

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники, расчет и применение, Изд.: Политехника 2003 г., 64–89 с., ISBN: 5-7325-0665-1
2. Поляхов Н.Д., Стоцкая А.Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников // Научное приборостроение, 2012, Том 22, №4, с. 5-18.
3. Руковицын И.Г., Сарычев А.П. Применение электромагнитных подшипников в газовой промышленности // Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 1. С. 12–14.
4. Водородная энергетика [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.rosatom.ru/production/vodorodnaya-energetika/> (дата обращения 15.10.2024).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

5. G. Shrestha, H. Polinder, D. Bang, J. Ferreira, Direct drive wind turbine generator with magnetic bearing, EWEA, 2007.

6. M. Fekry, Abdelfatah M. Mohamed, Mohamed Fanni, S. Yoshida, A Comprehensive performance assessment of the integration of magnetic bearings with horizontal axis wind turbine, Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 156, 2019, P.1-39.

7. Bai J.G., Zhang X.Z., & Wang L.M. A Flywheel Energy Storage System with Active Magnetic Bearings. Energy Procedia, 2012, №16, p.1124–1128.

8. Canders, Wolf-Rüdiger & May H. & Hoffmann Jan. Contactless Magnetic Bearings for Flywheel Energy Storage Systems // ISMST 8, 8th int. Symposium on magnetic suspension technology, Dresden, 2005, P.11.

© Ямалов И.И., Шарафутдинов Ш.Н., Ильясов Д.Р., Нагорнов А.С., 2024

УДК 620.92:621.311.243

5.6. Инновационные решения в ходе реализации проектов строительства объектов солнечной генерации в России

Хафизов А.Д.

Группа компаний «Хевел»

В России одним из крупнейших производителей солнечных модулей является группа компаний Хевел.

В 2009 г. было начато строительство первого в России завода по производству солнечных модулей «Хевел» в г. Новочебоксарске (Чувашская Республика). Производство было запущено в феврале 2015 года.

Изначально завод выпускал солнечные модули по тонкопленочной технологии на основе аморфного и микрокристаллического кремния. Это было связано с тем, что в момент принятия решения о начале строительства завода и выбора технологии стоимость кремния на мировом рынке была высокой. Поэтому остановились на тонкопленочной технологии, что позволяло значительно сокращать затраты на кремний.

Первая солнечная электростанция (СЭС), построенная в рамках реализации государственной программы стимулирования использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) с использованием тонкопленочных солнечных модулей была построена в с. Бурибай Хайбуллинского района Республики Башкортостан. Первая очередь Бурибаевской солнечной электростанции была введена в эксплуатацию 29 октября 2015 года. Вторая очередь – была запущена 5 декабря 2016.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Рис. 1. Пример реализации СЭС на тонкопленочных солнечных модулях – Бурибаевская СЭС

Суммарная мощность Бурибаевской СЭС – 20 МВт, среднегодовая выработка солнечной электростанции составляет около 24 млн кВт·ч.

Через несколько лет мировые цены на кремний снизились с \$400 до \$8, лишив тонкопленочную технологию ценового преимущества. За счет инновационных разработок ученых Научно-технического центра (НТЦ), который входит в группу компаний «Хевел», была модернизирована ранее существовавшая гетероструктурная технология, известная как НТ-технология. Гетероструктурная технология представляет собой гибрид кристаллического и тонкопленочного типов кремниевых солнечных элементов. Главным новшеством, привнесенным российскими учеными, является следующее: операции диффузии и имплантации при создании р-п перехода были заменены технологической операцией осаждения нанопленок аморфного кремния поверх кристаллического кремния плазмохимическим методом. Технология получила название НТ-технология. После успешных испытаний технологии гетероперехода на базе НТЦ всего за полгода данная технология была внедрена на производстве в Новочебоксарске.

Новые солнечные модули имеют следующие преимущества:

- более высокий КПД, чем у того или иного типа солнечных панелей в отдельности;
- медленная световая деградация с течением времени;
- более высокая эффективность при повышенных температурах эксплуатации, низкий температурный коэффициент мощности;
- лучшее восприятие рассеянного света, выше производительность в отсутствие прямых солнечных лучей;
- устойчивость к частичному затенению.

На сегодняшний день производственная мощность завода составляет около 670 МВт/год фотоэлектрической продукции. «Хевел» производит высокоэффективные солнечные модули и ячейки, отвечающие мировым

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

стандартам качества. Солнечные модули «Хевел» входят в Топ-5 в мире по энергоэффективности фотоэлектрической ячейки.

С 2019 года завод начал выпуск двусторонних солнечных модулей по гетероструктурной технологии. Двусторонние гетероструктурные солнечные модули вырабатывают до 30% больше электроэнергии в течение всего жизненного цикла по сравнению с односторонними модулями.

Первая СЭС с использованием гетероструктурных солнечных модулей была построена в Майминском районе Республики Алтай.



Рис. 2. Майминская СЭС – первая СЭС, построенная на гетероструктурных солнечных модулях

Первые две очереди совокупной мощностью 20 МВт были построены в 2017 году. Последние 5 МВт были введены в эксплуатацию в апреле 2019 года. Среднегодовая выработка Майминской СЭС составляет около 30 млн кВт·ч.

Следующим этапом локализации производственной цепочки оборудования для солнечной энергетики в России явилось строительство завода по производству кремниевых пластин в Калининградской области. Он был запущен в 2024 году. Предприятие выращивает слитки и производит пластины монокристаллического кремния для солнечных ячеек суммарной мощностью до 1,3 ГВт в год.

Другое направление инновационного развития в сфере солнечной энергетике – это инжиниринг и эксплуатации СЭС. Первые СЭС, которые были построены ГК Хевел с выходом на ОРЭМ, имели установленную мощность от 5 до 25 МВт, их технологическое присоединение к электросетям осуществлялось по нижнему напряжению непосредственно к ячейкам трансформаторных подстанций или к линиям ВЛ-35 кВ.

В дальнейшем компания стала укрупнять СЭС путем увеличения установленной мощности. Таким образом за счет эффекта масштаба уменьшались затраты на строительство. Увеличение мощности потребовало пересмотра метода технологического присоединения к электрическим сетям. По старому методу подключаемая мощность ограничивалась мощностью трансформаторов. Кроме того, трансформаторные подстанции обычно располагаются вблизи населенных пунктов, где мало свободных земельных

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

участков для строительства СЭС. Поэтому следующим шагом было найдено решение подключения СЭС к линиям с напряжением 110 кВ. 24 декабря 2018 года в Приволжском районе Астраханской области была введена в эксплуатацию первая такая станция — Фунтовская СЭС мощностью 60 МВт.



Рис. 3. Фунтовская СЭС мощностью 60 МВт с подключением к электросетям напряжением 110 кВ

Дальнейшее развитие данного направления – подключение более мощных СЭС к линиям 220 кВ.

В Российской Федерации есть еще много мест, где нет централизованного электроснабжения. Проблемой является то, что электроснабжение осуществляется за счет дизель-генерации, что приводит к существенным затратам на выработку электроэнергии из-за сложностей доставки дизельного топлива в труднодоступные районы и удаленные территории. Для решения такой проблемы специалистами ГК «Хевел» реализуются проекты строительства автономных гибридных энергоустановок (АГЭУ), в составе которых солнечные модули, дизельные генераторы и накопители энергии.

Примером успешной реализации такого проекта является АГЭУ мощностью 100 кВт, введенная в эксплуатацию в 2013 году в поселке Яйлю Республики Алтай. Это удаленный поселок в Турочакском районе на берегу Телецкого озера, где размещается Алтайский биосферный заповедник.

Гибридная установка смонтирована взамен устаревшего дизельного генератора и предназначена для автономного бесперебойного снабжения населенного пункта электроэнергией. Ее эксплуатация позволила снизить на 50% ежегодное потребление. Дизель-солнечная электростанция, по типу и масштабам первая в России, послужила эффективной базой для научных исследований и образовательных программ в области солнечной энергетики, развитие которой имеет огромное значение в изолированной энергосистеме и труднодоступных районах.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Рис. 4. АГЭУ в пос. Яйлю Республики Алтай

В ГК «Хевел» есть опыт решения проблемы повышения надежности электроснабжения населенных пунктов, когда сетевая электроэнергия имеет частые перебои. В таких случаях необходимо дооснащать СЭС системой накопления энергии (СНЭ). Такой пример – Бурзьянская солнечная электростанция, крупнейшая в России солнечная электростанция мощностью 10 МВт с промышленными накопителями энергии ёмкостью 8 МВт·ч. Была запущена в феврале 2020 г. в с. Старосубхангулово Республики Башкортостан. Необходимость строительства такой станции обуславливалось тем, что до райцентра шла одноцепная линия ВЛ-110 кВ из г. Белорецка длиной более 100 км. Были частые обрывы линии из-за погодных условий в горной местности, что приводило к длительным отключениям электричества в районе.

Объект генерации полностью автоматизирован и рассчитан на работу как параллельно с сетью, так и в автономном режиме. СЭС со СНЭ обеспечивает бесперебойное электроснабжение всего района, а в случае аварийного отключения или ремонтных работ на линии электропередачи работает в автономном режиме продолжительностью до 6 часов, обеспечивая электроэнергией больницы, школы, детские сады и другие социальные объекты.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Рис. 5. Бурзянская СЭС мощностью 10 МВт со встроенной системой накопления электроэнергии ёмкостью 8 МВт·ч

Еще одним инновационным решением, реализованным в сфере солнечной энергетики стало внедрение автоматического управления работой СЭС со стороны диспетчерского управления.

Филиалы АО «СО ЕЭС» «Объединенное диспетчерское управление энергосистемы Урала» (ОДУ Урала), «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Республики Башкортостан» (Башкирское РДУ) совместно с группой компаний «Хевел» реализовали первый в России проект дистанционного управления мощностью СЭС. В сентябре 2019 года была введена в промышленную эксплуатацию система дистанционного управления режимами работы Бурибаевской СЭС мощностью 20 МВт из Башкирского РДУ.

Впоследствии и в других зонах расположения СЭС были реализованы такие мероприятия другими РДУ. Реализованные проекты позволяют дистанционно управлять активной и реактивной мощностью электростанций, что повышает оперативность выполнения контрольных мероприятий по поддержанию параметров энергетического режима энергосистемы в допустимых пределах с целью предупреждения возникновения и ликвидации аварий в энергосистеме. Эксплуатация и обслуживание СЭС теперь может осуществляться без присутствия оперативного персонала.

При эксплуатации СЭС необходимо контролировать состояние и работоспособность солнечных модулей. Мониторинг с помощью беспилотников стал очередной новацией, которую впервые испытали и внедрили в ГК «Хевел» на Майминской СЭС.

БПЛА позволяют выявить тепловые аномалии на поверхности модулей, указывающие на возможные неисправности или повреждения оборудования. После получения соответствующих сигналов персонал электростанции выезжает к участку для устранения проблемы (удаления мешающей травы, продуктов жизнедеятельности птиц, замены модулей с механическими повреждениями, инструментальной диагностики оборудования).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Тепловизионная аэрофотосъемка с беспилотника также помогает обнаружить очаги повреждений, вызванных ударом молнии, и сократить время на визуальный осмотр поврежденных зон.

Ранее диагностику проводили работники электростанции, сейчас же персонал привлекается только в случае выявления проблем. Использование дронов, таким образом, позволяет в 15 раз сократить время на проверку оборудования.

В перспективе Хевел намерен расширить практику применения беспилотников на другие объекты солнечной генерации. Для автоматизированной обработки результатов планируется использовать технологии искусственного интеллекта и машинного зрения.

Еще одним новшеством, реализованном в ходе строительства СЭС на территории России, является применение поворотных опорных конструкций – трекеров, для монтажа солнечных модулей. Использование трекеров ведет к повышению эффективности солнечных электростанций за счет увеличения количества солнечного света, попадающего на фотоэлектрические элементы, что в свою очередь позволяет увеличить выработку электроэнергии на 20-25% по сравнению с СЭС на традиционных, стационарных опорных конструкциях.



Рис. 6. Ачхой-Мартановская СЭС мощностью 9,2 МВт.
Объем годовой выработки электроэнергии - 13 млн кВт·ч

5 октября 2024 г. прошло торжественное открытие Ачхой-Мартановской СЭС – первой в России солнечной электростанции с трекерной системой слежения за солнцем. Солнечная электростанция расположена недалеко от с. Самашки в Ачхой-Мартановском районе Чечни.

Таким образом, в настоящее время солнечная энергетика играет большую роль в общей энергетической системе страны. Использование инновационных решений в солнечной энергетике позволяет не только повысить эффективность и надежность объектов солнечной генерации, но также внести значительный вклад в переходе страны к чистой и устойчивой энергетике. Дальнейшее совершенствование технологий и подходов позволит России занять лидирующие позиции в мировой солнечной индустрии.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Библиографический список

1. Шахрай И.С. Прогнозы в солнечной энергетике всегда отстают от реальности. [Электронный ресурс] Сетевое издание Ведомости (Vedomosti). URL: <https://www.vedomosti.ru/business/characters/2021/05/16/869910-prognosi-v-solnechnoi-energetike?ysclid=m2q9wczaac177670910> (дата обращения: 20.10.2024).
2. Интернет-сайт Группы компаний «Хевел» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hevelsolar.com/> свободный (дата обращения: 20.10.2024).
3. Новый этап развития рынка поликристаллического кремния / Наумов А.В., Орехов Д.Л. // Журнал: Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Москва) Том: 25 Номер: 1 Год: 2022, с. 23-38.
4. Яковлев Г.Е., Няпшаев И.А., Шахрай И.С., Андроников Д.А., Зубков В.И., Теруков Е.И. Сквозное концентрационное профилирование гетероструктурных солнечных элементов // Письма в ЖТФ. 2019, т. 45, вып. 17, С. 39-42.
5. Возобновляемая энергетика в контексте регионального развития: Учебное пособие / Е.И. Голубева, С.В. Киселева, Н.И. Чернова, Ю.Ю. Рафикова и др.; под общей ред. Е.И. Голубевой и С.В. Киселевой. – М.: Издательство «Наука», 2021 – 248 с.

© Хафизов А.Д., 2024

УДК 621.311.243

5.7. Перспективы применения реактивно-вентильного двигателя для повышения эффективности работы солнечных электроустановок

Захаров В.А., Серебрянников А.В.

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

В условиях динамично развивающегося современного мира объемы потребления электрической энергии постоянно увеличиваются. Для получения электричества применяется целый ряд как традиционных источников — нефть, природный газ, пар, ядерное топливо, так и нетрадиционных — солнечная энергия, ветер, энергия приливов и отливов.

Солнечная энергия имеет практически неограниченное применение, излучение возможно преобразовать в электрическую, тепловую, механическую энергию. Существуют различные технологические схемы получения электричества из солнечного излучения. Наиболее интенсивно в данный момент развивается проектирование и производство солнечных электроустановок (СЭУ).

СЭУ классифицируются по ряду признаков. В рамках нашего исследования наибольший интерес представляет классификация СЭУ по типу ориентации

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

солнечных панелей на Солнце. Выделяют СЭУ с неизменным во времени положением и с особой системой слежения за перемещением Солнца [1].

Первый тип СЭУ находит широкое применение на солнечных электростанциях (СЭС) малой мощности. Статичное положение солнечных панелей существенно сокращает расходы на строительство и эксплуатацию СЭС. Отсутствие приводов и подвижных механизмов повышает надежность системы. Однако такой подход имеет ряд существенных технических недостатков. Освещенность солнечных батарей при постоянной ориентации СЭУ близка к максимальной только в небольшие промежутки времени. В течение остальной части светового дня, освещенность приемных площадок будет небольшой, а значит и эффективность работы СЭУ будет сниженной. Наибольшие потери в эффективности наблюдаются в период с конца марта по конец сентября — между весенним и осенним равноденствиями. В этот отрезок времени точки восхода и захода Солнца расположены севернее от точек горизонта, соответствующих западу и востоку. Солнце в этот период находится к северу от небесного экватора. В итоге утром и вечером появляется некоторый отрезок времени, Солнце уже находится на небе, но не освещает прямым светом солнечные батареи.

Использование средств автоматического слежения за Солнцем в составе СЭУ позволяет существенно увеличить коэффициент полезного действия системы. Следящая система представляет собой устройство, которое способно поворачиваться по траектории движения Солнца. На систему устанавливаются приемные площадки фотоэлектрических панелей. В этом случае солнечные панели максимально освещены большую часть светового дня, так как система слежения позволяет ориентировать приемные площадки строго на Солнце. При этом следящие системы имеют существенные недостатки. К ним относятся: высокая стоимость внедрения и эксплуатации, снижение надежности из-за присутствия подвижных частей в механизме и т.д.

Автоматизированная система управления технологическим процессом производства электрической энергии состоит из системы слежения солнечных батарей за Солнцем и системы автоматического управления зарядом аккумуляторных батарей. При этом САУ должна иметь возможность поиска максимума выработки при зависимости от величины заряда аккумуляторной батареи [2].

Одна из структур слежения с использованием датчика положения Солнца и электропривода постоянного тока изображена на рисунке 1.

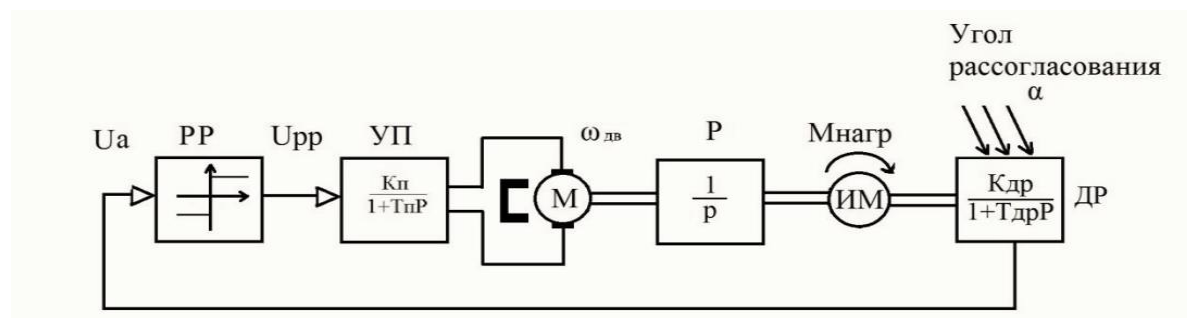


Рис. 1. Структурная схема системы слежения с использованием датчика положения Солнца и электропривода постоянного тока

На структурной схеме введены следующие обозначения: РР — релейный регулятор; М — двигатель постоянного тока; Р — редуктор; ИМ — исполнительный механизм; α — угол рассогласования; УП — преобразователь на транзисторах, ДР — датчик рассогласования; U_a — сигнал управления, получаемый от датчика рассогласования; U_{pp} — выходной сигнал от релейного регулятора положения; $\omega_{дв}$ — угловая скорость вращения двигателя; $M_{нагр}$ — момент нагрузки на двигатель.

Слежение в данной системе осуществляется от датчика рассогласования (датчика положения Солнца) при использовании регулятора положения. Основной недостаток в рассматриваемой структуре — это использование двигателей постоянного тока (невысокая надежность, сложность обслуживания и эксплуатации обусловлены наличием коллекторного узла). Механизмы и двигатели находятся под воздействием окружающей атмосферы, что снижает срок службы. Это требует систематического ухода за двигателем в процессе эксплуатации и снижает надежность СЭУ [4].

Возможной альтернативой использования электропривода постоянного тока может стать реактивно-вентильный электродвигатель [3] (рисунок 2).

Ротор и статор выполнены в шихтованном виде из листов электротехнической стали. На роторе реактивно-вентильного электродвигателя нет обмоток и постоянных магнитов (рисунок 3). Простая конструкция обмотки якоря и отсутствие обмотки и магнитов на роторе гарантируют высокую надежность конструкции. Конструкция электродвигателя может быть плоской, вытянутой, обращенной, секторной, линейной. Управление электромеханическим преобразователем электропривода происходит с помощью силовых полупроводниковых транзисторов [5].

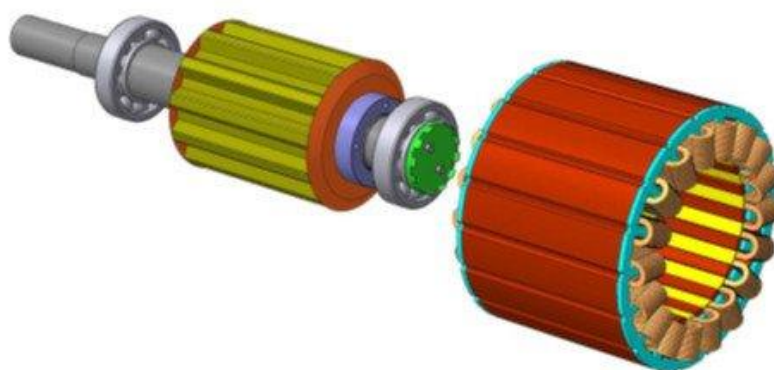


Рис. 2. Сечение статора реактивно-вентильного электродвигателя

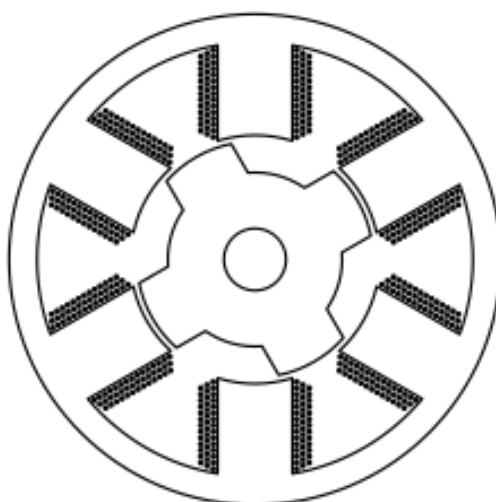


Рис. 3. Сечение реактивно-вентильного двигателя
с 6 статорными и 4 роторными полюсами

Такое техническое решение гарантирует надежность функционирования механических деталей, например щеток и подшипников. Реактивно-вентильный электродвигатель не содержит постоянных магнитов, поэтому экономически более предпочтителен. При этом он на должном уровне конкурирует по характеристикам с традиционными вентильными электрическими двигателями с постоянными магнитами

Простота конструкции обеспечивает реактивно-вентильному электродвигателю более высокую надежность, в сравнении с другими типами электрических машин. Конструктивная и электрическая независимость фазных обмоток обеспечивает работоспособность реактивно-вентильного электродвигателя в аварийных ситуациях. Электромагнитная редукция позволяет создавать малогабаритные электродвигатели для приводов следящей системы за Солнцем. В то же время частота вращения быстроходного реактивно-вентильного электродвигателя может превышать 100000 оборотов в минуту. Наконец, экономическая эффективность реактивно-вентильного электродвигателя повышается также в результате существенно меньшего

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

расхода электроэнергии, обусловленного высоким КПД электродвигателя и применением наиболее экономичных стратегий управления в динамических режимах работы [6].

Однако реактивно-вентильные электродвигатели имеют ряд недостатков. Во-первых, у таких двигателей довольно низкий коэффициент мощности $\cos\varphi$. Причиной этому является существенный по величине ток намагничивания в статоре. Зачастую габариты таких двигателей больше аналогичных асинхронных двигателей, в основном из-за малого коэффициента мощности.

Таким образом, реактивно-вентильный электродвигатель может быть применен в составе систем слежения С.ЭУ. Такой двигатель имеет ряд преимуществ и позволяет существенно повысить эффективность выработки электроэнергии на СЭС. Дальнейшие исследования в области применения реактивно-вентильных электродвигателей в следящих системах позволит существенно повысить эффективность работы отечественных солнечных электроустановок. В условиях современного мира это позволит более полно удовлетворить энергетические потребности государства и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Библиографический список

1. Солнечная энергетика: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроэнергетика» / В.И. Виссарионов [и др.]; под ред. В.И. Виссарионова. — 2-е изд., стер. — М.: Изд. дом МЭИ, 2011. — 276 с.
2. Аржанов К.В. Автоматизированная система непрерывно-дискретного слежения за Солнцем автономных фотоэлектрических энергоустановок с использованием шаговых двигателей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06 / Аржанов Кирилл Владимирович; [Место защиты: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН]. — Томск, 2016. — 178 с.: ил.
3. Нго Сян Кыонг. Обоснование применения реактивно-вентильного электродвигателя в следящей системе солнечных батарей / Нго Сян Кыонг // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2011. — Вып. 6, Ч. 1. — С. 165-169.
4. Онищенко Г. Б. Электрический привод / Г.Б. Онищенко. — Учебник для вузов-М.: РАСХН,2003. — 320 с.: ил. — ISBN 5 85941-045-X.
5. Обухов С. Г. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за солнцем / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — № 10. — С. 95-106. — EDN: YNVYDZ.
6. Бирюлин В. И. Повышение эффективности работы солнечной электростанции / В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, А.Н. Горлов // Вестник КГЭУ. — 2020. — Т. 12, № 3 (47). — С. 28-39. — EDN: DFUJMQ.

© Захаров В.А., Серебрянников А.В., 2024

УДК 629.3:502.1

5.8. Перспектива эксплуатации электромобилей с электродвигателями и водородными двигателями в городе Липецке

Соломенцев Г.Р.

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Аннотация: В данной работе рассмотрена проблема использования автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), отображены актуальность и достоинства с недостатками как электродвигателей, так и водородных двигателей, представлено их сравнение, и проанализирована оценка возможности дальнейшего использования электромобилей в городе Липецке с учетом текущего положения.

Ключевые слова: Электромобили, водородные двигатели, зеленая энергетика, топливные элементы, город Липецк.

Сложно представить современную жизнь без транспортных средств. Те же автомобили настолько прижились в обществе, что люди перестали обращать внимание на их недостатки. Например, выброс парниковых газов в России от транспортных средств составляет целых 11% от всех выбросов [1]. Не стоит забывать и о вредном воздействии выбросов на организм человека. При постоянном воздействии выхлопных газов у человека могут развиваться такие заболевания как иммунодефицит, бронхит. Также негативное влияние на нервную систему человека оказывает шум. Именно поэтому мир находится в поиске обхода недостатков использования автомобилей. Тренд на экологичность в потреблении ресурсов, или по-другому зеленая энергетика применимы и в автомобилестроении. Автомобили на электродвигателях или водородных двигателях обращают на себя внимание уже не один год.

Электромобиль – это транспортное средство, которое вместо ДВС работает на электроприводе - электродвигателе, работающим от аккумуляторной батареи, тем самым не используя бензин.

Преимущества электродвигателей по сравнению с обычными автомобилями, использующими ДВС:

- Бесшумность.
- Отсутствие выбросов в атмосферу, что положительно сказывается, как для человека, так и для экологии.

Также существует второй вид электромобилей, работающих на водороде. К достоинствам использования таких двигателей перед обычными ДВС помимо бесшумности и экологичности можно отнести высокий коэффициент полезного действия (КПД) [2].

Электромобиль, работающий на водородном двигателе, подразделяется на 2 вида:

- 1) Двигатели, использующие в качестве топлива водород.
- 2) Применение водородных топливных элементов (ВТЭ).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

В первом случае, водород сжигают в цилиндре, тем самым запуская двигатель. Во втором случае, двигатель запускается в результате физико-химической реакции (рис. 1) [3]:

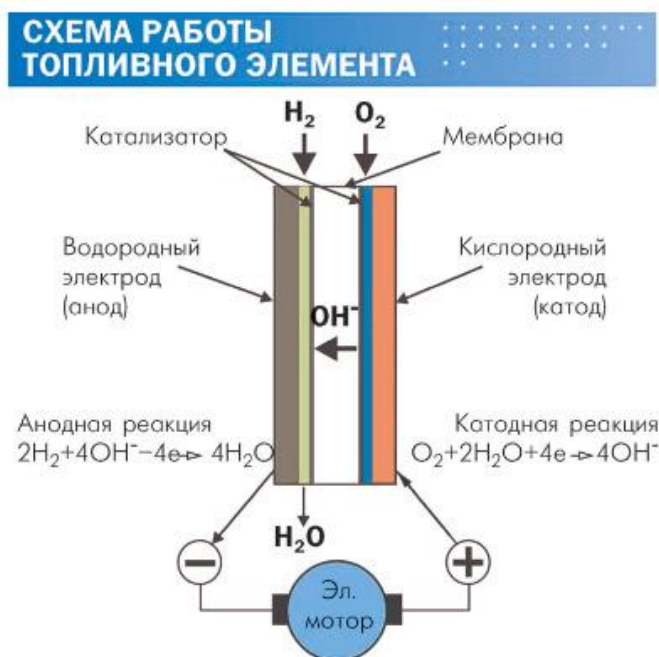


Рис. 1. Принцип работы ячейки ВТЭ

Самое главное при использовании водорода оснастить электромобиль роторным ДВС, так как водород негативно влияет на стандартные поршневые двигатели [4].

Другими словами, принцип действия ВТЭ схож с конструкцией обычного электромобиля, только без применения литий-ионных батарей (рис. 2):



Рис. 2. Конструкция обычного электромобиля

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Для зарядки электромобилей на электродвигателях были созданы специальные заправки - электрозарядные станции (ЭЗС). Так, ЭЗС в городе Липецке оснащаются 3 зарядными пистолетами постоянного тока, что делает ее универсальным решением для быстрого заряда электромобилей на автомагистралях или парковках.

В России постепенно проектируются и вводятся в эксплуатацию и водородные электростанции, которые обеспечивают топливом электромобили, работающие на водороде [5].

Перейдем непосредственно к сравнению электродвигателей и водородных двигателей электромобилей в городе Липецке.

Значительным достоинством водородных двигателей является их долговечность. В то время как электродвигателей хватает на период от 3 до 5 лет, водородные могут держать запас 8-10 лет.

Также неоспоримым плюсом является зарядка двигателя. Для полной заправки автомобиля на водородном двигателе требуется несколько минут, в то время как электромобилю потребуется больше часа. К тому же полностью заправленного баллона водорода хватает на преодоление значительного расстояния в 600 километров [6].

Теперь к достоинствам электродвигателей перед водородными:

Во-первых, цена. Обусловлено это методом производства зеленого водорода, а именно электролиза. Электролиз — это процесс разложения воды на водород и кислород с использованием постоянного электрического тока. Поэтому нужно учитывать не только теплоту сгорания, но и КПД двигателя [7]. Также не стоит забывать и про взрывоопасность водорода. Дополнительные меры безопасности вносят свой вклад в итоговую цену водородного двигателя. Поэтому на выходе получаем среднюю цену 1 кг зеленого водорода в 5-10 долларов.

Во-вторых, безопасность. Для использования в двигателях водород сжимают. А в контакте с кислородом велик шанс самовозгорания при малейшей искре. К тому же газ не имеет запаха и бесцветен, и поэтому опасность можно заметить слишком поздно [8].

Однако решающим фактором при использовании двигателей электромобилей является инфраструктура. Так, например, в городе Липецке расположены 20 ЭЗС нескольких моделей: «ЭСЭМ-26-150К-3-ДБ», «Автоинтерпрайз I-station AC» и другие. А водородных станций в городе Липецк представлено - 0. Поэтому, в связи с более высокой стоимостью водородных станций по сравнению с ЭЗС их постройка будет затруднительна.

В заключении, можно сказать, что ископаемых ресурсов с каждым годом на планете становится все меньше, и это уже известный факт. Поэтому общество постепенно переходит на зеленую энергетику. Это касается и транспортных средств, в частности автомобилей. ДВС не так привлекательны по сравнению с электромобилями, которые наносят меньше ущерба человеку и природе. Да, технологиям нужно время, чтобы раскрыть полный потенциал и уменьшить стоимость таких автомобилей. К тому же в городе Липецке использование

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

электромобилей на водородных двигателях невозможно из-за отсутствия необходимых водородных станций. Однако отрасль продолжает развиваться. В России уже есть пример водородной станции, которая исправно функционирует, и это только начало. Так что через несколько лет мы вполне можем увидеть не один десяток подобных станций. Так было и с ЭЭС, которых не только в Липецке, но и по всей России уже десятки.

Библиографический список

1. Десятая часть всех выбросов парниковых газов в России приходится на транспорт. – Текст: электронный // «Ведомости»: Устойчивое развитие: официальный сайт – 2024. – URL: <https://www.vedomosti.ru/esg/climate/articles/2024/04/02/1029384-desyataya-chast-vseh-vibrosov-parnikovihgazov-v-rossii-prihoditsya-na-transport> (дата обращения 22.10.2024).

2. Как работает водородный двигатель и какие у него перспективы. – Текст: электронный // РБК Тренды: официальный сайт – 2022. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6048e0629a794750974c67a7> (дата обращения 22.10.2024).

3. Нива на водороде и другие российские водородомобили. – Текст: электронный // Дзен: официальный сайт – 2021. – URL: <https://dzen.ru/a/YQI5fOVMKmAy6Z6Y> (дата обращения 22.10.2024).

4. Скоркин А.С. Сравнительный анализ электрических и водородных двигателей / А.С. Скоркин, Н.М. Королева. – Текст: электронный // Наука и Образование. – 2021. – Т. 4, № 1. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45754939> (дата обращения 22.10.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

5. Три минуты на заправку: Россия тестирует машину на водороде. – Текст: электронный // Вести.RU: официальный сайт – 2022. – URL: <https://www.vesti.ru/auto/article/2710071> (дата обращения 22.10.2024).

6. Мякишева Ю.М. Перспективы внедрения зелёных технологий в автомобилестроении / Ю.М. Мякишева. – Текст: непосредственный // Опыт и проблемы реформирования системы менеджмента на современном предприятии: тактика и стратегия: Сборник статей XXI Международной научно-практической конференции, Пенза, 24–25 февраля 2022 года / Под редакцией Ф.Е. Удалова, В.В. Бондаренко. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 174-177.

7. Путь воды: российская фирма устанавливает на машины водородные двигатели за 70 000 руб. В чём подвох? – Текст: электронный // НГС24.ру.: официальный сайт – 2023. – URL: <https://ngs24.ru/text/auto/2023/02/13/72049793/> (дата обращения 22.10.2024).

8. Вазетдинов Р.Р. К слову о перспективах и пользе использования водородных двигателей / Р.Р. Вазетдинов. – Текст: непосредственный // Инициативы молодых – науке и производству: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 29–30 ноября

УДК 620.92

**5.9. Перспективы развития водородной энергетики: возможности и
вызовы для устойчивого будущего**

Шакурова Л.Э.

Уфимский университет науки и технологий
г. Уфа, Российская Федерация

Технологии производства водорода играют ключевую роль в развитии водородной энергетики, предлагая различные подходы к получению этого универсального источника энергии. Один из самых экологически чистых методов производства водорода — электролиз воды. Этот процесс заключается в разложении воды на водород и кислород с помощью электричества. Если при этом используется энергия, полученная из возобновляемых источников, таких как солнечная или ветровая, то водород, произведённый таким способом, называют «зелёным». Электролиз воды представляет собой практически безуглеродный процесс, поскольку на его всех стадиях отсутствуют прямые выбросы углекислого газа. Это делает его перспективным решением для сокращения глобальных выбросов парниковых газов и перехода к устойчивой энергетике.

Тем не менее, электролиз на данный момент является сравнительно дорогим способом производства водорода. Затраты связаны как с высокой стоимостью необходимого оборудования, так и с требованием большого количества возобновляемой энергии для обеспечения процесса. Однако с улучшением технологий и ростом доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мировом энергобалансе электролиз может стать более доступным и экономически выгодным методом. Особенно важно его применение для создания резервов энергии в тех случаях, когда генерация из ВИЭ превышает потребности сети. В этом случае избыточная электроэнергия может быть направлена на производство водорода, который впоследствии можно использовать как универсальное топливо.

Другой распространённый метод — паровой риформинг метана. Это более экономически доступный и традиционный способ производства водорода, при котором метан из природного газа преобразуется в водород и углекислый газ при высокой температуре. Несмотря на относительно дешёвую стоимость, этот процесс сопровождается значительными выбросами CO₂, что делает его менее привлекательным с точки зрения устойчивого развития. В рамках борьбы с изменением климата такие методы производства водорода подвергаются критике, поскольку они зависят от ископаемых видов топлива и способствуют

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

увеличению углеродного следа. Однако существует вариант улавливания и хранения углекислого газа (carbon capture and storage — CCS), который может снизить воздействие риформинга на окружающую среду, но также увеличивает затраты.

В этой связи «зелёный водород» представляет собой наибольший интерес для будущего энергетики. Он способен стать важным элементом углеродно-нейтральной экономики, так как его производство не сопряжено с выбросами парниковых газов, а его использование в различных отраслях промышленности может значительно сократить зависимость от ископаемых источников топлива. Основная перспектива «зеленого водорода» — его применение в тех секторах экономики, где трудно заменить углеводороды альтернативными источниками энергии, таких как металлургия, химическая промышленность и транспорт, особенно водный и воздушный.

Развитие водородной экономики требует значительных инвестиций и технологий, которые позволят снизить стоимость производства «зеленого водорода» до конкурентоспособного уровня. Государственная поддержка, международные соглашения и инновации в области возобновляемой энергетики играют решающую роль в ускорении этого процесса. В перспективе водород, произведённый с помощью электролиза воды, может стать основным источником чистой энергии, способным обеспечить переход к более устойчивой энергетической системе.

Хранение и транспортировка водорода представляют собой одни из самых серьёзных вызовов для развития водородной энергетики, поскольку водород является легчайшим химическим элементом и обладает высокой энергией связи. Это усложняет задачи, связанные с его безопасным и эффективным хранением и перемещением в больших объёмах. Существует несколько методов хранения водорода, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, зависящие от конкретных условий использования.

Один из наиболее распространённых методов — сжижение водорода. Этот процесс включает охлаждение водорода до крайне низкой температуры (-253°C), при которой он переходит в жидкое состояние. Сжиженный водород значительно уменьшает объём, что делает его более удобным для хранения и транспортировки на большие расстояния. Однако процесс сжижения требует больших затрат энергии, что снижает общую эффективность системы. Кроме того, поддержание водорода в жидком состоянии требует специализированного оборудования и высоких затрат на изоляцию для предотвращения испарения, что усложняет этот процесс и делает его дорогостоящим.

Другим распространённым методом является сжатие водорода. В этом случае водород сжимают до высоких давлений (до 700 бар), что также позволяет сократить объём и хранить его в специальных резервуарах. Сжатый водород проще в обращении по сравнению с сжиженным, однако давление, под которым он хранится, создаёт определённые риски безопасности, требуя использования специальных материалов и технологий для предотвращения утечек. В

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

транспортировке сжатый водород обычно перемещают в газообразном состоянии по трубопроводам или в специальных цистернах, что требует больших усилий по обеспечению безопасности.

Ещё один инновационный подход — использование химических соединений для хранения водорода, например, в виде аммиака (NH_3). Аммиак обладает высокой плотностью водорода и может храниться при относительно низком давлении и комнатной температуре. Это делает его удобным для транспортировки и хранения на дальние расстояния, особенно в тех случаях, когда инфраструктура для перевозки водорода ещё не развита. Однако для использования водорода необходимо разлагать аммиак, что требует дополнительных затрат энергии и сложного оборудования. Несмотря на эти трудности, аммиак рассматривается как перспективный способ хранения водорода, особенно для крупномасштабных проектов.

Что касается транспортировки, то здесь также возникают значительные инфраструктурные ограничения. Существующая газотранспортная система не всегда адаптирована к водороду, который может вызывать коррозию и утечки при транспортировке по трубопроводам, созданным для природного газа. Для преодоления этой проблемы требуется модернизация трубопроводной инфраструктуры или строительство новых специализированных систем. Кроме того, транспортировка водорода на большие расстояния, например, между странами или континентами, остаётся дорогостоящей и технически сложной задачей, особенно когда речь идёт о жидком водороде, требующем специальных изотермических цистерн.

Безопасность при транспортировке больших объемов водорода является ещё одним важным аспектом. Водород является крайне легковоспламеняющимся газом, что создаёт дополнительные риски при его перемещении, особенно в сжатом или жидком виде. Для минимизации этих рисков необходимы строгие стандарты безопасности, использование современных технологий мониторинга и контроля, а также постоянное обучение персонала, который занимается хранением и транспортировкой водорода. Несмотря на эти вызовы, совершенствование технологий и создание международных стандартов и норм безопасности могут помочь преодолеть существующие барьеры.

Водород занимает важное место в будущем мировой энергетике благодаря своему широкому спектру применения. Одним из наиболее перспективных направлений является использование водорода как топлива для транспортных средств. Водородные автомобили уже привлекают внимание как альтернатива электромобилям с батареями. Технология топливных элементов, которая используется в водородных транспортных средствах, превращает водород в электричество, необходимое для питания электродвигателя. Основным преимуществом водородных автомобилей является быстрое время заправки (всего несколько минут) и большой запас хода по сравнению с электрическими машинами, что делает их привлекательными для долгих поездок и тяжелого транспорта, например, для грузовиков и автобусов. Однако для массового

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

внедрения водородного транспорта необходимо создать развитую инфраструктуру заправочных станций, что на данный момент является основным ограничением.

Кроме того, водород начинает активно применяться в железнодорожной отрасли. Водородные поезда, использующие топливные элементы, уже проходят испытания и внедряются в Европе и Азии. Такие поезда особенно эффективны на неэлектрифицированных железных дорогах, где традиционно используются дизельные локомотивы, выбрасывающие значительное количество CO_2 . Водородные поезда не только снижают углеродный след, но и обеспечивают тихую и более экологичную эксплуатацию. Их развитие имеет большое значение для декарбонизации транспортного сектора, особенно в регионах, где электрификация железнодорожных путей экономически невыгодна.

Еще одно важное применение водорода — это его использование для генерации электроэнергии. Водород может быть сожжён для производства электричества, что делает его пригодным для использования на крупных электростанциях. В отличие от угольных и газовых станций, водород при сгорании не выбрасывает углекислого газа, что делает его более экологически чистым вариантом для энергетики. Кроме того, водородные электростанции могут использоваться как резервные источники энергии в условиях нестабильной выработки от возобновляемых источников (например, солнечных и ветровых). В периоды, когда ВИЭ генерируют избыток энергии, её можно использовать для производства водорода, который впоследствии можно сжечь для выработки электроэнергии в моменты повышенного спроса или недостаточной генерации ВИЭ.

Наконец, водород играет ключевую роль в декарбонизации промышленности, особенно в таких энергоёмких отраслях, как производство стали и химическая промышленность. В традиционной металлургии сталь производится с использованием угля и кокса, что сопровождается значительными выбросами CO_2 . Однако водород можно использовать в качестве восстановителя железной руды, заменяя углерод, что позволит сократить углеродные выбросы практически до нуля. Водородное производство стали уже тестируется крупными промышленными предприятиями, и если технология будет развита до масштабного коммерческого применения, это может значительно уменьшить углеродный след металлургической отрасли.

В химической промышленности водород также может использоваться для производства различных химических продуктов, таких как аммиак и метанол, которые являются основой для удобрений и других промышленных продуктов. Традиционные процессы синтеза аммиака и метанола требуют значительных количеств природного газа, что приводит к выбросам углекислого газа. Использование «зеленого водорода», произведённого с помощью возобновляемых источников энергии, позволяет сделать эти процессы более экологичными и менее зависимыми от ископаемого топлива.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Таким образом, применение водорода в энергетике и промышленности открывает новые горизонты для перехода к углеродно-нейтральной экономике. Водород может стать универсальным энергоносителем, который сможет сократить выбросы CO₂ в различных секторах, от транспорта до тяжёлой промышленности. Тем не менее, для того чтобы эти перспективы стали реальностью, необходимы значительные инвестиции в развитие водородной инфраструктуры, создание нормативной базы и совершенствование технологий, что станет основой для устойчивого будущего водородной энергетики.

Интеграция водорода в существующие энергетические системы открывает новые возможности для повышения их устойчивости и эффективности, особенно в условиях глобального перехода на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Водород обладает уникальными характеристиками, которые позволяют ему стать ключевым элементом в управлении энергетическими потоками и обеспечении стабильности энергосетей с высокой долей ВИЭ, таких как солнечная и ветровая энергия.

Одним из главных преимуществ водорода является его способность легко интегрироваться в существующие энергетические системы. Водород можно использовать как в качестве топлива для электростанций и транспортных средств, так и для промышленного производства. Более того, водородные технологии можно внедрять на уже существующих объектах инфраструктуры с некоторыми модификациями. Например, газовые электростанции можно адаптировать для работы на смеси природного газа и водорода, что позволит существенно сократить выбросы углерода в процессе генерации электроэнергии. Это также касается газопроводных сетей, которые в будущем могут быть частично или полностью использованы для транспортировки водорода. Хотя для этого требуются технические изменения (например, модернизация материалов трубопроводов), такое использование существующей инфраструктуры делает внедрение водорода более экономически обоснованным и снижает затраты на строительство новых сетей.

Кроме того, водород предлагает эффективное решение для проблемы переменной генерации электроэнергии из возобновляемых источников. Одной из главных проблем энергосистем с высокой долей ВИЭ является нестабильность их выработки: солнце не всегда светит, ветер не всегда дует, и это приводит к резким колебаниям генерации энергии. В таких условиях водород может выступать как средство балансировки энергосистем, обеспечивая хранение избыточной энергии и её использование в периоды высокого спроса или низкой генерации.

В периоды, когда выработка электроэнергии из ВИЭ превышает потребление, избыточную энергию можно использовать для производства водорода методом электролиза воды. Этот процесс позволяет преобразовать электрическую энергию в химическую, которую можно долгое время хранить в виде водорода. Водород в свою очередь можно использовать позже, когда возникает дефицит энергии, например, в безветренные дни или ночью, когда солнечные панели не

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

работают. Таким образом, водород становится своеобразным аккумулятором для энергосистем, помогая сгладить пики и спады в генерации ВИЭ и обеспечивать стабильную работу сети.

Эта роль водорода как средства для долгосрочного хранения энергии становится особенно важной в контексте перехода к углеродно-нейтральным энергосистемам. В отличие от традиционных аккумуляторов, которые эффективны для короткого периода времени (например, на несколько часов), водород может храниться и использоваться на протяжении недель или даже месяцев, что особенно актуально для сезонных колебаний в генерации ВИЭ. Это делает водород уникальным решением для обеспечения гибкости энергосистем, способных справляться с переменной генерацией возобновляемых источников и поддерживать надёжность энергоснабжения. Однако на пути её широкого внедрения стоят значительные экономические и экологические вызовы.

Высокие затраты на производство «зеленого водорода» являются одним из главных препятствий для его масштабного внедрения. В настоящее время производство водорода методом электролиза воды с использованием солнечной или ветровой энергии остаётся значительно дороже по сравнению с традиционными методами, такими как паровой риформинг метана.

В таких условиях особенно важна государственная поддержка. Проекты требуют серьёзных финансовых вложений на стадии разработки и внедрения, а также поддержки со стороны законодательных инициатив, направленных на сокращение выбросов углекислого газа и стимулирование перехода на чистую энергетику. Государственные субсидии могут компенсировать высокие затраты на начальном этапе, создавая условия для расширения рынка водородных технологий. Дополнительными мерами могут стать налоговые льготы, программы финансирования инноваций, а также введение обязательных норм по снижению углеродного следа для промышленных и энергетических компаний.

Кроме того, решающую роль играет международное сотрудничество. Водородная энергетика требует глобального подхода, поскольку развитие водородной инфраструктуры и создание рынка водорода зависят от совместных усилий стран. Международные соглашения по снижению выбросов углекислого газа и переходу к возобновляемым источникам энергии (например, Парижское соглашение) создают основу для такого сотрудничества. Страны могут координировать свои усилия в разработке стандартов для производства, хранения и транспортировки водорода, а также обмениваться технологиями и инвестициями в водородную инфраструктуру.

С экологической точки зрения водородная энергетика имеет огромный потенциал для сокращения выбросов парниковых газов и смягчения последствий изменения климата. Водород, как чистый энергоноситель, при использовании не производит углекислого газа, что делает его идеальным решением для декарбонизации секторов, в которых трудно полностью перейти на возобновляемые источники энергии. Это особенно актуально для таких отраслей, как металлургия, химическая промышленность и транспорт, где

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

традиционные методы сокращения выбросов менее эффективны. Например, замена углеродоёмких процессов производства стали и аммиака на водородные технологии может сократить выбросы CO₂ в промышленности на десятки процентов, что существенно приблизит страны к целям по достижению углеродной нейтральности.

Кроме того, использование водорода в транспортном секторе, особенно для тяжелого транспорта, судоходства и авиации, позволит снизить зависимость от нефти и сократить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Водородные топливные элементы могут заменить дизельные и бензиновые двигатели, что особенно важно для снижения уровня загрязнения воздуха в городах и улучшения общественного здоровья.

Таким образом, водородная энергетика предоставляет уникальные возможности для декарбонизации и перехода к устойчивой энергетической системе, но требует значительных усилий в экономической и политической сферах для преодоления существующих барьеров. В долгосрочной перспективе водород может стать основой углеродно-нейтральной экономики, но для этого необходимо согласованное взаимодействие между правительствами, бизнесом и международными организациями.

Библиографический список

1. Ананичева С.С., Мезенцев П.Е., Мызин А.Л. Электроэнергетические системы и сети: модели развития [Текст]: учебное пособие для вузов / под научной редакцией П.И. Бартоломея. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — С. 45–72.
2. Беденко С.В., Шаманин И.В. Надзор и контроль в сфере безопасности. Учет и контроль делящихся материалов [Текст]: учебное пособие для среднего профессионального образования. — Москва: Издательство Юрайт, 2024.— С. 12–37.
3. Белов П.Г., Чернов К.В. Техногенные системы и экологический риск [Текст]: учебник и практикум для вузов / под общей редакцией П.Г. Белова. — 2-е изд. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — С. 101–154.
4. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Общая энергетика: водород в энергетике [Текст]: учебное пособие для вузов / под научной редакцией С.Е. Щеклеина. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. С. 78–120.
5. Тихонов А.И., Бирюков С.В., Соловьев А.А. Датчики и измерительная техника в электроэнергетике [Текст]: учебное пособие для среднего профессионального образования. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — С. 44–92.

© Шакурова Л.Э., 2024

УДК 621.311.26

**5.10. Перспективы применения водородной зеленой энергетики
в резервных и автономных системах электроснабжения**

Березов В.В.

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)»;

Хафизов А.Д.

Группа компаний «Хевел»

Современная геополитическая обстановка, новые приемы ведения войн и военных конфликтов, в результате которых под угрозой все чаще находятся объекты энергетики, требуют новых подходов к созданию резервных и автономных систем электроснабжения для особо важных звеньев промышленной и оборонной инфраструктуры, относящихся к первой категории по надежности электроснабжения, таких как пункты боевого управления, системы оповещения, системы противопожарной и противоаварийной автоматики, системы жизнеобеспечения удаленных объектов, и населенных пунктов, в том числе и с применением нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

До относительно недавнего времени применение водородных топливных элементов (ВТЭ) считалось перспективным исключительно в пилотируемых бортовых системах электроснабжения. Это было обусловлено условиями эксплуатации и высокими требованиями к бортовым источникам, таким как удельные показатели, коэффициент полезного действия, отказоустойчивость, отсутствие вращающихся элементов, долгий срок службы и необслуживаемой работы, которые не могут обеспечить электромеханические генераторы и химические источники тока. Высокая себестоимость вырабатываемой электроэнергии не бралась в расчет вследствие отсутствия альтернатив.

В наземных системах ВТЭ не применялись, в основном, по причине экономической нецелесообразности и сложностей по перевозке и хранению водорода.

Особенностью современных ВТЭ являются высокие требования к чистоте потребляемого водорода. Водород, полученный любыми другими способами, кроме электролиза, содержит примеси, которые в относительно короткий срок засоряют катализатор, что значительно осложняет эксплуатацию и уменьшает срок службы. В свою очередь, водород, полученный при помощи электролиза на порядок дороже водорода, полученного из природного газа.

С появлением новых материалов и развитием элементной базы произошел скачок в развитии возобновляемых источников энергии, а именно солнечных и ветряных электроустановок (СЭУ и ВЭУ), благодаря чему себестоимость вырабатываемой ими электроэнергии значительно снизилась и достигла приемлемого для промышленного потребления уровня. Так, нормированная

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

стоимость 1 МВт·ч электроэнергии (НСЭ), вырабатываемой солнечными электростанциями на современных фотоэлектрических модулях снизилась по сравнению с 2009 годом с 359 долларов США до 40 долларов в 2023 году (по данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии IRENA).

Стоимость солнечных панелей снизилась по сравнению с 1975 годом почти в 500 раз и в среднем составляет 0,3 за 1 Вт установленной мощности (США, Европа), а модули из КНР обходятся уже 0,1 долларом.

Именно этот факт, а также осознание глобальной необходимости перехода с углеводородов на другие источники энергии заставляет по-новому оценить области применения ВТЭ. А именно рассмотреть ВТЭ в качестве накопителей (аккумуляторов) электроэнергии в резервных и автономных системах электроснабжения, основным источником в которых являются СЭУ.

Стоит отметить, что исследования в области применения солнечной энергии для электролиза водорода проводились еще в 70-80-х годах прошлого столетия. Так, в СССР выносился на рассмотрение проект перевода автомобильного транспорта на водородные двигатели и создание сети заправок, водород в которых вырабатывался бы электролизом от солнечной энергии. Однако в то время, подобные проекты выглядели скорее утопией.

Нами предлагается разработка автономных необслуживаемых гибридных систем электроснабжения на базе СЭУ, ВТЭ и электролизеров. ВТЭ в таких системах работают в темное время суток, а также для сглаживания пиковых режимов, водород вырабатывается электролизерами в периоды излишков электроэнергии, вырабатываемых СЭУ.

Сама идея подобных разработок не нова. Однако все существующие разработки в этом направлении ведутся как альтернатива традиционным системам электроснабжения для объектов с относительно детерминированными графиками нагрузки. Соответственно, определение основных параметров системы осуществляется по критерию оптимальности, в котором основным показателем является минимальная НСЭ, а установленная мощность СЭУ, ВТЭ, инверторов и производительность электролизеров ($P_{сэу}$, $P_{втэ}$, $R_{инв}$ $P_{элзр}$ соответственно) выбирается не ниже существующих промышленных нормативов для прогнозируемых показателей графика нагрузок:

$НСЭ \rightarrow \min;$

$P_{сэу}, P_{втэ}, R_{инв} P_{элзр} \geq N_{гост}.$

Для объектов специального назначения, объектов, относящихся к первой категории надежности электроснабжения и удаленных населенных пунктов, такой подход к выбору основных параметров может привести к снижению эффективности, авариям, нарушению жизнеобеспечения и другим непредсказуемым последствиям, так как в особые периоды, а также в силу

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

специфики подобных объектов, график нагрузки имеет неравномерный случайный характер, зачастую включающий пиковые режимы.

Поэтому в качестве основного показателя эффективности систем электроснабжения для таких объектов предлагается применять коэффициент готовности K_g , отражающий вероятность того, что в любой момент система будет исправна, способна выполнять свои функции по электроснабжению потребителей и не находиться в состоянии отказа, аварии, ремонтно-восстановительных работ, планового или внепланового регламентного технического обслуживания. При этом критерий будет зависеть от назначения объекта. Для некоторых специальных объектов это может быть критерий оптимальности, при котором готовность системы электроснабжения в приоритете:

$K_g \rightarrow \max$.

Для других объектов это может быть критерий пригодности (который нередко применяется при принятии решения о вводе в эксплуатацию новой техники), когда оценивается увеличение коэффициента готовности нового объекта по сравнению с коэффициентом готовности существующего, и одновременно оценивается увеличения стоимости.

Примером может служить критерий, когда коэффициент готовности новой гибридной системы электроснабжения $K_{гнгсэс}$ должен превышать коэффициент готовности традиционных систем $K_{гтсэс}$ не менее, чем на 40%, в то время, как увеличение стоимости $C_{гнгсэс}$ не должно превышать 30% от стоимости $C_{тсэс}$:

$K_{гнгсэс}/K_{гтсэс} > 1,4;$

$C_{гнгсэс}/C_{тсэс} < 1,3.$

Для подбора оптимальных параметров гибридной системы электроснабжения разработана компьютерная модель, включающая в себя:

- блок имитации графика нагрузки, где каждый потребитель включается по заданному алгоритму с учетом внешних факторов, в том числе имеющих вероятностный характер;
- блоки определения режимов и оценки состояния СЭУ, ВТЭ, электролизера, инвертора и контроллера;
- блок оценки количества запасенного водорода;
- блок оценки продолжительности автономного функционирования;
- блок оценки показателей надежности.

Для более достоверной работы модели используются генераторы случайных чисел для учета случайных внешних факторов и возможных отказов в зависимости от времени наработки и распределения отказов для каждого элемента.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Проверка адекватности разработанной модели на примерах существующих систем подтвердила точность в пределах 10%, что позволяет использовать ее для дальнейших исследований.

Выбор параметров при разработке конкретных гибридных систем планируется осуществлять с учетом оптимальных значений, полученных с использованием модели методом симплексного планирования многофакторного эксперимента.

Предварительные результаты показали, что теоретический срок службы гибридных систем электроснабжения на солнечных и водородных источниках может составлять не менее 15 лет, в отличие от существующих подобных систем, на базе химических аккумуляторов и дизельных генераторов.

Таким образом, применяя описанный подход, можно обеспечить разработку автономных гибридных систем электроснабжения на базе СЭУ, ВТЭ и электролизеров, у которых коэффициент готовности будет значительно превышать подобный показатель существующих систем (на базе химических аккумуляторов и дизельных генераторов). Что делает задачу их разработки не только актуальной, но и необходимой.

Библиографический список

1. Карасевич В.А. Основы водородной энергетики: Учебное пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2023. – 97 с.
2. Лебедева М.В., Яштулов Н.А. Топливные элементы – характеристика, физико-химические применение: Учебное пособие – М.: Мир науки, 2020. – 63 с.
3. Злобин В.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии в промышленной теплоэнергетике. В 2 ч.: учебное пособие / В.Г. Злобин, А.А. Верхоланцев. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024 — Ч. 1 — 135 с.
4. Возобновляемая энергетика в контексте регионального развития: учебное пособие / Е.И. Голубева, С.В. Киселёва, Н.И. Чернова, Ю.Ю. Рафикова и др.; под общей ред. Е.И. Голубевой и С.В. Киселёвой. – М.: Издательство «Наука», 2021 – 248 с.
5. Игнатович Р.С. Технологии производства водорода электролизом воды // Сборник трудов конференции «Актуальные проблемы энергетики СНТК – 77». – Минск, 2021. – С. 140–144.
6. Бедретдинов Р.Ш. Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 47-58.
7. Белицын И.В., Сташко В.И., Надежность систем электроснабжения промышленных предприятий: Учебно-методическое пособие. – Барнаул: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 2021.

© Березов В.В., Хафизов А.Д., 2024

УДК 620.9

5.11. Исследование проблемы выбора биоэнергетического оборудования

Шишкина Ю.С., Новикова О.В.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Введение

С развитием технологий и растущими потребностями в энергии, владельцы предприятий и частных домов все больше осознают важность и необходимость эффективной утилизации отходов и надежного энергоснабжения. Технологии, позволяющие объединить решение этих задач, относятся к биоэнергетике. Тем не менее, при выборе энергетического оборудования потребители и проектировщики должны учитывать техническую возможность и экономическую целесообразность. Несмотря на наличие высокого потенциала биоэнергоресурсов, статистика демонстрирует низкие темпы внедрения биоэнергетических установок в РФ и практические отсутствие понимания о наличии необходимого оборудования, что затрудняет принятие решения. Потенциал биоэнергетических ресурсов в России значителен. По оценкам экспертов, ежегодно на территории страны производится до 14–15 млрд т биомассы, энергия которой эквивалентна примерно 8 млрд т условного топлива. Также важнейшим возобновляемым ресурсом для российской биоэнергетики является торф. Его запасы в стране — самые большие в мире: разведанные — 176 млрд т, промышленный фонд — 31 млрд т с энергосодержанием около 10 млрд т условного топлива. Однако несмотря на эти факты по имеющимся оценкам, в России задействовано лишь около 12% имеющихся биоэнергетических ресурсов [9]. По данным на 2023 год, доля биоэнергетических установок в балансе генерации в России составляет 14% среди альтернативных источников энергии. При этом совокупная мощность биоэнергетической отрасли крайне мала и составляет 2% [5]. Проблема усугубляется отсутствием единой, структурированной базы данных, содержащей полную и актуальную информацию о характеристиках различных энергоустановок, их технико-экономических показателях, сроках поставки и гарантийном обслуживании. Критерии выбора могут существенно различаться в зависимости от масштабов проекта, целевых показателей и финансовых возможностей инвестора. Кроме того, важно учитывать долгосрочные перспективы: надежность и долговечность оборудования, возможность его модернизации и экологическую безопасность. Важную роль играет также оценка жизненного цикла оборудования (LCA – Life Cycle Assessment), которая позволяет учесть все стадии, от производства до утилизации, включая затраты энергии и выбросы парниковых газов.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Целью данного исследования является выявление ограничений и проблем при выборе генерирующего биоэнергетического оборудования проектными организациями. Объектом данного исследования является система подбора биоэнергетического оборудования для теплоэнергетических установок. Предметом исследования является наличие проблем при выборе данного оборудования. Основной задачей являлся анализ методов, а также информационной доступности альтернатив при выборе оборудования на примере компании ГУП ТЭК (Государственное унитарное предприятие «Топливо-энергетический комплекс Санкт-Петербурга»)

Основная часть

ТЭК основывает свои решения на экономических критериях, а также с учетом уже установленных тесных связей с конкретными поставщиками. При просмотре открытых данных из других источников также была выявлена данная тенденция [8]. В результате компании принимают решения, ориентируясь на самые дешевые и распространенные варианты, либо на старые, но «надежные» связи, что, конечно, уменьшает вариативность, однако при этом может быть упущена возможность выбора экономически и экологически более эффективных вариантов. Биоэнергетические установки, которые часто игнорируются при выборе, могут стать альтернативой традиционным источникам энергии и улучшить имидж энергоснабжающей компании в глазах потребителя.

Далее рассмотрим проблему ограниченности выбора биоэнергетического оборудования. Российская законодательная база в области управления отходами на сегодняшний день все еще остается в значительной степени ориентированной на общие, рамочные нормы, которые не обеспечивают достаточной конкретики для эффективного решения этой важной проблемы [6]. На практике это означает, что многие ключевые понятия и инициативы, такие как внедрение наилучших доступных технологий в сфере обращения с биоотходами, существуют лишь на бумаге и не имеют реального применения. Так и в ГУП ТЭК варианты выбора биоэнергетического оборудования на данный момент даже не рассматриваются. Существующие санитарные правила, регулирующие обращение с биоотходами, ограничиваются лишь базовыми аспектами, такими как организация мест сбора и временного хранения отходов, а также их последующее размещение на свалках [6]. Территориальные схемы обращения с отходами не позволяют выявить объем спроса и предложения на технологии переработки, а производители оборудования не ориентированы на понимание баланса спроса по стране [10]. Другими словами, производители оборудования для переработки отходов не всегда имеют четкое представление о потребностях рынка, это приводит к несоответствию между предложением технологий и реальными потребностями местных и региональных систем обращения с отходами и создает барьеры для внедрения инновационных решений, которые могли бы значительно повысить эффективность переработки. В итоге отсутствие четких и обязательных норм по переработке биоотходов, а также отсутствие обоснования перспектив для

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

инвестирования приводит к тому, что многие организации и предприятия не видят смысла в инвестициях в технологии переработки, поскольку не уверены в их рентабельности.

Следующая яркая проблема при подборе биоэнергетического оборудования - отсутствие корректной, актуализированной базы данных для подбора энергетического оборудования с учетом потенциала местных топлив [10].

ГУП ТЭК СПб ориентируется исключительно на известных им поставщиков, однако при поступлении конкретных предложений, компания готова их рассмотреть. Пока таких предложений не поступает, это в свою очередь напрямую указывает на проблему, нехватки квалифицированных специалистов, способных донести информацию о генерирующем оборудовании до конечных пользователей. Это касается не только инженеров и техников, но и менеджеров проектов, экономистов и специалистов по энергоаудиту.

При запросе в поисковиках, по следующим ключевым словам: «оборудование для биоэнергетических установок», выдает лишь несколько сайтов, на которых представлены поставщики такого оборудования. Как правило такие сайты находятся на начальном этапе своего развития (примеры: Clean Energo, Eurorages и Aermec) [1] [7]. Пользователям сложно ориентироваться в таких ресурсах, так как навигация оставляет желать лучшего, отсутствуют технические характеристики оборудования. Это создаёт дополнительные трудности для потенциальных покупателей.

Заключение

Для эффективного решения проблем, связанных с подбором генерирующего биоэнергетического оборудования, необходимо реализовать комплексный подход, включающий в себя несколько ключевых аспектов. Во-первых, следует организовать масштабную информационную кампанию, направленную на повышение осведомленности специалистов в области биоэнергетики. Во-вторых, необходимо пересмотреть существующие подходы к выбору оборудования в компаниях. Это может подразумевать разработку новых методик и критериев, основанных на актуальных данных и опыте эксплуатации различных систем. Базы данных должны быть доступны для всех заинтересованных сторон и содержать не только характеристики оборудования, но и отзывы пользователей, а также результаты тестирования и исследований. Также важно учитывать международный опыт и адаптировать его к местным условиям, что позволит ускорить процесс внедрения инновационных решений и технологий.

Библиографический список

1. Справочник организаций производящих оборудование для ВИЭ / [Электронный ресурс] // Clean Energo: [сайт]. — URL: <https://www.cleanenergo.ru/organizatsii/> (дата обращения: 16.10. 2024).
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года / Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 года № 1715-р

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

3. Анализ путей повышения конкурентоспособности энергетической биомассы / [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона: [сайт]. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1769/> (дата обращения: 16.10.2024).

4. Проблемы учета фактора надежности при выборе состава генерирующего оборудования ТЭЦ на оптовом рынке электроэнергии и пути их решения / [Электронный ресурс] // Автоматика и телемеханика: [сайт]. – URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=15959&option_lang=rus/ (дата обращения: 15.10.2024).

5. Биоэнергетика: основные тенденции развития рынка и перспективы для России / [Электронный ресурс] // Первое экономическое издательство: [сайт]. – URL: <https://1economic.ru/lib/117454?ysclid=m2jl8194f975352255> // (дата обращения: 21.10.2024).

6. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» / [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/?ysclid=m2gtexhcqx99361135// (дата обращения: 20.10.2024).

7. Продукция Аермес / [Электронный ресурс] // Аермес: [сайт]. — URL: http://www.aermec.ru/Article_3.html // (дата обращения: 20.10.2024).

8. Энергетические компании: главные по закупкам / [Электронный ресурс] // Энергетика и промышленность России: [сайт]. — URL: <https://www.eprussia.ru/epr/461-462/4819515.htm?ysclid=m2gu3rii3h365373955> // (дата обращения: 20.10.2024).

9. Дорожная карта развития биоэнергетики технологической платформы биоэнергетика на период 2019-2030 / [Электронный ресурс] // Биоэнергетика в РФ: [сайт]. — URL: https://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioehnergetika.pdf // (дата обращения: 21.10.2024).

10. Аристова А.А. Концепция замкнутого ресурсного цикла с использованием инновационной информационной системы развития биоэнергетики / А.А. Аристова, О.В. Новикова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 101-114.

© Шишкина Ю.С., Новикова О.В., 2024

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научное издание

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО

*Сборник материалов
Всероссийской научно-практической конференции,
посвященной
80-летию профессора Ф.Р. Исмагилова
(г. Уфа, 30 октября – 1 ноября 2024 г.)*

Электронное издание сетевого доступа

*За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.*

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 10.12.2024 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 7,41 Мб.
Заказ 197.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007 e-
mail: ric-bdu@yandex.ru