

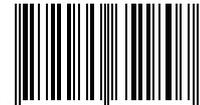


Издательский дом «Вся электротехника»

# ЭНЕРГОЭКСПЕРТ

информационно-аналитический журнал

ISSN 2075-6518



№ 1 (85)

2023

## 14 ПЕРЕМЕННЫЙ VS ПОСТОЯННОГО

### История технологий передачи электроэнергии

- 24 **Вклад ВЭИ**  
в технику СТК
- 32 **Пузырьки в силовых трансформаторах** –  
потенциальный риск для надежности сети
- 38 **Оперативная оценка технического состояния**  
и диагностика дефектов силовых  
трансформаторов в условиях эксплуатации
- 43 **Экономические аспекты использования**  
литий-ионных аккумуляторных батарей  
в составе СОПТ
- 52 **Управление спросом на электроэнергию**  
в России
- 68 **Оптимальные возможности**  
применения электромагнитных ТТ





# ЭНЕРГОПРОМАЛЪЯНС

РОССИЙСКИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ  
И ПОСТАВЩИК ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 0,4–35 КВ

Предприятие производит высоковольтные ячейки КСО ЭПА и элегазовые КРУЭ ЭПА, а также низковольтные сборки типа ШНН, ГРЩ, АВР на токи до 6300 А.

Компания имеет собственное производство блочных трансформаторных подстанций, блоки которых полностью соответствуют требованиям ГОСТ и СНиП. Это позволяет размещать оборудование в сейсмоопасных районах (до 9 баллов), а также в условиях северных регионов России.

Ежемесячный выпуск продукции составляет до 52 комплектов БКТП.

ООО «ЭП-А» имеет большой опыт работы «под ключ» на объектах по всей территории России (проектирование, поставка, шеф-монтаж, пусконаладка и оформление документации).

**ВСЕ ОБОРУДОВАНИЕ АДАПТИРОВАНО  
К ТРЕБОВАНИЯМ ПАО «РОССЕТИ»**

**Адрес производства:**  
Московская обл., г. Подольск, ул. Железнодорожная, д. 2

**Адрес офиса:**  
г. Москва, ул. Подольских курсантов, д. 3, стр. 2, офис 21  
Тел.: 8 (495) 150-72-22, 8 (800) 500-49-69  
[www.epatrade.ru](http://www.epatrade.ru) | [office@epatrade.ru](mailto:office@epatrade.ru)



**УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ**

ООО «Издательский дом «Вся электротехника»  
Адрес: 19571, Москва, проспект Вернадского, дом  
92, этаж 2, помещение VI, комната 28, офис 36

**ДИРЕКТОР**

**Посошков В. И.**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Болотин В. А.**, генеральный директор  
ОАО «МРСК Урала»

**Воротницкий В. Э.**, главный научный сотрудник  
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**Голубев П. В.**, генеральный директор  
АО «Техническая инспекция ЕЭС»

**Грбачек Е. П.**, заместитель министра энергетики РФ

**Гусев Ю. П.**, профессор НИУ «МЭИ»

**Дарьян Л. А.**, директор по научно-техническому  
сопровождению АО «Техническая инспекция ЕЭС»

**Назарычев А. Н.**, вице-президент АЭН РФ,  
профессор Санкт-Петербургского  
горного университета

**Оклей П. И.**, член правления –  
руководитель блока производственной  
деятельности ПАО «Интер РАО ЕЭС»

**Роголев Н. Д.**, ректор НИУ «МЭИ»

**Славинский А. Э.**, генеральный директор  
ООО «Завод Изолятор»

**Хренников А. Ю.**, ученый секретарь НТС –  
начальник отдела АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Россети

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

Виктор Иванович Посошков  
vivi@energyexpert.ru

**ДИЗАЙН И ВЕРСТКА**

Николай Кичатов

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ**

Надежда Жуковская

**АДРЕС РЕДАКЦИИ**

119571, Москва, проспект Вернадского, дом 92,  
этаж 2, помещение VI, комната 28, офис 36  
Тел.: (916) 591-94-24

**Обложка:** из журнала «Judge» 1889 г.

Редакция не несет ответственности  
за достоверность рекламных материалов.  
Точка зрения авторов может не совпадать  
с точкой зрения редакции.

Перепечатка, копирование материалов, опубликованных  
в журнале «Энергоэксперт», допускается только  
с письменного разрешения редакции.

Реестровая запись от 19.10.2018  
ПИ № ФС77-74030 внесена Роскомнадзором

Отпечатано в типографии  
ООО «РПК «Новые технологии»  
Москва, ул. Люблинская, 141 офис 419  
Тел.: 8 (495) 230-74-04  
http://www.adv-nt.ru

Тираж 10 000 экземпляров

Выход в свет – 22.03.2023

Свободная цена



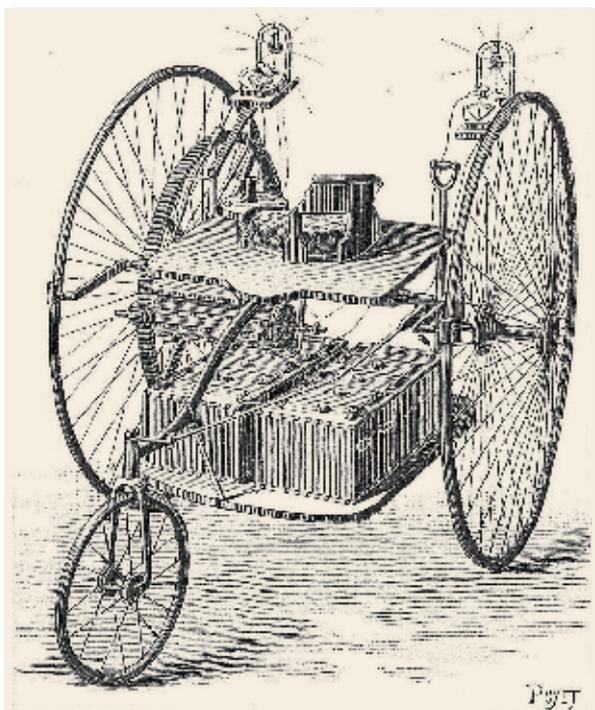
**ОТ РЕДАКТОРА**

В Соединенных Штатах Америки, на родине знаменитых писателей-сатириков Марка Твена и О. Генри, долгое время выходил в свет еженедельник «Судья» (The Judge). Будучи по жанру юмористическим, а по натуре – публицистическим, он не мог не отреагировать на Войну токов, развернувшуюся в те годы в Новом Свете. И сделал это по-своему, с каким-то глумливым, я бы даже сказал циничным, сарказмом. Картинка, которую мы поместили на обложку, взята из этого журнала. К счастью, по прошествии лет, мы усвоили, что трехфазный ток, хоть и представляет угрозу для пренебрегающих правилами безопасности индивидов, но не до такой степени, чтобы наводить страх и ужас на жителей городов. Сегодня это наиболее распространенный метод, используемый электрическими сетями во всем мире для передачи электроэнергии. И мы гордимся тем, что создатель подобной техники – наш соотечественник, Михаил Осипович Доливо-Добровольский.

За 16 лет существования нашего журнала не припомню, чтобы его главной темой стал исторический материал. Как говаривал афористичный Виктор Степанович Черномырдин: «*Никогда такого не было – и вот опять!*». Сами удивляемся. Хотя чему тут удивляться? Доктор технических наук Валерий Эдуардович Воротницкий прислал в редакцию статью, которая по важности сделанных в ней выводов как бы сама напросилась на это почетное место. Например: «*Прежде чем стать передовыми технологиями, изобретения и открытия нуждаются в эффективной поддержке государства и бизнеса*». Неоспоримый вывод? Да. Практикуемый повсеместно? Нет. И это уже вопрос воспитания будущих государственных деятелей и крупных бизнесменов. С этим убеждением не рождаются, к нему приходят осознанно. На основе изучения и глубокого уважения истории и достижений отечественной электротехники и электроэнергетики.

«*Нам есть чем гордиться и есть что беречь*». Это уже Анна Ахматова.

**Виктор ПОСОШКОВ,**  
главный редактор



## ■ БЫТЬ В КУРСЕ

- 4 Как обеспечить высокое качество в электрических сетях 35–220 кВ?
- 6 Профессиональные стандарты эксплуатационного персонала систем накопления электроэнергии: проблемы и решения
- 8 Система единого точного времени для энергообъектов и диспетчерских центров распределительных сетевых компаний
- 10 АВР на предприятии: пять решений от ЕКФ
- 12 ЭнергоПром-Альянс: наша цель – технологический суверенитет РФ

## ■ ГЛАВНАЯ ТЕМА

- 14 Уроки истории техники и технологий передачи электроэнергии во второй половине XIX века  
*Воротницкий В.Э.*

Повышение энергетической эффективности было одной из главных целей передачи электроэнергии уже на самых первых этапах ее истории, которая началась во второй половине XIX столетия. Это было время активного перехода от «века пара» к «веку электричества», время развития электрического освещения, создания первых электрических генераторов, двигателей и трансформаторов, линий электропередачи, электропривода и бытовых электроприборов. Это были годы великих изобретений и открытий, острейшей борьбы за их приоритеты. Цель статьи – вспомнить историю создания первых линий электропередачи постоянного и переменного тока и рассмотреть, что полезного из опыта этой истории мы можем использовать для нашей сегодняшней действительности.

## ■ ТЕОРИЯ

- 24 Вклад ВЭИ в технику статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности  
*Шульга Р.Н., Чуприков В. С.*

В статье рассмотрена предыстория разработки СТК на основе ртутных вентилей вплоть до 70-х годов прошлого века в ВЭИ. Выполнен анализ развития техники СТК, преобразователей и мощного испытательного стенда МИС на этапе 70–90-х годов прошлого века в ВЭИ. Показаны тенденции мирового развития электроэнергетики в части средств компенсации реактивной мощности, и вклад ВЭИ. Анализируются СТК для металлургии и электроэнергетики, разработанные в ВЭИ до 90-х годов прошлого века, техническое, организационное и кадровое обеспечение разработки, производства и ввода в эксплуатацию. Рассмотрено состояние производства СТК в настоящее время.

## ■ ПРАКТИКА

- 32 Образование пузырьков в силовых трансформаторах – потенциальный риск для надежности сети. *Кристиан Пёникер*

Силовой трансформатор (СТ) является неотъемлемой частью электрической сети, и их отказы могут серьезно повлиять на надежность сети. Одна из причин отказа СТ – образование пузырьков в изоляции обмоток. Попадая в область сильного электрического поля, пузырьки могут вызвать отказ СТ из-за пробоя. Таким образом, риск образования пузырьков является одним из основных факторов, ограничивающих нагрузку СТ.

### 38 Оперативная оценка технического состояния и диагностика дефектов силовых трансформаторов в условиях эксплуатации. Русов В.А.

В статье рассмотрен минимально достаточный и технически возможный объем диагностических тестов для проведения периодических испытаний силовых трансформаторов, по результатам которых можно с приемлемой достоверностью определять текущее техническое состояние. Предложены четыре переносных диагностических прибора, при помощи которых эти испытания и диагностические тесты могут быть выполнены. Разработано программное обеспечение оценки технического состояния силовых трансформаторов по результатам периодических испытаний, позволяющее в автоматическом режиме рассчитывать как коэффициент текущего технического состояния, так и индекс технического состояния силового трансформатора.

### 43 Экономические аспекты использования литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ Ворошилов А.Н., Хакимзянов Э.Ф., Агзамов М.Ф., Газетдинов Р.Ф.

Организация систем оперативного постоянного тока (СОПТ) на объектах электроэнергетики с использованием современного оборудования – перспективная техническая задача для производителей электрооборудования. В последнее время широко обсуждается применение литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) в качестве гарантированного источника энергии в СОПТ на высоковольтных распределительных подстанциях. В статье рассматривается экономическое обоснование использования ЛИАБ в СОПТ.

### 52 Управление спросом на электроэнергию в России: текущее состояние и перспективы развития Никишина М.В., Ивановский Д.А.

Авторами произведен анализ отечественной практики реализации механизма управления спросом. Рассмотрены и проанализированы отличительные особенности переходной модели механизма управления спросом, описан субъектный состав, а также основные правила и ограничения, применяемые ко всем участникам пилотного проекта. Подведены промежуточные итоги реализации пилотного проекта внедрения механизма управления спросом на электрическую энергию в первой и второй ценовых зонах оптового рынка.

### 58 Краткий анализ проблемных вопросов, связанных с неправильной работой РЗА. Уханов А.В.

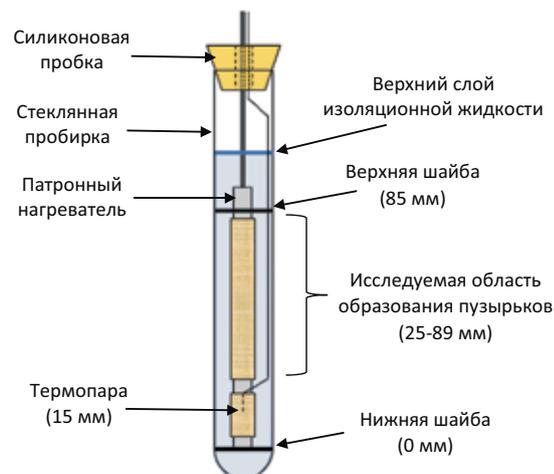
В последние годы более половины произошедших аварий с существенными негативными последствиями для функционирования ЕЭС произошли вследствие отказа или излишней работы устройств релейной защиты и автоматики. Необходимо отметить, что устранение последствий аварий по причине неправильной работы устройств РЗА, в большинстве случаев, обходятся значительно дороже, чем затраты на проведение своевременного технического обслуживания и выполнение организационных мероприятий в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов (НПА) и нормативно-технической документации (НТД).

### 62 Использование современных средств микроскопии при расследовании аварий на объектах электроэнергетики. Озорнин С.О.

В общем случае, задача микроскопии – увидеть то, что не видно вооруженным глазом. Для энергетиков, привыкших к высоким напряжениям, большим энергиям и большим габаритам оборудования, мелкие следы могут показаться малозначимыми. Но в некоторых случаях эти мелкие следы оказываются ключом к пониманию больших процессов.

### 68 Некоторые технические возможности оптимального применения электромагнитных трансформаторов тока. Балашов В.В.

В статье рассмотрены оптимальные возможности применения электромагнитных ТТ, позволяющие избежать некоторых проблем в эксплуатации микропроцессорных устройств РЗ из-за технических характеристик электромагнитных ТТ.



# КАК ОБЕСПЕЧИТЬ ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 35–220 кВ?

В рамках Международного форума «Электрические сети», состоявшемся 22–25 ноября 2023 года, прошел круглый стол «Низкое качество электроэнергии в электрических сетях 35–220 кВ, питающих электрифицированные железные дороги совместно с потребителями общего пользования. Технологии его нормализации». Организаторами выступили ТОО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод» (УККЗ) и его московское представительство ООО «Усть-Каменогорский конденсатор» при информационном партнерстве с журналом «Энергоэксперт». В мероприятии приняли участие более 40 представителей электросетевых компаний, потребителей электроэнергии и производителей устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) и повышения качества электроэнергии (КЭ), научных и проектных организаций.



Были рассмотрены технические и нормативно-правовые аспекты проблемы низкого КЭ в электрических сетях, питающих электрифицированные железные дороги совместно с потребителями общего пользования, и возможности его нормализации (приведения параметров к нормам ГОСТ 32144-2013), в том числе:

- анализ текущего положения с КЭ в электрических сетях, питающих Транссиб и БАМ;
- оценка негативного влияния искажений напряжения на потребителей;

- существующие технологии и опыт применения устройств компенсации негативного влияния резко-переменных нагрузок на питающую сеть и показатели КЭ;
- типы и мощности отечественного оборудования УКРМ и нормализации КЭ;
- правовые аспекты стимулирования потребителей, в том числе Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД», к применению технических средств, обеспечивающих нормативное КЭ в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей.

Модератором мероприятия выступил к.т.н., генеральный директор ТОО «УККЗ» В.В. Аксенов. В обсуждении проблем, заявленных в программе круглого стола, с докладами, сообщениями и выступлениями приняли участие: В.В. Аксенов, В.С. Чуприков, С.В. Павленко, Н.А. Ершов, А.И. Демин, С.И. Гусев, Ю.А. Дементьев, Д.Н. Ярош, Л.И. Коверникова, Н.Л. Новиков, Р.Г. Шамонов, В.Э. Воротницкий.

По результатам дискуссии на круглом столе были сделаны нижеследующие выводы.

1. Отсутствие на тяговых подстанциях (ТПС) ОАО «РЖД» устройств КРМ и нормализации КЭ, в первую очередь в дефицитных энергорайонах Забайкальской, Амурской и Хабаровской энергосистем, **приводит к регулярным нарушениям нормативных требований по показателям КЭ, характеризующим искажения синусоидальности, несимметрию и колебания напряжения.**

2. Искажения тока и напряжения, многократно превышающие предельные значения по ГОСТ 32144-2013, вызванные работой тяговых подстанций, **распространяются по электрическим сетям на сотни километров от искажающей нагрузки и вызывают нарушения в работе и повреждения оборудования прочих потребителей.**

3. Выпускаемые в РФ быстродействующие пофазно-регулируемые

полупроводниковые УКРМ типа СТК и СТАТКОМ позволяют обеспечить электромагнитную совместимость переменной железнодорожной нагрузки с питающей сетью и нормализовать показатели качества электроэнергии в точках передачи электрической энергии тяговым подстанциям согласно ГОСТ 32144-2013, но **остаются пока не востребованными** из-за отсутствия экономических стимулов к их применению. Устанавливаемые на ряде подстанций ПАО «ФСК ЕЭС» управляемые шунтирующие реакторы выполняют исключительно системные функции и влияют на КЭ только в части снижения отклонений напряжения.

Электросетевые компании, прежде всего ПАО «ФСК ЕЭС», разрабатывают и реализуют мероприятия по компенсации искажений на своих подстанциях. При этом возникает необходимость установки УКРМ экстраординарно большой мощности, что не позволяет обосновать целесообразность подобных затрат при утверждении инвестиционных программ в регулирующих органах. В результате, каждое «неискажающее» промпредприятие для обеспечения надежной работы чувствительных к качеству напряжения нагрузок **вынуждено самостоятельно решать** вопрос доведения КЭ до норм ГОСТ путем установки УКРМ непосредственно на собственных объектах.

**4. Нормализация показателей качества питающего напряжения для локальной нагрузки практически не влияет на качество электроэнергии в примыкающей высоковольтной сети, а, следовательно, и в электроустановках других не искажающих потребителей.**

**5.** В энергорайонах, расположенных вблизи источников электроэнергии, отличающихся высокими уровнями мощности короткого замыкания (МКЗ), проблем с низким КЭ в связи с наличием электротяги, как правило, не возникает в нормальных режимах (исключение вызывают ремонтные режимы электросетей). Примером являются западносибирские и центрально-сибирские участки Транссиба. В частности, ВЛ 500 кВ Иркутск-Чита, построенная в 90-е годы вдоль Транссиба, повысила МКЗ в регионе

его прохождения, что во многом обеспечивает отсутствие здесь проблем с КЭ. То же можно сказать об эффекте нормализации КЭ на Дальнем Востоке в результате строительства в 2000-е годы сети ВЛ 500 кВ для выдачи мощности Бурейской ГЭС. Развитие электрических сетей 220–500 кВ Восточной Сибири и Дальнего Востока безусловно будет способствовать росту МКЗ и снижению уровней искажений. **Однако и это не позволит обеспечить нормированное КЭ с учетом планов по увеличению тяговых нагрузок в регионе на 2 ГВт.**

**6.** Как показывают расчеты, наиболее эффективным решением проблемы низкого КЭ в магистральных сетях, примыкающих к Транссибу и БАМу, является установка на тяговых подстанциях ОАО «РЖД» трехфазных компенсирующих устройств с пофазным управлением типа СТК и СТАТКОМ. Для стимулирования их применения в договорах о присоединении тяговых подстанций к электрической сети и договорах об электроснабжении существующих ТПС было бы целесообразно указать не только требование об их установке, но и **предусматривать систему скидок и надбавок за пользование электроэнергией за исполнение этого пункта в размере, обеспечивающем нормативный срок окупаемости УКРМ. В этом может помочь нормирование в части обременения технических условий на подключение искажающих нагрузок к сети в зависимости от отношения МКЗ в точке присоединения к установленной мощности нагрузки, как это делается в энергокомпаниях за рубежом.**

**7.** В рамках разработки и практической реализации этапов Федерального проекта «Развитие железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона железных дорог» для достижения его целей и решения поставленных задач необходимо разработать и внедрить **Программу установки на ТПС ОАО «РЖД» УКРМ и других средств обеспечения КЭ в районах Забайкалья, Восточной Сибири и Дальнего Востока.**

**8.** Высокое КЭ в электрических сетях может быть обеспечено только

**при условии стимулирования применения современных УКРМ потребителями** на государственном уровне, что требует принятия соответствующих законов, формирующих тарифную политику Российской Федерации в этой области.

**9.** Для стимулирования обеспечения нормативных значений показателей КЭ необходимо разработать и ввести в действие удовлетворяющие современным требованиям следующие нормативные документы:

- правила присоединения «искажающих» потребителей к сети общего пользования по условиям влияния на КЭ и режим потребления реактивной мощности;
- правила применения и шкала скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за качество электроэнергии и компенсацию реактивной мощности;
- методики определения долевого вклада «искажающих» потребителей в суммарное нарушение КЭ, размера и стоимости возмещения убытков от низкого КЭ на рынках электроэнергии;
- технический регламент «Требования к качеству электрической энергии» с формами и правилами подтверждения соответствия этим требованиям в точках поставки электроэнергии;
- правила и порядок непрерывного мониторинга показателей КЭ на границах между сетевыми компаниями и потребителями (в первую очередь, в узлах присоединения к магистральным электрическим сетям оптовых потребителей электроэнергии с мощными искажающими нагрузками, в частности, тяговых подстанций РЖД);
- отраслевой стандарт «Методика оценки системного экономического эффекта от установки и применения регулируемых УКРМ различных типов в магистральных и распределительных электрических сетях»;
- отраслевой стандарт «Методика оценки влияния БСК на уровни гармонических составляющих токов и напряжений при присоединении к магистральным и распределительным электрическим сетям, питающим мощные нелинейные нагрузки».

# ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

**ГОНЧАРОВ В.А.**, технический директор КЭУ им. А.Ф. Дьякова

**МИЩЕРЯКОВ С.В.**, генеральный директор КЭУ им. А.Ф. Дьякова, к.т.н., д.э.н.

**ЧЕРКАСОВ В.Б.**, директор образовательных программ КЭУ им. А.Ф. Дьякова, к.т.н., профессор

Бурный рост рынка ВИЭ потребовал новых технологий компенсации волатильности баланса производства и потребления электроэнергии, экономическая целесообразность отказа от материалоемких и дорогостоящих систем обеспечения качества энергии, поставляемой потребителю, и изменение позиции потребителя на рынке электроэнергии и мощности определили необходимость и возможность создания систем накопления электрической энергии на базе литий-ионных аккумуляторов (СНЭЭ). С одной стороны, разные режимы использования (не эксплуатации) и, соответственно, разные требования к персоналу, с другой, принципиально отличающиеся технологии накопления ставят проблему формирования содержания трудовых функций, компетенций, необходимых для специалистов в области систем накопления электрической энергии. В предлагаемой статье представлены подходы разрешения этих проблем на современном уровне с использованием организационных технологий.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, системы накопления электрической энергии, литий-ионные аккумуляторы, кадровое обеспечение, компетенции, трудовые функции, концепты

Развитие возобновляемых источников энергии и постоянно растущие требования к качеству поставляемой потребителю электроэнергии сформировали потребность в накопителях электрической энергии.

Оставив в стороне во многом политизированные дискуссии о степени «зелености» перспективах применения этих технологий, мы рассмотрим простые проблемы, с которыми сталкиваются энергетики при эксплуатации ветряных и солнечных электростанций (ВЭС и СЭС соответственно). Эпицентр этих проблем – комплекс систем компенсации колебаний несомой этими ВЭС и СЭС нагрузки в зависимости от погодных условий.

Абсолютные значения колебаний значительны, что подтверждают события, связанные с энергодефицитом в Германии и других странах ЕС зимой 2022 года. Из анализа

этих событий следует вполне практический вывод, что для надежного электроснабжения потребителей необходимы системы компенсации энергодефицита.

Другой не менее важной проблемой современной энергетики является обеспечение качества потребляемой энергии. Его обеспечение может быть обеспечено за счет применения систем с гарантированными (опорными) характеристиками качества. И третьей из самых важных является проблема энергоснабжения автономных потребителей (аварийных АЭС, пример – катастрофа на АЭС Фукусима 1, космос, транспорт и т.д.).

Эти и многие другие проблемы разрешаются за счет внедрения систем накопления электроэнергии. Побочным (но далеко не второстепенным) эффектом внедрения промышленных систем накопления электрической

энергии со временем может стать снижение роли синхронной работы генераторов, так как с появлением систем накопления снижается значение сведения единомоментного баланса производства и потребления электроэнергии, так как потребление может быть обеспечено за счет ранее накопленной энергией. Рынок систем накопления на сегодня достаточно динамичен, его рост в мире за 2022 год составляет не менее 12 % [1].

Особенность СНЭЭ: многофункциональность, позволяющая одновременно создать несколько экономических эффектов.

Возможные направления применения СНЭЭ:

- энергетический арбитраж;
- вращающийся резерв;
- регулирование частоты;
- повышение качества электроэнергии, в том числе уровней напряжения;

- аварийное восстановление электроснабжения;
- обеспечение договорных поставок электроэнергии;
- ликвидация перегрузки ЛЭП;
- перенос сроков сетевого строительства;
- снижение затрат на покупку электроэнергии, в том числе по модели ценозависимого снижения потребления;
- снижение затрат на покупку мощности, в том числе по модели ценозависимого снижения потребления;
- интеграция ВИЭ в энергосистему;
- автономное энергоснабжение.

Таким образом, перспективы систем накопления электроэнергии достаточно оптимистичны.

Их внедрение должно учитывать ряд особенностей. По результатам опроса, сделанным Академией электротехнических наук, существует ряд таких особенностей:

- изготовлением СНЭЭ занимаются финансово устойчивые компании, так как это технически сложные и дорогие изделия;
- заявленный опыт работы в теме СНЭЭ на первый взгляд коррелирует

с появлением интереса к ВИЭ (ДПМ-1) после чего СНЭЭ стало более самостоятельной единицей, а не только дополнением к ВИЭ (просчитали иные окупаемые способы применения);

■ декларируемые параметры линеек продукции, очевидно, превышают параметры реализованных и запланированных проектов, что сделано из маркетинговых соображений;

■ с точки зрения комплектующих, наиболее представлены производители АБ, так как они используются не только в СНЭЭ;

■ как любое комплексное изделие, СНЭЭ – результат производственной кооперации, компаний полного цикла нет, что определяется разными моделями производства и бизнеса, например, для производителей компонент СНЭЭ и готовых решений

Одной из самых важных проблем широкого внедрения СНЭЭ становится кадровое обеспечение этого направления развития электроэнергетики. Это обеспечение невозможно без внедрения инновационных подходов к его реализации. В этой связи новые технологии формирования

человеческого капитала СНЭЭ через технологии профессиональных стандартов является новым и по форме, и по содержанию.

Проект профессионального стандарта «Специалист по эксплуатации систем накопления электрической энергии на основе электрохимических аккумуляторов», квалификации эксплуатационного персонала СНЭЭ и образовательной программы его обучения, разработанные для реализации инновационных технологий, реализуют новые подходы не только в технике, но и в формировании человеческого капитала ее использования. Работа над стандартом подтверждает межотраслевой характер современных инновационных проектов и является акселератором развития энергетики в различных ее направлениях.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Россихин Д.А., Выприцкая Т.В., Сидорова А.В.* Системы накопления электроэнергии: перспективы и потенциал развития. «Энергия единой сети», № 3, 2021 г с.18–22.



**КЭУ начал работу по подготовке соревновательных мероприятий 2023 года**

**В этом году предполагается 5 соревнований:**



- оперативного персонала тепловых электростанций (Сочи, октябрь);
- специалисты химических лабораторий (Москва, апрель);
- специалисты РЗА (Москва, май);
- дежурные электромонтеры (Москва, ноябрь);
- специалисты по охране труда (Москва, декабрь).



на правах рекламы

# СИСТЕМА ЕДИНОГО ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ И ДИСПЕТЧЕРСКИХ ЦЕНТРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ КОМПАНИЙ

БОГДАНОВ Е.А., ИВАНОВ А.Н., КОЛЬЦОВ П.А., ШВАРЦ М.Н., АО «ОЭК»

Ужесточение требований к точности и надежности системной шкалы времени (ШВ) в электроэнергетике, а также изменения в геополитической обстановке приводят к необходимости пересмотра существующих способов организации синхронизации ШВ. АО «ОЭК» разработал методические рекомендации «Система обеспечения единого точного времени (СЕТВ) на объектах высоковольтных сетей».

В начале тысячелетия в связи с появлением доступного микропроцессорного оборудования началось его массовое внедрение в составе управляющих и вспомогательных систем энергообъектов (электрических подстанций) в РФ. Такие системы как релейная защита и автоматика, телемеханика и т.д. стали строиться на базе микроконтроллеров, в составе которых реализованы часы, позволяющие принимать и хранить данные о системной шкале времени (ШВ).

Это открыло возможность относительно просто регистрировать текущие данные о событиях и параметрах электрических сетей с привязкой их к шкале времени. Одновременно увеличилось количество регистрируемых параметров, что в совокупности позволяет достаточно подробно проанализировать события, которые произошли в сетях при технологических нарушениях (отключение электрической подстанции, неправильная работа вспомогательных систем и т.п.), и определить, какие события предшествовали нарушению и какие из них стали его причиной.

При этом ШВ должна быть для предприятия не только единой, но и точной, то есть соответствовать единой шкале времени РФ. Это необходимо для обмена параметрами между разными предприятиями (например, передача информации от энергообъектов системному оператору), расследования технологических нарушений, затрагивающих энергообъекты нескольких предприятий. В связи с этим, в управляющих и вспо-

могательных системах должна использоваться единая шкала всемирного координированного времени UTC.

В подавляющем большинстве случаев ШВ на энергообъектах (высоковольтных подстанциях) формируется на основе данных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и/или GPS. В ГНСС передаются данные о ШВ национального эталона, реализующего ШВ UTC. В частности, в системе ГЛОНАСС передаются данные ШВ UTC, воспроизводимой российским государственным эталоном времени и частоты (ГЭВЧ) — UTC(SU).

Вместе с тем данные о шкале времени ГЭВЧ также могут быть получены по наземным каналам связи с использованием специальных устройств синхронизации ШВ, как это реализовано, например, в аэрокосмической отрасли, железнодорожной инфраструктуре, военных системах т.п.

С увеличением функциональности автоматики и систем управления оборудованием появляется возможность обработки большего количества событий с меньшим интервалом времени между ними. В связи с чем требования к точности сигналов ШВ возрастают. Например, если для более ранних стандартов МЭК 60870-103/104 вполне хватало точности синхронизации ШВ в 1 мс с помощью протоколов времени NTP/SNTP, то для нового стандарта МЭК 61850-9.2 требуемая точность ШВ составляет уже 1 мкс.

Таким образом, надежность приема сигналов точного времени стала суще-

ственно влиять на надежность работы автоматики подстанции. Раньше перебои в приеме сигналов точного времени не приводили к значимым последствиям и лишь усложняли анализ событий. В современном оборудовании, использующем в своей работе протокол МЭК 61850-9.2, сбой или некорректная работа системы точного времени может приводить к нарушению его работы, что уже наблюдалось в энергосети АО «ОЭК».

Кроме того, единая точная ШВ – необходимое условие для реализации возможностей диагностики развития дефектов оборудования (посредством мониторинга событий) до отказов и аварий. В совокупности с предиктивной аналитикой это позволяет своевременно проводить изменение режимов работы и/или ремонты оборудования, выработать управленческие решения о его дальнейшей эксплуатации или замене. Для этого необходимо анализировать информацию о параметрах работы оборудования, поступающую от систем управления и мониторинга, устанавливать с помощью математического аппарата (например, машинного обучения) причинно-следственные связи наступления одних событий после других. Только корректное расположение параметров событий на ШВ позволит сформировать адекватные причинно-следственные связи.

При этом метка времени также сама по себе является параметром работы оборудования. Например, кроме положения коммутационного аппарата необходимо знать время его срабатывания

и время его работы (на отключение, на включение), момент короткого замыкания, время реакции защиты и т.д.

Подходы по применению мониторинга, предиктивной аналитики, требующие единой и точной ШВ, закреплены в приказах Минэнерго о правилах технического обслуживания и ремонта оборудования и систем подстанций от 25.10.2017 № 1013 и 13.07.2020 № 555, в указе Президента РФ о развитии искусственного интеллекта от 10.10.2019 и в методических рекомендациях по цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием от 6 ноября 2020 года.

В свете вышеизложенного, а также текущей геополитической обстановки, надежное обеспечение сигналами единого точного времени управляющих и вспомогательных подсистем энергообъектов распределительной сетевой компании (РСК) становится все более актуальным. Для реализации СЕТВ необходимо решить три основные задачи:

- формирование в рамках предприятия единой системной ШВ, соответствующей шкале времени UTC(SU) с точностью не хуже 1 мс, для обеспечения меток времени в журналах событий SCADA-систем;
- формирование ШВ с точностью лучше 1 мкс для оборудования, использующего протокол 61850-9.2;
- обеспечение длительной стабильности ШВ с заданной точностью, а также исключение зависимости от приёма сигналов ГНСС.

В существующей в АО «ОЭК» системе единого времени имеются следующие проблемы:

- отдельные системы на подстанциях используют данные о ШВ от различных источников, что может приводить к расхождению ШВ на подстанции;
- большое количество отдельных источников точного времени избыточно, при этом отказ конкретного приведет к потере ШВ для части оборудования;
- некоторые системы и оборудование используют сигналы точного времени от серверов из сети Интернет, при этом их надёжность и точность неизвестны;
- имеются зарегистрированные факты сбоев работы серверов точного времени АСУ ТП по причине постановки преднамеренных внешних помех для приёма сигналов ГНСС. Сбои также могут возникать и по иным причинам: индустри-

альные помехи, помехи от мешающих передатчиков, постановка помех типа «спуффинг» — подмена реальных сигналов ГНСС ложными сигналами, аварии в работе ГНСС, отключение ГНСС ввиду военных действий или санкций;

- прием сигналов точного времени от системы GPS является ненадежным решением ввиду возможного ее отключения или неправильной работы.

Анализ опыта построения СЕТВ в других отраслях показал, что возможно несколько вариантов повышения надежности приема и распределения по сети ШВ:

- применение резервированного централизованного решения, то есть использование единых общих ведущих часов предприятия;
- создание ведущих часов предприятия на базе квантовых эталонов частоты с получением сигналов единого точного времени от ГЭВЧ или либо от ведущих часов сторонних организаций;
- применение наземных каналов сетевой связи для приёма и распределения сигналов точного времени.

Совместное применение этих методов позволит сделать СЕТВ независимой от надежности приема сигналов ГНСС. В то же время приемники ГНСС могут использоваться в качестве резервных для ведущих или станционных часов для повышения надёжности и устойчивости СЕТВ в различных условиях работы сети связи.

В общем случае СЕТВ может состоять из следующих подсистем:

- подсистема ведущих часов РСК на базе квантовых стандартов частоты с приемом ШВ от ГЭВЧ по наземным каналам связи. Эти часы также могут иметь в своем составе встроенные приемники сигналов ГНСС в качестве резервных источников ШВ. Кроме того, при потере всех источников ШВ в них должен быть реализован режим хранения ШВ (хронирование) по сигналам системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС), обеспечивающий тактирование внутреннего генератора часов сигналами эталонной частоты. Это обеспечит поддержание ШВ с высокой точностью на время восстановления связи с ГЭВЧ или работы приёмников ГНСС;
- подсистема подстанционных часов для формирования, хранения и передачи ШВ оборудованию потребителей по сетевым протоколам времени NTP/ SNTP или PTP. Эти часы должны получать ШВ

от ведущих часов предприятия, а в качестве резерва использовать встроенные приемники сигналов ГНСС. Кроме того, при потере всех источников ШВ в них также должен быть реализован режим хранения ШВ (хронирование) по сигналам системы ТСС, синхросигналы которой формируются от первичного эталонного генератора (ПЭГ) или от резервного первичного эталонного источника (ПЭИ);

- подсистема первичного эталонного источника (ПЭИ) частоты и времени, способного длительно автономно хранить и воспроизводить частоту и время с необходимой точностью.

- сеть связи для передачи сигналов ТСС и ШВ:

- IP-сеть передачи данных с поддержкой синхронного Ethernet и протокола PTP с профилем настроек по рекомендации МСЭ-T G.8275.1(2) либо по стандарту МЭК 61850,
- сеть связи SDH для передачи ШВ в потоках E1 с помощью специальной аппаратуры распределения времени (APCB),
- выделенные оптоволоконные линии связи для передачи ШВ в протоколе PTP.

Выбор конкретного способа передачи ШВ должен осуществляться с учетом имеющейся к моменту строительства СЕТВ инфраструктуры в РСК.

## ВЫВОДЫ

Необходим пересмотр существующих способов организации синхронизации ШВ от децентрализованных решений в пользу централизованных и резервированных со способностью длительно сохранять заданные параметры точности ШВ в автономном режиме.

Актуальность строительства СЕТВ в РСК заставляет более широко рассматривать проблему обеспечения ШВ на объектах отрасли. Появляется задача строительства нескольких технологически связанных СЕТВ с единой ШВ, в том числе для системного оператора, электросетевых компаний, генерации, крупных потребителей.

Целесообразно создать отраслевую нормативную базу, в основу которой можно положить имеющиеся в АО «ОЭК» наработки — методические рекомендации «Система обеспечения единого точного времени на объектах высоковольтных сетей АО «ОЭК» и результаты проектирования СЕТВ.

# АВР НА ПРЕДПРИЯТИИ: ПЯТЬ РЕШЕНИЙ ОТ ЕКФ

Цифровизация и автоматизация процессов уже несколько лет в числе основных приоритетов развития всех секторов российской экономики. Комплексные решения для управления сложными производственными процессами включают в себя программные продукты и оборудование, которое поддерживает функции дистанционного управления. Одни предприятия доверяют только проверенным временем типовым схемам, другим нужны принципиально новые технологические решения. Чтобы удовлетворять любым запросам промышленности, нужна мощная база. Какая, расскажем в нашей статье.



Устройство АВР МСВ ЕКФ PROxima предназначено для обеспечения резервным электроснабжением нагрузки, подключенной к системе электроснабжения, имеющей основной и резервный вводы. Устройство АВР автоматически подключает резервную линию питания в случае пропадания напряжения на основной линии. Устройство выполнено в виде моноблока и состоит из блока управления и двух модульных автоматических выключателей. На блоке управления имеется рычаг ручного переключения. Такая конструкция позволяет уменьшить габариты и площадь установки АВР

Типовые и индивидуальные технологические решения невозможны без производственной базы: конструкторского бюро, изготовления продукции, лаборатории по контролю качества и соответствия товаров ГОСТу. У ЕКФ эта производственная база есть, бренд более 20 лет разрабатывает и производит электрооборудование для промышленности и девелопмента.

В ассортименте свыше 16 000 наименований, и он регулярно обновляется. Это позволяет создавать как типовые, так и нестандартные решения по вводу, распределению электроэнергии, автоматизации и управлению сетями. На базе продукции ЕКФ можно собрать электрорешения любой сложности.

## ЭКСПЕРТИЗА В ГОТОВЫХ РЕШЕНИЯХ

Все проекты разрабатываются в соответствии с запросом и техническими требованиями заказчика. Для одной и той же задачи может быть несколько решений. В данном материале представим пять вариантов реализации автоматического ввода резерва – АВР.

Для АВР мы поставляем стандартный набор комплектующих: автоматические выключатели – воздушные и в литом корпусе, контакторы различных конфигураций, элементы сигнализации, управления и электромонтажа. Но кроме самих комплектующих мы предлагаем несколько вариантов управления АВР.

**Первый вариант – компактное устройство АВР МСВ.** Оно состоит из блока управления и двух модульных автоматических выключателей для трехполюсного подключения и токов до 63 А. Преимущества устройства: занимает мало места, защищает от короткого замыкания и имеет устройство механической блокировки.

**Второй вариант – моноблочное устройство ТСР1.** Данное устройство выполнено на базе двух разъединителей. Оно предназначено как для трехполюсного, так и для четырехполюсного подключения и рассчитано на токи до 400 А. В этом устройстве есть как механическая, так и электрическая взаимоблокировка.

**Программируемый контроллер F100 12 в/в PRO-Logic EKF**

предназначен для выполнения логических операций по заданной программе. Способен решать задачи любого уровня сложности. Используется для повышения энергоэффективности, безопасности и цифровизации предприятий всех сфер деятельности



**Управление**

- Двигатели
- Нагреватели
- Холодильные установки



**Сбор и передача данных**

- OPC-сервер
- SCADA-система



**Контроль**

- Переключатели
- Параметры среды
- Счет и положение



**Человеко-машинный интерфейс**

- Панель оператора
- Индикаторы

**Третий вариант – трехполюсное устройство автоматического ввода резерва АВР ТСМ.** Это устройство снабжено интеллектуальным контроллером с жидкокристаллическим дисплеем для удобного параметрирования. Широкий функционал включает:

- защиту от пропадания фазы;
- защиту от повышенного или пониженного напряжения;
- функцию задержки переключения;
- пожарную сигнализацию (выключение электропитания при пожаре);
- настройку логики переключения;
- защиту от КЗ и перегрузки;
- обеспечивает механическую и электрическую взаимоблокировку.

**Четвертый вариант – релейный контроллер АВР AVR для реализации схемы клиента на базе контакторов.** На нем можно настроить время отключения/включения и регулировать минимальное напряжение. Решения на основе релейного контроллера создаются под индивидуальные параметры установок заказчика и зависят от его технологических процессов.

**Пятый вариант – АВР можно реализовать на базе логического контроллера Pro-Logic для точной пользовательской настройки системы АВР и его диспетчеризации.** Для этого в автоматических

выключателях AV Power добавляется функционал передачи данных о текущих параметрах тока и информации о причинах отключения автомата. Такую систему можно контролировать удаленно, а с помощью мотор-привода ей можно и управлять удаленно.

**ГОТОВЫЕ РЕШЕНИЯ**

Мы выпустили первый в России каталог готовых решений АВР для любых задач. Для каждого решения приведена принципиальная схема, поясняющие схемы и спецификация. Мы также показываем расположение оборудования на монтажной плате и расположение органов управления на панели шкафа. Комплексные решения EKF позволяют упростить проектирование электроустановок с устройствами автоматического ввода резерва, отвечают современным требованиям и позволяют реализовать системы АВР на высоком техническом уровне.

**ЛОГИСТИКА**

Последние семь лет локализация производства – один из основных приоритетов EKF. У нас два завода во Владимирской области и современные логистические центры. Это позволяет нам оптимизировать время на сборку и доставку необходимого оборудования.

**ПОДДЕРЖКА**

Хорошо, если клиент знает, какое из инженерных решений ему подходит, и может выбрать его в каталоге на нашем сайте. А если не знает, то EKF поможет: мы проведем анализ потребностей вашего бизнеса и предложим наиболее эффективные варианты, как их удовлетворить.

Кроме производства и поставки, EKF возьмет на себя создание программного обеспечения, обучение по продукции и сервисную поддержку. Каждому проекту назначается менеджер, который работает с запросами и в случае необходимости подключает к решению вопросов компетентных специалистов – программистов, инженеров, оператора по качеству продукции. Благодаря слаженной командной работе уровень удовлетворенности наших клиентов (оценка NPS) в 2022 году вырос на 25 %.

У EKF есть опыт и возможности для создания электрорешений под любые запросы промышленности – от оборудования для ввода и распределения электроэнергии, до локальной автоматизации. Чтобы узнать больше о нашей продукции и реализованных кейсах, переходите на сайт [ekfgroup.com](http://ekfgroup.com) и подписывайтесь на рассылку. А если у вас есть вопросы, свяжитесь с нами любым удобным вам способом, мы будем рады вам помочь!



**Адрес центрального офиса:** 127273, «Технопарк Отрадное», г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, строение 9  
**Тел.:** +7-495-788-88-15, 8-800-333-88-15 (многоканальный)  
**E-mail:** [info@ekf.su](mailto:info@ekf.su)

# ЭНЕРГОПРОМ-АЛЬЯНС: НАША ЦЕЛЬ – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ РФ

Главное направление развития компании ЭнергоПром-Альянс – производство высокоавтоматизированных блочно-модульных трансформаторных и распределительных подстанций в бетонном корпусе для их применения в составе Цифрового РЭС.

Высокоавтоматизированные БКТП, БРП и БРТП производства ООО «ЭнергоПром-Альянс» могут интегрироваться в существующие и проектируемые системы Цифрового РЭС, работают в комплексе с системой автоматизации воздушных линий с использованием реклоузеров, поддерживают любые протоколы обмена данными, в том числе МЭК 61850 (-8-1 и -9-2).

Высокоавтоматизированные БКТП, БРП и БРТП производства ООО «ЭнергоПром-Альянс» позволяют:

■ выполнять непрерывный мониторинг состояния оборудования:

- силовых трансформаторов (состояние изоляции, термоконтроль, параметры нагрузки),
- распределительных устройств среднего напряжения 6(10)/20/35 кВ (состояние изоляции, термоконтроль, состояние приводов коммутационных аппаратов, механический и коммутационный ресурс),
- распределительных устройств низкого напряжения до 1000 В (термоконтроль, состояние приводов коммутационных аппаратов);

■ выполнять мониторинг параметров сети высокого и низкого напряжения, в том числе параметров качества э/э;

■ выполнять автоматизированный учет э/э на стороне высокого и низкого напряжения на всех присоединениях;

■ определять повреждения на кабельных линиях 6(10)/20/35 кВ (вид аварии, участок фидера) на основе синхронизированных векторных измерений (СВИ) для сокращения времени вывода в ремонт аварийных участков фидеров;

■ выполнять передачу информации о положении коммутационных аппаратов и выполнять телеуправление коммутационным оборудованием;

■ выполнять контроль пожарной и охранной сигнализации и видеонаблюдение;

■ передавать информацию на верхний уровень по GSM и иным каналам связи.

**В рамках реализации программы технологического суверенитета Российской Федерации компания ЭнергоПром-Альянс представила ряд ключевых распределительных устройств и электроаппаратов собственного производства, замещающих ранее широко применявшегося оборудования компаний, отказавшихся от контактов с РФ (Шнайдер Электрик, АББ, Сименс, Итон):**

■ КРУЭ ЭПА на напряжение 10, 20 и 35 кВ, выполненное в соответствии с техническими требованиями ПАО «Россети» и российских сетевых и промышленных компаний.

КРУЭ ЭПА производится и поставляется потребителям в РФ уже более 3-х лет, однако для соответствия требованиям ПАО «Россети», в КРУЭ было внесено около 50 конструктивных изменений, которые позволили КРУЭ ЭПА не только сравниться с ранее широко используемыми электро-

аппаратами типа SE RM6/SM6, ABB SafeRing/SafePlus, Siemens 8DJH/NXPLUS X/8DA, Eaton Xiria, но и превзойти их по целому ряду эксплуатационных характеристик.

КРУЭ ЭПА имеет следующие особенности и преимущества:

- рабочее напряжение – 10, 20 и 35 кВ;
  - номинальный ток главных цепей – 630, 800, 1000 и 1250 А;
  - номинальный ток сборных шин – 630 и 1250 А;
  - ток КЗ – 20 и 25 кА;
  - механический ресурс силового вакуумного выключателя – 10 000 циклов В/О;
  - коммутационный ресурс отключения полного тока КЗ – 30 отключений;
  - механический ресурс выключателя нагрузки и заземлителя – 3000 операций;
  - может поставляться как отдельными ячейками, так и моноблоками до 5 функций в моноблоке;
  - может использоваться как РУВН в ТП, так и в РП, РТП, КРУ. Все ячейки имеют идентичный дизайн, панель управления, одинаковую компоновку и одинаковое обслуживание. Единый тип КРУЭ ЭПА заменяет несколько принципиально разных КРУЭ компаний из недружественных стран (например, и RM6 и SM6, 8DJH/NXPLUS C/8DA), что несомненно удобно как при проектировании, так и при монтаже, наладке и, главное, эксплуатации.
- В КРУЭ ЭПА для ПАО «Россети» реализованы привычные для эксплуатации технические решения, ранее хорошо зарекомендовавшие себя в КРУЭ RM6:
- внешние испытательные втулки с внешним контуром заземления для испытания кабеля без открытия двери кабельного отсека;



КРУЭ ЭПА

- увеличенная высота кабельных отсеков (вместо опционного цоколя);
- полная локализация кабельных отсеков;
- применение терминалов РЗА не требующих оперативного питания, в том числе в возможности РАС (чего не было у RM6 и аналогов);
- возможность установки системы направленного определения повреждения кабельной линии;
- схема вторичной коммутации полностью идентична RM6, что позволяет применять существующие типовые решения по АВР, АСУ ТП и АИИС КУЭ;
- габаритные и установочные размеры, приближенные к RM6, позволяющие производить замену ранее установленным КРУЭ Однако КРУЭ ЭПА превосходит КРУЭ типа RM6 по целому ряду параметров:

- существенно более высокий механический и коммутационный ресурс силового вакуумного (против элегазового в RM6) выключателя, выключателя нагрузки и разъединителей-заземлителей;
- применение в базовом исполнении российского терминала РЗА с функцией РАС (регистрация аварийных событий);
- наличие непрерывной диагностики состояния изоляции, в том числе с передачей информации в АСУТП;
- возможность климатического исполнения на -40, -50 и 60 °С;
- высокая гибкость возможных конфигураций для ТП и РП/РТП.

Компания ООО «ЭнергоПром-Альянс» применяет КРУЭ ЭПА в производимых БКТП 10(20, 35)/0,4 кВ, БРП/РТП 10(20) кВ и даже в КТПБ 35/6 (10, 20) кВ и в качестве РУ-35 кВ и РУ-6 (10, 20) кВ, в том числе двухэтажного исполнения.

Компания ЭнергоПром-Альянс серийно производит низковольтные распределительные устройства типа ШНН и ГРЩ, в которых ранее широко использовались комплектующие из недружественных стран – вертикальные разъединители-предохранители Jean Muller и ABB, выключатели нагрузки Technoelectric и ABB.

Для замены данных электроаппаратов ЭнергоПром-Альянс в кратчайшие сроки освоило:

■ **ВНР** (выключатель-предохранитель-разъединитель) на весь номинал токов. ВНР по техническим характеристикам и обслуживанию полностью идентичен ранее применявшимся аппаратам Jean Muller:

- имеет аналогичный коммутационный узел;
- имеет аналогичные габаритные и присоединительные размеры;

- все требования эксплуатации ранее внедренные на аппаратах Jean Muller реализованы на ВНР;
- для обслуживания ВНР используется имеющийся у эксплуатации инструмент для Jean Muller.

■ **ВНВР** (выключатель нагрузки) на весь номинал токов. ВНВР по техническим характеристикам и обслуживанию полностью идентичен ранее применявшимся аппаратам Technoelectric и ABB:

- имеет аналогичный коммутационный узел;
- имеет аналогичные габаритные и присоединительные размеры;
- все требования эксплуатации ранее внедренные на аппаратах Technoelectric и ABB реализованы на ВНВР;
- обслуживание ВНВР аналогично ранее применяемым аппаратам Technoelectric и ABB.

*Подводя итог проделанной ООО «ЭнергоПром-Альянс» работы по достижению РФ технологического суверенитета, мы можем уверенно сказать, что наша компания не только реализовала первоочередные задачи этой программы в кратчайшие сроки, но и повысила технические и эксплуатационные характеристики применяемого оборудования, а значит и повысила характеристики итогового продукта – комплектных БКТП, БРП/БРТП.*



Росэнергофидер



ВНВР

# УРОКИ ИСТОРИИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX ВЕКА

**ВОРОТНИЦКИЙ В.Э.**, д.т.н., главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Повышение энергетической эффективности было одной из главных целей передачи электроэнергии уже на самых первых этапах ее истории, которая началась во второй половине XIX столетия. Это было время активного перехода от «века пара» к «веку электричества», время развития электрического освещения, создания первых электрических генераторов, двигателей и трансформаторов, линий электропередачи, электропривода и бытовых электроприборов, роста производительности труда и качества жизни населения в целом ряде стран. Это были годы великих изобретений и открытий, острейшей борьбы за их приоритеты, годы «Войны токов» между выдающимися представителями славной плеяды электротехников, создавших основу современной электроэнергетики. Их биографиям, творческим и техническим достижениям посвящены сотни книг, статей и исторических исследований, в том числе [1–6]. Цель статьи – вспомнить историю создания первых линий электропередачи постоянного и переменного тока и рассмотреть, что полезного из опыта этой истории мы можем использовать для нашей сегодняшней действительности.



**Валерий Эдуардович  
ВОРОТНИЦКИЙ**

## КРАТКАЯ ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ПРОВОДАМ

Первые линии для передачи электричества по проводам стали применяться в слаботочной телеграфной связи. Активные работы в этом направлении начались с изобретения Павлом Львовичем Шиллингом (1786–1837) в 1832 г. телеграфной линии. В 1841 г. Борис Семенович Якоби (1801–1874) на основе этого изобретения построил первую телеграфную линию между Зимним дворцом и Главным штабом в Санкт-Петербурге. В 1843 г. конгресс США выделил американскому изобретателю электромагнитного пишущего телеграфа Сэмюэлю Морзе (1791–1872) субсидию для строительства телеграфной линии между Вашингтоном и Балтимором, по которой в 1844 г. была передана первая депеша со словами «Чудны дела Твои, Господи!». В те годы телеграфные воздушные и кабельные сети стали получать стремительное развитие в крупных городах, странах и на континентах.

В 1864 г. был проложен подводный трансконтинентальный телеграфный кабель между Европой и Америкой. К тому времени уже был полноценный опыт промышленного производства проводов и кабельной продукции для телеграфных линий [7].

Вместе с накоплением опыта воздушной проводной и кабельной телеграфной связи, с появлением первых электрических ламп, генераторов и двигателей, все большее внимание исследователей и изобретателей стали привлекать вопросы коммерческой передачи больших потоков мощности по проводам на большие расстояния. Начало работ в этом направлении принято считать с Венской международной выставки, на которой французский электрик Ипполит Фонтен (1833–1910) [8] в 1873 году продемонстрировал обратимость двух одинаковых электрических машин Грамма постоянного тока (рис.1). Одна из них работала в режиме генератора, вторая – в режиме двигателя и приводила в действие водяной насос искусственного водопада. Что-

бы вода не перелилась из бассейна, И.Фонтен решил несколько снизить мощность двигателя насоса и в качестве дополнительной нагрузки включил между машинами барабан с кабелем длиной около километра, имитируя тем самым удаление этих машин на расстояние друг от друга. Получив желаемый эффект за счет больших потерь в кабеле, Фонтен усомнился в экономической целесообразности электропередачи по проводу. Два года спустя он написал: «...тогда, как и теперь, я не верю в возможность электрической передачи больших мощностей на большие расстояния; электрические железные дороги мне казались и кажутся и теперь решением, применять которое можно посоветовать только в совершенно исключительных случаях» [8].

Примерно в те же 70-е годы начались активные исследования и разработки во всем мире по применению и распределению электричества для освещения городов. Российский электротехник Александр Николаевич Лодыгин (1842–1923) в 1873 году первым предложил применять в электрических лампах накаливания вольфрамовые нити и закручивать их в спирали [4]. Тогда же в России началась разработка конструкции первой электродуговой лампы (свечи). Она была завершена к началу 1876 года другим выдающимся отечественным изобретателем, конструктором и ученым – Павлом Николаевичем Яблочковым (1847–1894) [5]. Лампа Яблочкова произвела настоящий переворот в технике электрического освещения и послужила, по существу, началом массового применения электричества для освещения. Уже в апреле 1876 года свеча стала самым заметным экспонатом на выставке приборов в Лондоне. П.Н. Яблочковым было начато внедрение переменного тока для осветительных установок. В 1878 году он предложил систему распределения тока между лампами (по терминологии автора – «дробления света») при помощи индукционных катушек, которые представляли собой первые трансформаторы. По его инициативе в 1880 году был создан первый русский электротехнический журнал «Электричество», который



Рис. 1. Электрическая машина Грамма

сразу стал главной информационной и дискуссионной площадкой в России по обсуждению самых актуальных вопросов развития мировой и отечественной электротехники.

В 1882 году трансформатор П.Н. Яблочкова был усовершенствован русским ученым-самоучкой Иваном Филипповичем Усагиным (1855–1919). Его трансформатор приобрел почти современный вид (рис. 2) [1]. В том же году он был продемонстрирован на Всероссийской промышленно-художественной выставке в Москве. К трансформатору на этой выставке подключались не только электрические свечи, но и двигатель, дуговая лампа с регулятором и проволоочная нагревательная спираль, что стало убедительной иллюстрацией универсальности трансформации переменного тока.

В 1885 г. венгерские инженеры фирмы «Ганц» в Будапеште Микша Дери (1854–1938), Отто Блати (1869–1939) и Карой Циперновски (1853–1942) разработали трансформаторы с замкнутой магнитной цепью с кольцевым и броневым сердечником, что послужило стимулом для дальнейшего развития трансформаторостроения и техники переменного тока [1].

К 80-м годам уже были разработаны и выпускались промышленные образцы электрических генераторов и двигателей, в основном, постоянного тока, которые почти сразу получали практическое применение. В частности, в 1834 году Б.С. Якоби сконструировал первый в мире электродвигатель постоянного тока,

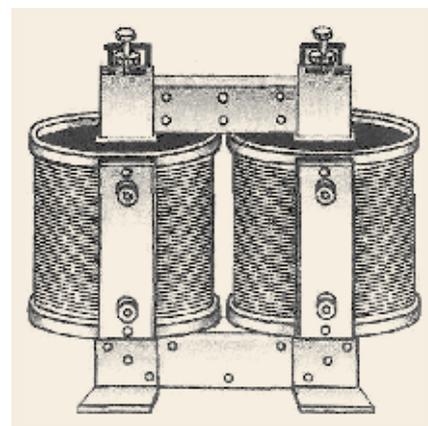


Рис. 2. Трансформатор И.Ф. Усагина

питающийся от аккумулятора. Через четыре года доработанный двигатель был изготовлен в 1838 году на Ижорском заводе, установлен на катере, на котором были проведены показательные катания по Неве (рис. 3а) [9]. Позже был продемонстрирован первый электровелосипед (рис. 3б), принцип действия которого сохранился до сих пор.

Для эффективной передачи больших электрических мощностей по проводам от удаленных централизованных источников к потребителям в 70-х годах XIX века имелись два решения – увеличивать сечение проводов или повышать напряжение линии с экономией на стоимости проводов. Снижение удельного сопротивления проводов было в те годы практически неосуществимо, так как медь, ставшая основным материалом для изготовления проводов, уже имела предельно малое удельное электрическое сопротивление. Лишь много позже, практически в наше время, были проведены теоретические и экспериментальные работы по снижению удельных сопротивлений проводов линий электропередачи с использованием новых материалов и явления сверхпроводимости.

Увеличение площади поперечного сечения проводников представлялось в то время мероприятием, более естественным и технически легче осуществимым по сравнению с повышением напряжения. Уже через год после И. Фонтена русский военный инженер Федор Аполлонович Пироцкий (1845–1898) [8] в 1874 г. приступил к опытам пере-

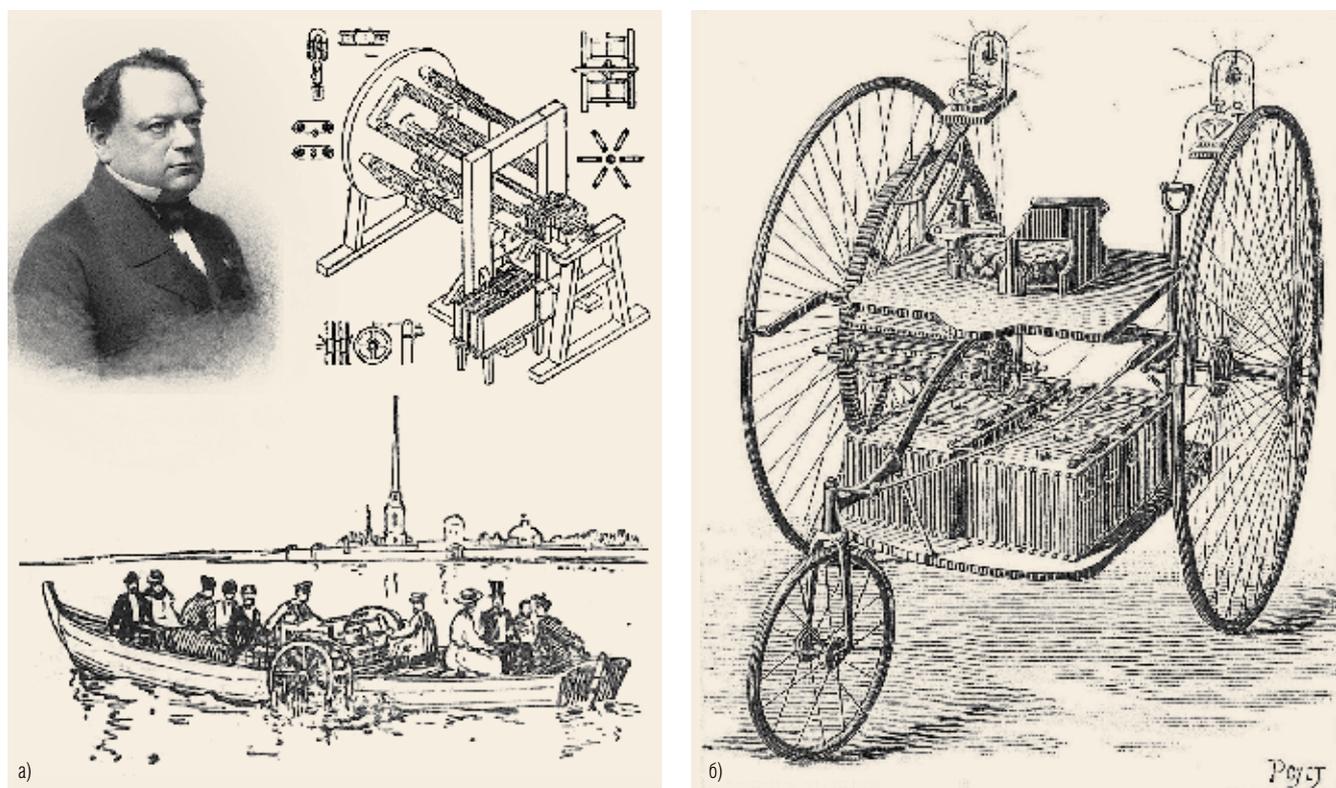


Рис. 3. а) Б.С. Якоби, его электродвигатель и демонстрационный катер [9]. б) Электрический велосипед с аккумуляторами. Ксилограф Луи Пойе. Нива, 1884, № 34, с. 81 [10]

дачи электроэнергии на расстояние чуть более 200 метров на артиллерийском полигоне Волкова поля (около Петербурга). По результатам этих опытов для уменьшения потерь в линии Пироцкий решил использовать в качестве проводников электрического тока железнодорожные рельсы, площадь поперечного сечения которых более чем в 600 раз превышала площадь поперечного сечения широко распространенного и доступного тогда телеграфного провода. Стремясь проверить это решение, он в конце 1875 г. провел опыты передачи электроэнергии по рельсам бездействовавшей ветки Сестрорецкой железной дороги длиной около 3,5 км. Оба рельса изолировались от земли, один из них служил прямым, второй – обратным проводом. Электрическая энергия передавалась от генератора Грама к электродвигателю, удаленному на расстояние около 1 км. Предложение Пироцкого об использовании железнодорожных рельсов для передачи электрической энергии на расстояние быстро нашло свое применение при разработке и реализации первых проектов городских элект-

рических трамваев. В частности, в мае 1879 года на промышленной выставке в Берлине была продемонстрирована первая электрическая железная дорога длиной 300 м, построенная Вернером фон Сименсом (1816–1892), известным немецким инженером, изобретателем и промышленником. К электролокомотиву с двигателем, мощностью 9,6 кВт были присоединены три вагончика, которые двигались со скоростью 7 км/ч и вмещали 18 пассажиров [11]. А в 1882 г. Сименсом был создан первый в мире троллейбус.

Опыты Ф. Пироцкого привлекли также внимание к передаче энергии вообще и вызвали ряд новых исследований и разработок, приведших ко второму, более рациональному пути повышения ее энергоэффективности. Этот путь, основанный на повышении напряжения, впервые обстоятельно и теоретически исследовали в 1880 г. независимо друг от друга французский инженер (впоследствии академик) Марсель Дебре (1843–1918) и профессор физики Петербургского лесного института Дмитрий Александрович Лачинов (1842–1902). [1].

В марте 1880 г. был опубликован доклад Дебре «О коэффициенте полезного действия электрических двигателей и об измерении количества энергии в электрической цепи». В нем автор математически доказывал, что КПД установки, состоящей из электродвигателя и линии передачи, не зависит от сопротивления самой линии. При этом ему не удалось установить, что увеличение сопротивления линии не влияет на эффективность электропередачи только при условии увеличения напряжения передачи. На это условие впервые было указано Лачиновым в статье «Электромеханическая работа», опубликованной в 1880 г. в первых номерах журнала «Электричество» [12]. К подобным же выводам пришел год спустя и М. Дебре. В 1882 г. он построил первую линию электропередачи Мисбах – Мюнхен протяженностью 57 км. На одном конце опытной линии в г. Мисбахе была установлена паровая машина, приводившая в действие генератор постоянного тока мощностью 3 л.с., дававший ток напряжением 1,5–2 кВ. Энергия передавалась по стальным телеграфным проводам диаметром 4,5 мм на тер-

риторию выставки в г. Мюнхене, где была установлена такая же машина, работавшая в режиме электродвигателя и приводившая в действие насос для искусственного водопада. Хотя этот первый опыт показал низкую энергетическую эффективность (КПД передачи не превысил 25 %), электропередача Мисбах – Мюнхен стала одним из отправных пунктов для дальнейших работ по развитию техники передачи электроэнергии на расстояние.

В эти же годы были успешно осуществлены и другие единичные проекты передачи электроэнергии на постоянном токе для промышленного использования и освещения городов. Однако они не принесли высоких результатов энергоэффективности и надежности передачи из-за возникшего тогда весьма важного противоречия. С одной стороны, практика проектирования и производства электрических машин и аппаратов постоянного тока уже получила значительное развитие. Двигатели постоянного тока обладали рабочими характеристиками, удовлетворяющими основным требованиям промышленности и бизнеса. С другой, технические возможности того времени не позволяли строить генераторы постоянного тока высокого напряжения. Такие генераторы часто выходили из строя из-за повреждения изоляции. Кроме того, электроэнергию постоянного высокого напряжения нелегко было использовать потребителям: нужно было строить двигатель-генераторную установку для преобразования высокого напряжения в низкое.

Частичное решение этих непростых задач было найдено Д.А. Лачиновым. Он предложил для повышения напряжения линий постоянного тока соединять последовательно по несколько машин на каждом её конце. В этом случае каждая в отдельности машина могла быть рассчитана на более низкое напряжение, а следовательно, могла быть более надежной. И. Фонтен первым реализовал практически эту идею, осуществив в 1886 г. электропередачу, в которой со стороны генератора работали четыре последовательно соединенные машины мощностью по

25 л.с. (напряжением по 1,5 кВ, т.е. получил 6 кВ), а со стороны приемника – три двигателя суммарной мощностью около 50 л.с. КПД этой передачи достигал 52 %. Позднее эта идея о последовательном включении генераторов была развита и в других электропередачах. Но во всех случаях, такие технические решения были, как правило, громоздкими, не очень надежными и дорогими. Требовались новые решения. И вскоре они были найдены в виде перехода с постоянного на переменный ток.

#### «ВОЙНА ТОКОВ» – БОРЬБА ИДЕЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В конце XIX века электротехника раскололась на два лагеря. Одни видели будущее за ставшим уже привычным постоянным током, другие – за переменным. Активным сторонником и защитником постоянного тока был всемирно известный американский изобретатель и бизнесмен Т.А. Эдисон (1847–1931). Он был не столько исследователем, сколько талантливейшим экспериментатором, изобретателем и организатором, отличающимся удивительной целеустремленностью и работоспособностью. Вплоть до самого преклонного возраста он работал по 16–19 часов. В своих опубликованных посмертно дневниках Эдисон признавался: *«Мое отличие от большинства изобретателей заключается в том, что у меня кроме склада ума, присущего изобретателям, есть жилка практицизма..., деловая сметка, умение оценить прибыль от изобретения»* [12]. Он самым внимательным образом изучал новейшие для того времени патенты и открытия и успешно использовал их в бизнесе, не забывая при этом фиксировать свои приоритеты в виде огромного количества патентов. По разным источникам у него было от 1100 до 1900 патентов США и около 3000 патентов других стран. Уже в 1882 г. он создал в Нью-Йорке компанию постоянного тока «Эдисон Электрик Лайт Компани», в которой число электростанций стало быстро расти. Спрос

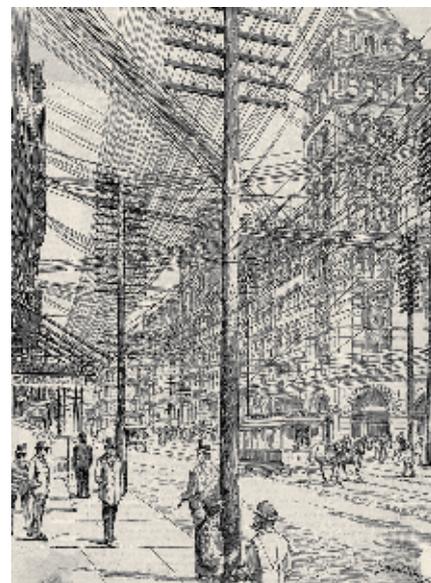


Рис. 4. Нью-Йорк в 80-е годы XIX века

на электроосвещение также рос, город покрывался паутиной проводов (рис. 4), компания процветала. В 1884 году к нему пришел талантливый, впоследствии великий сербский ученый, изобретатель и не меньший, чем Эдисон, самозабвенный труженик, будущий непримиримый его оппонент в «Войне токов» Никола Тесла (1856–1943).

У Эдисона Тесла проработал чуть меньше года. За это время он спроектировал 24 новых типа генераторов постоянного тока, которые были пущены в серийное производство, изобрел быстродействующий регулятор напряжения, на который компания Эдисона получила патент. Они разошлись потому, что попытки Тесла продолжить начатую им в 1883 году работу по конструированию индукционного двигателя встречали упорное противодействие Эдисона, принципиального противника переменного тока.

К тому времени генераторы переменного тока в широких масштабах начала применять американская фирма «Вестингауз электрик» (рис. 5). В 1888 г. основатель и владелец этой фирмы Джордж Вестингауз (1846–1914) выплатил Тесле один миллион долларов за право эксплуатации сорока его патентов, позвал его к себе на работу и пригласил переехать на завод в Питсбург для производства асинхрон-

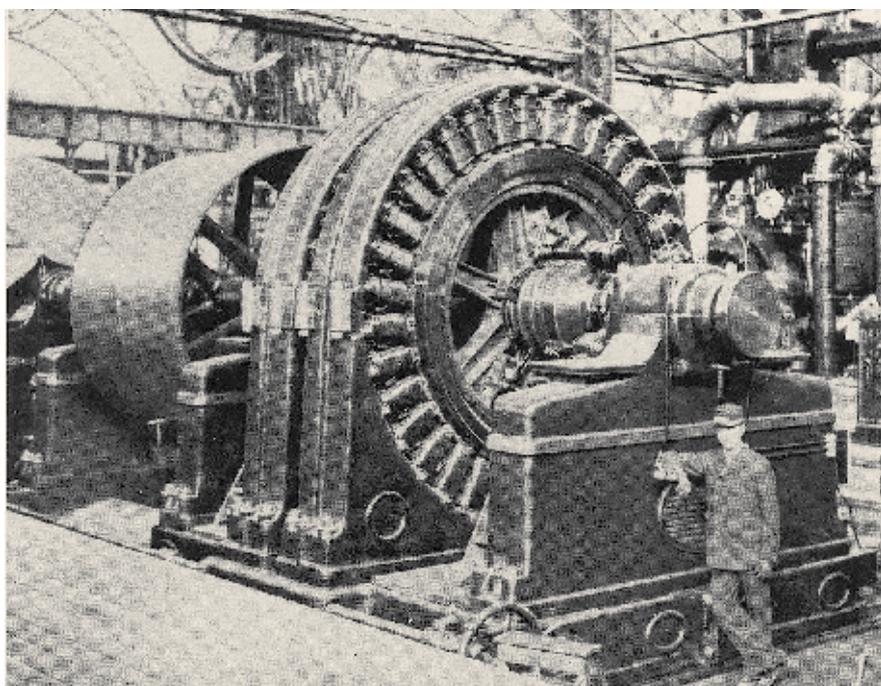


Рис. 5. Генератор компании «Вестингауз электрик» конец 1800-х годов

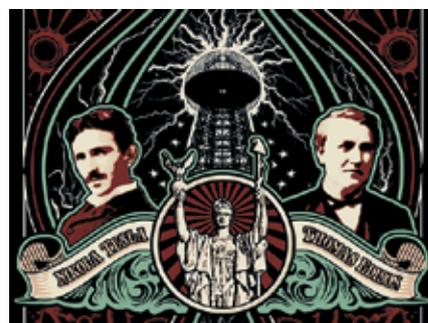


Рис. 6. Один из плакатов времен «Войны токов» [14]

ных машин и руководства внедрением многофазных переменных токов. Уже через год, в 1889 г. на одном из заводов Вестингауза вошел в строй новый цех с 39 станками, оснащенными асинхронными двухфазными электродвигателями мощностью от 7,5 до 60 кВт.

Бизнес Эдисона на постоянном токе оказывался под все большей угрозой, его потребовалось защищать. В 1888 г. началась яростная полемика между сторонниками постоянного и переменного тока (рис. 6).

Фирма «Эдисон Электрик Лайт Компани» опубликовала Красную книгу под заголовком «Предостережение», в которой переменный ток подвергался резкой критике. К ней был приложен список людей, смертельно пораженных переменным электрическим током. Описывались другие действительные и мнимые недостатки переменного тока, но особый упор делался все же на опасность его применения (рис. 7).

В борьбу против переменного тока включился один из инженеров компании Эдисона, некий Гарольд Браун, конструировавший в то время электрический стул и начавший эксперименты по воздействию электротока на животных. Иногда опыты делались публично, во время которых на глазах у публики погибали собаки и лошади. Апогеем этой борьбы стал письменный вызов Брауна Вестингаузу. Он писал: «Я вызываю г-на Вестингауза на встречу со мной в присутствии компетентных экспертов в области электротехники, и пусть через его тело пропускают переменный ток, а через мое – постоянный. Напряжение будет повышаться до тех пор,

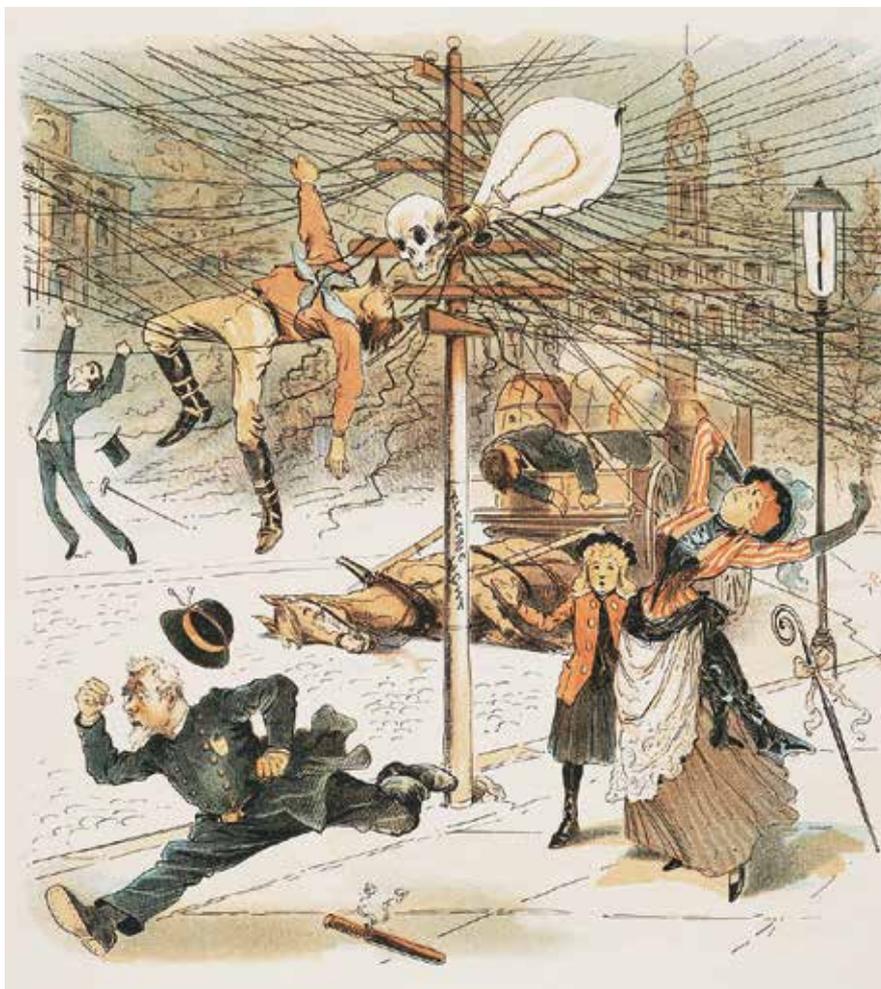


Рис. 7. Социальная реклама 1889 года против использования переменного тока [15]

пока один из нас не закричит и этим публично признает свое поражение. Однако я хочу предупредить г-на Вестингауза о том, что согласно моим экспериментам, воздействие переменного тока напряжением 160 В в течение 5 секунд приводит к фатальному исходу» [5]. Вестингауз вызова не принял. Но в некоторых штатах США под влиянием ответственности были приняты законы, запрещающие применять напряжение переменного тока более 200 В.

В одном из американских электротехнических журналов Эдисон опубликовал статью «Об опасностях электрического освещения», которая была перепечатана в российском журнале «Электричество» [16]. В ней автор писал: «...Употребление переменных токов высокого напряжения не имеет никакого оправдания ни с коммерческой, ни с научной точек зрения. Их употребляют только в виде уменьшения издержек на медь...». Чтобы у читателей журнала не создавалось мнение о безусловной правильности суждений Эдисона, в том же номере «Электричества» были помещены выдержки из публикаций ряда авторов в зарубежных изданиях с изложением различных точек зрения на достоинства, недостатки и области применения постоянного и переменного тока. Из этих публикаций следует, что дискуссия по этому вопросу оставалась открытой.

Сторонники переменного тока на критику отвечали делом. В 1893 году Тесла и Вестингауз реализовали заказ на освещение переменным током ярмарки в Чикаго. Это была убедительная победа над Эдисоном. Но не окончательная. В последующие годы борьба продолжалась достаточно долго, но все с большим перевесом переменного тока.

Несмотря на явные успехи того времени по развитию техники переменного тока, во второй половине 80-х годов XIX в. возникла и очень беспокоила инженеров и ученых задача включения двигательной нагрузки в электрическую сеть. Требовались новые решения. И в 1887–1888 гг. начались разработки многофазной, в том числе трехфазной, системы переменного тока, актив-

ное участие в которых принимали многие специалисты. Среди них был и наш великий соотечественник, инженер и изобретатель Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862–1919). Не вдаваясь в анализ этих разработок, их отличий и совпадений и отсылая читателей к обширной литературе по этим вопросам [1, 6, 13, 17, 19, 20] отметим, что победителем на этом этапе создания и практического применения техники и технологий передачи электроэнергии переменным током оказался Доливо-Добровольский.

### **ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ – СОЗДАТЕЛЬ ТЕХНИКИ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Михаил Осипович Доливо-Добровольский родился 2 января 1862 года в Гатчине под Петербургом в российско-польской дворянской семье. В 1873 году семья переехала в Одессу. Там прошли детство, юность и учеба в Одесском реальном училище. После его окончания в 1878 году Доливо-Добровольский поступил в Рижский политехнический институт на химический факультет. Но окончить его он не успел – в 1881 году за участие в политической студенческой забастовке его исключили из института без права поступления в любое высшее учебное заведение в пределах Российской империи. Через три года ему удалось выехать за границу, где в 1883 году он поступил в Высшее Техническое Училище в немецком городе Дармштадт. Уже в 1882 году там была образована кафедра электротехники, ее возглавил талантливый преподаватель и лектор профессор Эразм Киттлер (1852–1929). Киттлер не только блестяще читал, но и уделял первостепенное внимание лабораторной практике. Через год после образования кафедры и при поступлении Михаила Осиповича в училище заведующему кафедрой удалось построить, оборудовать современными стендами и ввести в действие большую электротехническую лабораторию из девяти комнат на площади 290 квадратных метров. После окончания с отличием училища Доливо-Добровольский занял должность ассистента кафедры



Михаил Осипович Доливо-Добровольский

электротехники в своем училище, и в лаборатории стал успешно закреплять не только теоретические, но, главным образом, практические знания и навыки.

Уже в процессе учебы появляются первые публикации Доливо-Добровольского, посвященные вопросам электротехники. Эти публикации были замечены, и в 1887 г. их автора пригласил к себе на работу Эмиль Ратенау, возглавлявший в то время «Всеобщую компанию электричества» (AEG). Там Михаил Осипович проработал до конца жизни, сначала шеф-электриком, а в 1909 году он стал директором предприятия. В первое время работы в компании Доливо-Добровольский, кроме общего технического руководства, основное внимание уделял конструированию аккумуляторов. Здесь пригодились его прошлые знания в электрохимии. Параллельно он стал заниматься исследованиями и разработками в области переменных токов.

В 1888 году Доливо-Добровольский ознакомился с работами итальянского физика Галилео Феррариса (1847–1897) по вращающемуся магнитному полю. Феррарис утверждал, что коэффициент полезного действия асинхронного двухфазного двигателя не может превы-

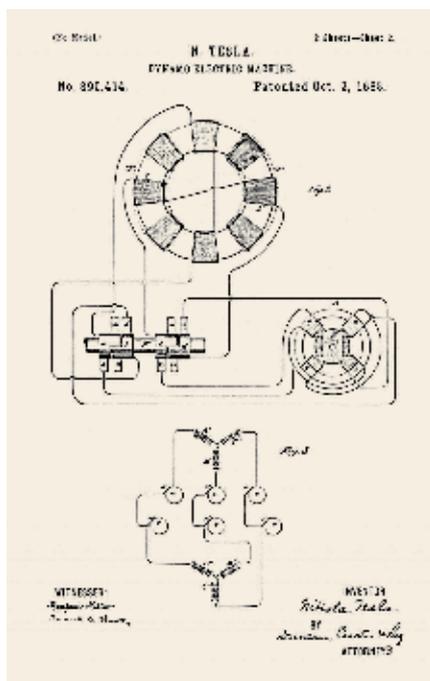


Рис. 8. Принципиальная схема трехфазной связанной системы Н. Теслы (патент №390. 414. от 02 октября 1888 г.)

шать 50 % и поэтому многофазные электрические машины переменного тока не получают широкого применения. Осенью того же года Михаил Осипович ознакомился с патентами Теслы, касающимися систем многофазных и трехфазных токов. В 1891 году, выступая на собрании Союза германских электротехников в Берлине, М.О. Доливо-Добровольский сказал [17]: «Я обязан добавить, что приоритет относительно многофазных машин принадлежит Тесле... Я имею в виду американский патент № 390. 414, выданный ему 2 октября 1888 г.» (рис. 8).

После изучения работ своих предшественников и проведения ряда экспериментов, Доливо-Добровольский пришел к выводу, что более эффективен не двухфазный ток, который считали основным для широкого применения Феррарис и Тесла, а трехфазный. Он предложил и запатентовал важнейшие устройства трехфазных систем, в том числе [6,17]:

- асинхронный двигатель с ротором типа «беличья клетка» (1889 г.);
- распределенные обмотки якоря машин переменного тока (у Теслы обмотки были сосредоточенными, катушечными);

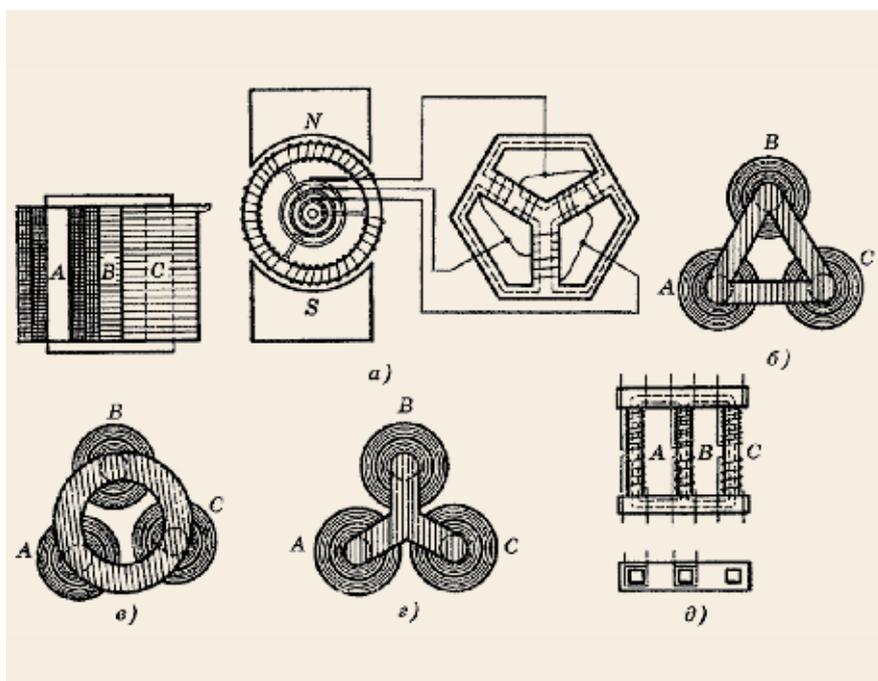


Рис. 9. Схемы конструкций трехфазных трансформаторов, предложенные Доливо-Добровольским

- первый асинхронный двигатель регулируемой скорости с обмоткой ротора, подключенной через контактные кольца к пускорегулирующему реостату;
- схемы конструкций трехфазных трансформаторов (1889 г.) на едином магнитопроводе различной конфигурации. До него в трехфазной линии использовали три однофазных трансформатора (рис. 9).

Широкому внедрению трехфазных систем способствовал блестящий успех Международной электротехнической выставки 1891 г. во Франкфурте, техническим руководителем и заместителем председателя выставочного комитета которой был назначен известный немецкий инженер-электрик Отто фон Миллер (1855–1934). В своем выступлении на общем собрании выставочного комитета в 1890 г. он заявил: «Прежние электрические выставки в Мюнхене и в Вене имели целью привлечь симпатии к электрическому освещению... Задачей Франкфуртской выставки должна стать демонстрация передачи и распределения электрической энергии в различных системах и применениях...» [6].

Миллер был убежденным сторонником переменного тока. Поэтому он от имени выставочного комитета

сделал компании AEG и работавшей по ее лицензии швейцарской фирме Эрликон официальное предложение по реализации запланированной передачи электроэнергии с гидростанции в Лауфене на выставку во Франкфурт. В марте 1891 г. было решено поручить AEG изготовление четырех трансформаторов по 100 кВА, асинхронного электродвигателя 73 кВт, 1000 электрических ламп по 55 Вт, всей измерительной и коммутационной аппаратуры. Фирме Эрликон предстояло изготовить синхронный генератор мощностью 220 кВт и два трансформатора по 150 кВА. Проектирование линии было поручено инженеру Эберту. Все эти работы должны были быть выполнены в жесточайший срок, за полгода. Как руководитель работ, Доливо-Добровольский понимал, что срыв сроков будет означать окончательное недоверие к его идеям, разработкам и изобретениям по трехфазному току. Победа же привлечет новых союзников и позволит продолжить работы в этом направлении. И он успешно справился с поставленными задачами. Работать пришлось буквально день и ночь. Все элементы линии электропередачи были переданы руководству выставки точно в срок.

Была построена воздушная трехфазная линия передачи электроэнергии протяженностью 170 км от генератора с водяной турбиной (рис. 10), установленного на водопаде города Лауфен, на выставку во Франкфурте. Напряжение на линии могло меняться в широких пределах от 15 до 33 кВ с помощью регулирования скорости генератора. На выставке она работала на напряжении 15 кВ. Выставку эффектно освещали 1000 ламп накаливания. Был запущен самый мощный по тем временам трехфазный асинхронный двигатель 73 кВт (рис. 11) с водяным насосом, питающим десятиметровый декоративный водопад. На выставке была практически реализована конструкция силового трехфазного трансформатора «призматического» типа мощностью 150 кВА (рис. 9). Испытания электропередачи убедительно подтвердили ее надежную работу и КПД на уровне 75 % [6].

По существу, в результате успешной, яркой и весьма убедительной демонстрации преимуществ системы трехфазного тока на выставке во Франкфурте в 1891 г. закончился второй этап «Войны токов». Следует заметить, что инициатор этой войны, Эдисон, после создания в 1892 г. компании General Electric (путем слияния его компании с компанией Thomson-Houston) потерял интерес к освещению, переключившись на обогащение руд. Сама же эта компания после прихода в нее выдающегося электротехника Чарльза Штейнмеца (1865–1923) стала активной сторонницей трехфазных систем. Датой окончательной победы переменного тока считается 2007 г., когда Нью-Йорк полностью перешел с постоянного тока на переменный. Но дискуссия продолжается. Постоянный ток по-прежнему актуален. Он имеет свои области и перспективы применения [18].

Много труда после выставки Доливо-Добровольский приложил для пропаганды внедрения трехфазного переменного тока. При помощи диспутов, докладов, статей и монографий он смог добиться того, что у него практически не осталось идейных противников. В 1899 году, на Первом Всероссийском электротехническом

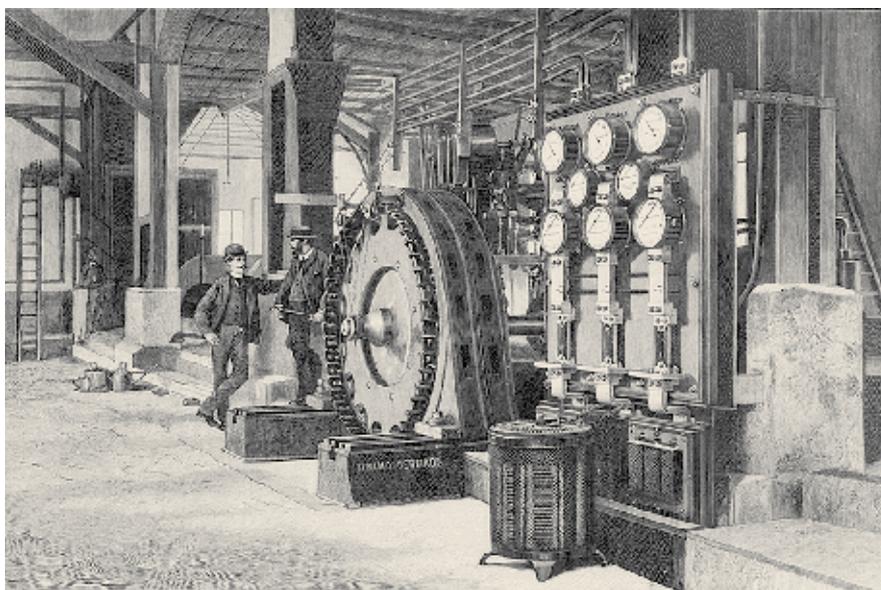


Рис. 10. Общий вид электрической части гидроэлектростанции в Лауфене

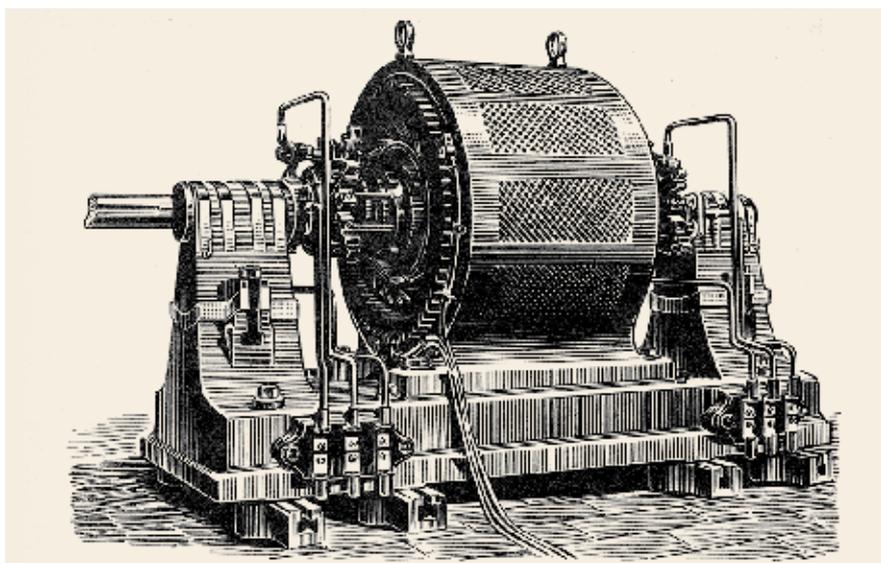


Рис. 11. Трехфазный двигатель М.О. Доливо-Добровольского

съезде Доливо-Добровольский выступил с докладом «Современное развитие техники трехфазного тока». В нем он подвел итоги выставки во Франкфурте и своей борьбы за правильность предложенных им технических решений по трехфазному переменному току. Этот достаточно большой доклад был опубликован в двух номерах журнала «Электричество» в 1900 году [19]. В начале доклада он отметил: «Электрическая выставка 1891 г. во Франкфурте-на-Майне была главным образом тем важна в истории электротехники, что на ней в первый раз выступил публично как

новая система так называемый трехфазный ток (далее Т.Ф.). Несмотря на то, что вращающееся магнитное поле было открыто профессором Феррарисом за 5–6 лет до того и имело в свою очередь предвестников (см. работы Дедре, Бейлза и др.). Несмотря на то, что опыты Тесла, а также и мои существовали уже года за два до этой выставки, все же год этой выставки (1891) должно считать, так сказать, годом рождения Т.Ф. тока. Техника не заботится много о лабораторных опытах, мало интересуется теоретическими размышлениями и «возможностями», она привет-



Рис. 12. Зал электротехники и электроэнергетики Немецкого музея достижений естественных наук и техники [20]

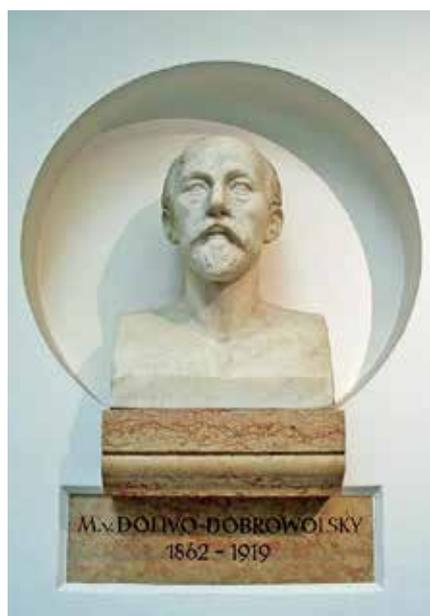


Рис. 13. Бюст М.О. Доливо-Добровольского в Немецком музее достижений естественных наук и техники [20]

**ствует открытия лишь тогда, когда ей покажут, что из них можно кое-что «сделать», покажут хотя бы и не в законченной, но, по крайней мере, в сколько-нибудь практической форме...»** (выделено автором). В конце своего доклада после рассмотрения примеров успешного применения трехфазных двигателей на различных металлообрабатывающих станках, на ситценабивной и бумажной фабриках, водоподъемных машинах и в электрических насосах До-

ливо-Добровольский отметил: *«Электрическая канализация дешевым током доставляет светлое, безопасное и гигиеничное освещение, она дает возможность ставить двигательную силу в самой раздробленной и простейшей форме каждому беднейшему жителю и ремесленнику. Нельзя не предвидеть влияния всего этого на мирное и постепенное улучшение социальных отношений... Т.Ф. ток стал современным культурным фактором; благотворное влияние, которое оказывает электротехника на жизнь западных народов, не замедлит обнаружиться и у нас на Руси».*

Показательно, что в этих словах, сказанных более 120 лет назад, говорилось не о капитализации, экономии операционных расходов и прибылях, а о культурной миссии доставки электроэнергии каждому беднейшему жителю планеты. В последующие годы жизнь со всей очевидностью подтвердила эти выводы Михаила Осиповича. Сегодня 90–95 % электроэнергии в мире (около 24 трлн. кВт·ч в год) передается по электрическим сетям трехфазного переменного тока со средним КПД около 92 %.

Несмотря на то, что М.О. Доливо-Добровольский долго жил и работал за границей, он мечтал вернуться на родину, постоянно поддерживал с ней связь. Он самым деятельным образом содействовал развитию электротехни-

ки в России, участвовал в собраниях Императорского Русского технического общества (РТО), выступал с докладами на Электротехнических съездах РТО и публиковал статьи в журнале «Электричество». В 1900–1901 гг. он участвовал в организации электромеханического отделения (факультета) Политехнического института в Санкт-Петербурге и получил приглашение возглавить этот факультет. Он помогал разрабатывать учебные программы и курсы, организовал снабжение института лабораторным оборудованием и передал институту всю свою библиотеку по электротехнике. Но из-за обострившейся в 1903 г. болезни планам вернуться жить в Россию не суждено было сбыться [20].

Последние годы своей жизни Михаил Осипович посвятил изучению способа передачи электроэнергии на большие расстояния при помощи постоянного тока высокого напряжения. Будущее развитие электротехники виделось ему в дальних передачах электроэнергии постоянного тока высокого напряжения по подземным кабелям.

Большинство из упомянутых выше выдающихся участников создания техники и технологии передачи электроэнергии в 70–80 гг. XIX века вместе с их амбициями и противоречиями навечно остались в истории мировой электротехники. Бюсты некоторых из них (в том числе и Доливо-Добровольского) и экспонаты их трудов теперь стоят в знаменитом на весь мир Немецком музее достижений естественных наук и техники в Мюнхене (рис. 12, 13). Он был основан в 1903 году тем же Оскаром фон Миллером, который активно содействовал успеху выставки во Франкфурте в 1891 году. Сегодня в музее около 30 тысяч экспонатов и ежедневно в нем бывает около 3,5 тысяч посетителей [21].

## ВЫВОДЫ

1. Великие изобретения и открытия, разработанные и внедренные технические средства и технологии второй половины XIX века в области электротехники и передачи электроэнергии – результат не только деятельности отдельных выдающихся изобретателей и ученых, но и большой армии простых инженеров и рабочих, изготовивших и испытавших новую технику.

2. Исторический опыт великих исследователей и создателей основ электротехники и электроэнергетики со всей очевидностью подтверждает, что изобретения и открытия, прежде чем стать передовыми технологиями, нуждаются в эффективной поддержке государства и бизнеса. Эта поддержка должна заключаться в достойном финансировании, в льготном налогообложении, в создании современной лабораторной, испытательной и метрологической базы, в качественном информационном обеспечении научных исследований, в совершенствовании системы образования.

3. Изобретения и открытия становятся полезными для их практического применения, когда они превращаются в экономически эффективные и перспективные конструкции, технику и технологии, открывающие новые возможности не только для бизнеса, но, в первую очередь, для улучшения качества жизни населения отдельных стран. Яркий пример тому – история создания и развития техники и технологий передачи и распределения электрической энергии.

4. Изучение и знание истории открытий, этапов и тенденций развития, способов борьбы за претворение их в жизнь – важнейшая составляющая успешной творческой инженерной деятельности. Обеспечение технологического суверенитета страны, ее конкурентоспособности на международных рынках требует новых подходов к высшему техническому образованию. Будущие инженеры-электрики должны получать не только достаточный объем фундаментальных знаний по математике, физике, химии, материаловедению и основам электротехники, но и навыки творческой, изобретательской работы по созданию инноваций.

5. Главные цели любого государства – обеспечение благосостояния и здоровья граждан, развитие их индивидуальных способностей, культуры, компетенции и инициативы, профессионального патриотизма. Если эти цели не на словах, а на деле будут достигнуты, лучшие люди и специалисты не только не будут уезжать из своей страны (как это случилось с М.О. Доливо-Добровольским и Николой Тесла), но станут возвращаться и

приезжать, чтобы вместе строить ее счастливое будущее.

6. Профессиональный патриотизм будущих инженеров-электриков должен воспитываться на основе изучения и глубокого уважения истории и достижений отечественной электротехники и электроэнергетики. Для этого необходимо:

- в базовых федеральных электротехнических университетах страны ввести обязательные образовательные стандарты и курсы изучения истории электротехники и электроэнергетики;
- в Москве и Санкт-Петербурге в тесном взаимодействии с Государственным политехническим музеем создать федеральные музеи истории энергетики и электротехники;
- на ВДНХ в павильоне электрификации России организовать постоянно действующую выставку достижений и направлений развития отечественной электроэнергетики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белькинд Л.Д. Учебник энергетической техники / Л.Д. Белькинд, О.Н. Веселовский, И.Я. Конфедератов, Я.Л. Шнейберг. М., 2020 – 828 с. <https://www.tavrida.ru/ter/energylibrary>
2. Шателен М.А. Русские электротехники XIX века. М.: Госэнергоиздат, 1955 – 142 с.
3. История электротехники. Под. Ред. И.А. Глебова <https://booktech.ru/books/istoriya/580-istoriya-elektrotehniki-1999-pod-red-ia-glebova.html>
4. Белькинд Л.Д. Александр Николаевич Лодыгин [Текст]: [1847–1923]: Очерк жизни и деятельности / Л.Д. Белькинд. – Москва; Ленинград: изд-во и тип. Госэнергоиздата, 1948 (Ленинград). – 64 с.
5. Белькинд Л.Д. Павел Николаевич Яблочков. Жизнь и труды. Государственное энергетическое издательство, Москва–Ленинград, 1950, 379 с. <https://www.tavrida.ru/ter/energylibrary>.
6. Веселовский О.Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский / О.Н. Веселовский. – Москва, 2021. – 348 с. <https://www.tavrida.ru/ter/energylibrary>
7. История развития проводных каналов связи / <https://www.myuniversity.ru> Информатика 325296 2898016 страница1.html
8. Первые опыты передачи электроэнергии на расстояние <http://elektrotrobgau.narod.ru/Chast444/Peredacha-electroenergii/newpage2.html>

trobgau.narod.ru/Chast444/Peredacha-electroenergii/newpage2.html

9. Радовский М.И. Роль Б.С. Якоби в развитии русской и мировой электротехники // Электричество № 9, 1948, с. 65-76 [http://museumrza.ru/old\\_journals/EL1948/zhurnal-elektrichestvo-no9-1948-god-sentyabr](http://museumrza.ru/old_journals/EL1948/zhurnal-elektrichestvo-no9-1948-god-sentyabr)

10. Каск А.Н., Бородин Д.А. Изобразить электричество. Развитие электротехники и журнальная иллюстрация конца XIX века Коммуникации. Медиа. Дизайн, Том 1, № 1, 2016 с. 190–209.

11. Симонов Н.С. Развитие электроэнергетики Российской империи. Предыстория ГОЭЛРО М.: Русский фонд образования и науки. 2016. – 320 с.

12. Лачинов Д. Электромеханическая работа // Электричество № 1, 1880, с. 9–11, № 2 1880, с. 27–30.

13. Церава Г.К. Никола Тесла. М.: Наука, 1974 – 211с.

14. Микеров А. Война токов и победа переменного тока [https://www.researchgate.net/publication/316345547\\_Vojna\\_tokov\\_i\\_pobeda\\_peremennogo\\_toka](https://www.researchgate.net/publication/316345547_Vojna_tokov_i_pobeda_peremennogo_toka).

15. Война токов: Тесла против Эдисона <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1630-vojna-tokov-tesla-protiv-jedisona.html>

16. Об опасности электрического освещения// Электричество № 2, 1890, с. 29–32.

17. М.О. Доливо-Добровольский – русский новатор-электротехник и его изобретения <http://elektrik.info/main/fakty/647-m-o-dolivo-dobrovolskiy-russkiy-novator-elektrotehnik-i-ego-izobreteniya.html>

18. Сулова О.В. Тенденции развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током: мировой и отечественный опыт // «Энергоэксперт», № 4, 2019, с. 32–42.

19. Современное развитие техники трехфазного тока. Доклад М.О. Доливо-Добровольского // Электричество, 1900, № 4, стр. 49–57, № 5–6, стр. 65–78

20. Бутузов В.А. Энергетическая общественность России в 1880-1992 годах <https://www.c-o-k.ru/articles/energeticheskaya-obschestvennost-rossii-v-18801992-godah>

21. Немецкий музей в Мюнхене – крупнейший технический музей в мире <http://electricalschool.info/history/2540-nemeckiy-muzey-v-myunhene.html>

# ВКЛАД ВЭИ В ТЕХНИКУ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

ШУЛЬГА Р.Н., к.т.н., ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина»

ЧУПРИКОВ В.С., к.т.н., ООО «Усть-Каменогорский конденсатор»

*Посвящается памяти главного конструктора СТК И.П. Таратуты*

Предыстория появления техники статических тиристорных компенсаторов (СТК) охватывает промежуток 50–60-х годов прошлого века, связанный с бурным развитием статических преобразователей на основе игнитронов и экситронов. Одним из ведущих подразделений ВЭИ, которое занималось разработкой таких преобразователей, было отделение высоковольтных ртутных вентилях (ОВРВ), выпустившее несколько поколений ртутных вентилях (ВР). На основе одноанодных вентилях типа ВР-9 на напряжение 130 кВ, ток 900 А разработки Бутаева Ф.И., Климова Н.С. и др., изготовленных на Тольяттинском электротехническом заводе (ТЭЗ), были скомплектованы преобразовательные мосты первой советской передачи постоянного тока (ППТ) Волгоград-Донбасс. В 1970 г. были разработаны более совершенные вентилях ВР-10, а затем ВРСМ-10 на напряжение 140 кВ, ток 1000–1200 А разработки Перцева А.А., Удриса Я.Я., Оленина А.В. и др. А на Таллинском электротехническом заводе (ТЭЗ) было освоено производство электроприводов для нужд ж/д транспорта на основе запаянных ртутных вентилях-игнитронов типа ИВС и ИВП 500/5 разработки Суэтина Т.А. и Таратуты И.П. С 1968 г., на основе игнитронов ИВУ 500/5 разработки Иванова В.А. и Таратуты И.П., начали производить регулируемые электроприводы для нужд металлургических заводов СССР и зарубежных стран. Так были заложены основы развития отечественной техники СТК.

**Ключевые слова:** статический тиристорный компенсатор, ртутный вентиль, мощный испытательный стенд, компенсация реактивной мощности

Разработанные в ВЭИ на рубеже 60–70-х годов серии тиристорных управляемых вентилях ВКУ на напряжение 600 В, ток до 150 А вытеснили ртутные вентилях и позволили в 1969 г. начать производство на ТЭЗ тиристоров серии ТД на напряжение до 1700 В, ток до 250 А. А уже в 1970 г. производство разработанных в ВЭИ таблеточных тиристоров Т-500 на напряжение 2 кВ, ток 500 А (Ев-

сеев Ю.А., Локтаев Ю.М. и др.) было освоено на заводе «Электровыпрямитель» в г. Саранск.

Указанные разработки позволили специалистам ВЭИ приступить к созданию отечественных высоковольтных СТК, по своим техническим характеристикам не уступающим аналогичным устройствам производства ASEA (в будущем ABB) – мировому лидеру в этой отрасли.

## **РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ СТК, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И МОЩНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА МИС НА ЭТАПЕ 70–90-Х ГОДОВ ХХ ВЕКА**

Недостатки развития больших сетей переменного тока в части устойчивости, управляемости и роста токов КЗ в 80-е годы вызвали необходимость освоения техники постоянного тока и ускоренного развития высоковольтной преобразовательной техники. Успеш-



Рис. 1. Мощный испытательный стенд в г. Тольятти на напряжение 500-1150 кВ

ное завершение проекта ППТ Волгоград-Донбасс и разработка новых проектов: вставки постоянного тока СССР-Финляндия в г. Выборг и самой мощной в мире ППТ 1500 кВ Экибастуз-Центр, а также ЛЭП Экибастуз-Урал с напряжением 1150 кВ, утвердили лидерство нашей страны в мировой энергетике к концу 80-х годов.

Широкое энергетическое строительство потребовало создания уникального и единственного в мире мощного испытательного стенда (МИС) в г. Тольятти. МИС, фото которого представлено на рис. 1, располагал территория в 19,6 га с ОРУ 500 кВ. Питание стенда осуществлялось от ЛЭП 500 кВ Волжская ГЭС–Бугульма (ныне Жигулевская ГЭС).

С учетом непосредственной близости мощных источников, прежде всего Волжской ГЭС, а также развитой сетевой инфраструктуры, оказалось возможным обеспечить на данном стенде мощность короткого замыкания 12÷18 ГВА, достаточную для проведения электродинамических испытаний трансформаторов мощностью до 666 МВА, реакторов и другого оборудования на напряжения до 500 кВ и выше, а также испытания СТК на напряжении 10 и 35 кВ [5–7].

Главная схема электрических соединений стенда изображена на рис. 2. Стенд присоединен к ВЛ 500 кВ с помощью выключателей Q1...Q4 по схеме четырехугольника. Выключатели Q5...Q10 служат для подключения

фильтро-компенсирующих устройств ФКУ1, ФКУ2 и двух трансформаторных групп ТГ1, ТГ2.

Стенд для испытания оборудования постоянного тока состоял из двух преобразовательных мостов М1, М2, выполненных по трехфазной мостовой схеме Ларионова, которые обеспечивают следующие испытательные воздействия: номинальный ток – 2100 А, ток 15-минутной перегрузки – 2800 А, выпрямленное напряжение моста – 375 кВ, максимальное рабочее напряжение верхнего полюса и фазы моста относительно земли – 1200 кВ.

Значимость МИС определялась возможностью отладки высоковольтного оборудования в условиях эксплуатации на реальном объекте, а также проведения долговременных ресурсных испытаний оборудования для подтверждения его надежности. Стендов с подобными характеристиками не существовало в мире ни тогда, ни теперь! Разработка и проектирование МИС осуществлялась силами ВЭИ под руководством Кулакова В.П. и Викулина А.Г. В проведении испытаний активно участвовали сотрудники отделения высоковольтной преобразовательной техники (ОВПТ) и отделения высокого напряжения (ОВН) под руководством Таратуты И.П. и Остапенко Е. И. На МИС сложился полноценный коллектив исполнителей: Северюгов А.В., и Червяков В.А., под руководством директоров Краснова А.И., а затем Долгополова А.Г.

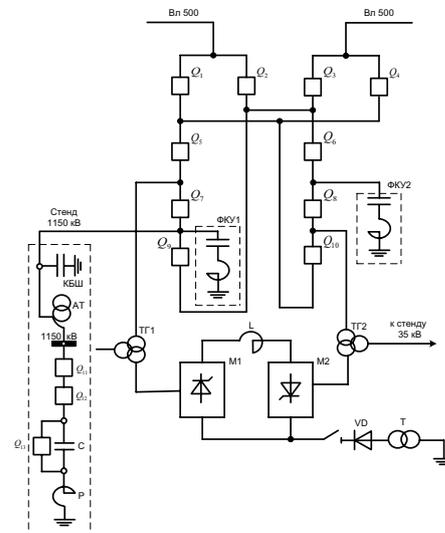


Рис. 2. Главная схема электрических соединений МИС

На этом стенде проводились ресурсные испытания тиристорных блоков для ППТ Экибастуз-Центр, разработанных в ОВПТ ВЭИ, подтвердившие их высокую надежность.

### ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В МИРЕ И СССР В ЧАСТИ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В мировой электроэнергетике с начала 80-х годов 20 века началось внедрение устройств FACTS (гибкие линии электропередач переменного тока), выполненных на базе использования достижений силовой электроники. Эти устройства должны были ликвидировать недостатки сетей переменного тока в части устойчивости, управляемости, ограничения токов КЗ и др. Наряду с применением ВПТ и ППТ значительная роль в решении перечисленных задач отводилась устройствам регулируемой быстройдействующей компенсации реактивной мощности типа СТК, а с 2000 годов и СТАТКОМам. Широко применяемая в мире схема вентильного СТК в составе тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и фильтро-компенсирующих цепей (ФКЦ) была запатентована в стране и за рубежом сотрудниками ВЭИ Худяковым В.В. и Чвановым В.А.

Для выбора схемотехники СТК и алгоритмов его управления потребовалось создание средств моделирования, а также координация разработ-



Рис. 3. Шунтирующий реактор для ВЛ 1150 кВ на испытаниях



Рис. 4. Стенд испытаний тиристорных блоков напряжением 375 кВ

ки комплексов электрооборудования (КЭО). Штабом создания новых проектов стало специально образованное в ВЭИ отделение разработки комплексов электрооборудования (ОРКРО) с ведущими сотрудниками: Соколов Н.Н., Кулаков В.П., Викулин А.Г. В ОРКРО вошла также лаборатория режимов и защиты от перенапряжений (ЛРЗП), которую создал Стукачев А.В. Им был сформирован молодежный коллектив, яркими представителями которого явились Худяков В.В., Лытаев Р.А., Баракаев Х.Ф., Лазарев Н.С. и др., которые разработали уникальную физическую модель постоянного тока (далее физмодель), ставшую впоследствии основным инструментом исследований для формирования ТТ и ТЗ на подсистемы и элементы КЭО всех ППТ, ВПТ, СТК и др. объектов.

Недостатком физмоделей, в том числе и для моделирования ЛЭП, являлось низкое значение добротности составляющих ее компонентов, искажавшее результаты исследований.

Это потребовало создания математических моделей (вначале аналоговых, а затем и цифровых), лишенных этого недостатка. Ряд программных комплексов для исследования режимов ППТ, ВПТ, СТК разработали Шульга Р.Н., Болдырев Е.А., Лазарев Н.С. и др. Наличие в ОРКРО сотрудников разного профиля: исследователей, конструкторов и проектировщиков,

привлеченных из Гидропроекта, Энергосетьпроекта и др., а также опыт сотрудников других отделений, позволили ВЭИ стать отечественным лидером в принятии технических решений проектируемых энергообъектов.

### СТК ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ

Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК) начали широко применяться в мире в середине 70-х годов прошлого столетия с целью снижения вредного влияния на питающую сеть мощных дуговых сталеплавильных печей (ДСП), которые стали использовать на металлургических заводах вместо традиционных мартеновских печей. Техническая возможность изготовления мощных СТК была обусловлена созданием сильноточных высоковольтных таблеточных тиристоров. Ведущие компании-производители СТК в это время: ASEA (Швеция) – после 1988 г. ABB, Siemens (Германия), Alstom (Франция), General Electric и Westinghouse (США), Nissan и Fuji Electric (Япония).

Несмотря на имеющееся авторство схемы вентильного компенсатора реактивной мощности (патент В.В.Худякова и В.А.Чванова) в СССР СТК не производились. Для преодоления этого отставания в 1980 г. в ОВПТ ВЭИ был создан сектор СТК под руководством М.В.Ольшванга, в котором была начата работа изучению и обоб-

щению мирового опыта СТК-строения и создания собственной методологии выбора параметров СТК для ДСП. После укрепления сектора СТК В.С. Чуприковым работа была форсирована и уже в середине 1982 г. был выпущен технический проект по СТК на напряжение 35 и 110 кВ.

Весной 1982 г. ВЭИ получил задание от Госплана СССР: в кратчайшие сроки выдать проектным институтам конструкторскую документацию на установку двух СТК напряжением 35 кВ для строящихся в СССР передельных металлургических заводов: Молдавского (ММЗ) в г. Рыбница и Дальневосточного (ДВМЗ) в г. Комсомольск-на-Амуре, и обеспечить поставку всего комплекса оборудования в 1984 году. Важность поставленной задачи заключалась в том, что без СТК эти заводы не могли быть сданы в промышленную эксплуатацию, так как вызываемые работой ДСП колебания напряжения в питающей сети (т.н. фликер) больше чем в 2 раза превышали допустимые нормы.

Разработка этих СТК происходила под непосредственным руководством главного конструктора СТК, начальника ОВПТ ВЭИ И.П. Таратуты, а все организационные вопросы курировали первый заместитель директора ВЭИ И.М.Бортник и зам. министра МЭТП Ю.А.Никитин. В качестве предприятий-изготовителей оборудова-

ния ВПО «Союзтрансформатор» значило: СВПО «Трансформатор» по ВТВ и системе охлаждения, МПО «Электрозавод» по компенсирующим и фильтровым реакторам и демпфирующим резисторам, ПО «Конденсатор» (ВНИИСК и УККЗ) по конденсаторным батареям. Разработку СУРЗА поручили сектору В.А. Кузьменко НИЦ «Комплекс» ВЭИ.

В процессе создания первых отечественных СТК М.В. Ольшвангом и В.С. Чуприковым были разработаны методики и программы расчета основных параметров СТК и отдельных видов его оборудования, которые успешно используются до настоящего времени [8–12]. После многочисленных совещаний с представителями заказчика (Минчермета), ВНИИЭТО, ТПЭП и МЭТП 22 ноября 1982 года было согласовано и утверждено ТЗ на разработку СТК для ММЗ и ДВМЗ напряжением 35 кВ мощностью 160 Мвар, а к концу года технические требования на все виды оборудования были переданы заводам-изготовителям.

Следует отметить, что при разработке электронной части СТК, осуществленной непосредственно в ВЭИ, были использованы самые современные на то время технологии:

- тиристорные вентили на базе таблеточных тиристоров Т273-1250 30 класса;
- система светового управления и контроля состояния тиристоров с использованием специальных полупроводниковых лазеров ЛПИ-101;
- жидкостное охлаждение тепловыделяющих компонентов ВТВ (тиристоров, резисторов и дросселей насыщения) с помощью деионизованной воды;
- мажорированная полностью цифровая система автоматического управления, реализованная на базе микроЭВМ В7;
- резервирование ключевых компонентов и узлов.

Среди разработчиков этого наиболее наукоемкого оборудования СТК особенно отличились следующие сотрудники ВЭИ: Р.А. Лытаев, С.В. Крайнов, О.П. Нечаев, В.Ф. Баракаев, А.И. Федотов, А.А. Маслов, А.Д. Коваль – по силовой части ВТВ, А.И. Январев, В.С. Горшков, Е.Ф. Данькин, Ю.Н. Дуров – по световой системе

управления и контроля тиристоров, Л.И. Ройзен, Л.М. Вертоградская, Д.Г. Рачицкий – по системе жидкостного охлаждения, А.И. Ступель, В.В. Кузьменко, В.П. Агафонов, И.С. Кубарева – по СУРЗА.

Что же касается традиционного электрооборудования, то здесь технологическое отставание СССР от Запада было налицо. Реакторы для СТК, как компенсирующие, так и фильтровые, МПО «Электрозавод» разработал с железными сердечниками и масляным охлаждением, размещенными в тяжелых и громоздких баках (других они делать просто не умели!), в то время как компании Trench (Канада), Spezielectra (Австрия) и Nokia (Финляндия) выпускали подобные реакторы в сухом исполнении с воздушным сердечником. Для комплектации конденсаторных батарей всех фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) использовались самые мощные на то время отечественные конденсаторы типа КСШК-6,3-100 УЗ мощностью 100 квар в единице, с внешними предохранителями, заполненные экологически вредным диэлектриком трихлордефинил (ТХД). А компании ABB (Швеция) и Nokia производили конденсаторы мощностью 200-300 квар в единице с встроенными секционными предохранителями и экологически безопасным диэлектриком типа Jariles. Касательно коммутационной аппаратуры – если на ММЗ/ДВМЗ были запроектированы воздушные выключатели типа ВВУ-35А и ВВЭ-35-20 и разъединители с ручным приводом, то Западе уже широко использовались КРУ-35 кВ с вакуумными выключателями.

Забегая вперед отметим, что после сравнения характеристик отечественного оборудования СТК для ММЗ и ДВМЗ с аналогичным оборудованием СТК производства компании ABB, поставленным в то же время на Белорусский металлургический завод (БМЗ), построенный «под ключ» австрийской компанией Voest Alpine, МЭТП в 1986 г. запустило отраслевую н/т программу по разработке комплекса оборудования СТК (реакторов, конденсаторов и выключателей) второго поколения, не уступающего западным аналогам. Основанием для формирования этой программы явился отчет по результатам командировки на БМЗ

в мае 1985 г. бригады сотрудников ВЭИ (В.С. Чуприков, В.А. Кузьменко и В.П. Иванов), в котором было проведено сравнение каждого вида отечественного и зарубежного электрооборудования СТК.

Параллельно процессу разработки и изготовления оборудования проводилось рабочее проектирование двух установок СТК. По ММЗ проектным институтом был назначен ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект» (ТПЭП), а по ДВМЗ – «Сибгипромез» (г. Новокузнецк). Особенностью проектирования было решение об установке всего оборудования обоих СТК в отдельных специально построенных зданиях. Причинами этого явились: соседство площадки будущего ММЗ с рядом стоящим цементным заводом и суровый климат для ДВМЗ. Так как работы по проектированию были начаты еще до получения окончательных габаритно-установочных чертежей оборудования СТК, помещения под него были выбраны с приличным запасом, в результате чего размер двухэтажных зданий составил в плане 72×36 м!

Основную работу с проектантами взял на себя В.С. Чуприков. Хотелось бы отметить ведущих специалистов ТПЭПа, принявших непосредственное участие в разработке рабочего проекта СТК для ММЗ: А.П. Цаллагов, А.Г. Смирнов, Я.Ю. Солодухо, Либерзон, Корогодский, Подшибихина, Чугункин, Менчик и др. Тщательная проработка принятых для первых отечественных СТК конструктивных и технологических решений, структуры панелей автоматики и релейных защит стали хорошей основой для всех последующих проектов СТК в СССР и, после 1991 г., в Российской Федерации.

В начале 1985 г. в ВЭИ на обучение прибыли группы молодых инженеров ММЗ и ДВМЗ, которым предстояло в будущем осуществлять эксплуатацию первых СТК. А уже в июне в Рыбницу для выполнения шеф-монтажных и пуско-наладочных работ выехала бригада специалистов пяти секторов ВЭИ (всего около 25 человек) под руководством В.С. Чуприкова.

В СССР строительству первого передельного металлургического завода придавалось большое значение. На ММЗ работал т.н. «Штаб стройки», в котором практически ежедневно проходили совещания



Рис. 5. Фото ВТВ 35 кВ первого и второго поколений

под руководством зам. министра строительства СССР и министра строительства Молдавской ССР, на которых контролировалось выполнение плана строительства и монтажа оборудования. СТК был одним из ключевых объектов строящегося завода, так как опыта сооружения подобных установок в СССР еще не было. А фактически всеми работами на комплексе СТК руководили 2 человека – начальник СТК И.А. Пиндак от ММЗ и руководитель бригады ВЭИ В.С. Чуприков. Ежедневно приходилось решать массу организационных и технических проблем, связанных с недоработками проекта, задержками выполнения отделочных и монтажных работ, а также необходимостью оперативного восстановления работоспособности электронного оборудования СТК, которое больше года хранилось на открытой площадке в несоответствующих ТУ условиях.

Во время проведения монтажных работ комплекс СТК посещали директор ВЭИ В.П. Фотин, его первый заместитель И.М. Бортник, начальник ОВПТ И.П. Таратута и нач. отдела ВТВ Р.А. Лытаев, а также представители заводов-изготовителей.

В результате совместных усилий специалистов ВЭИ, монтажников и сотрудников завода к концу лета основной объем строй-монтажных работ был закончен, в сентябре на СТК было подано высокое напряжение и пошел первый регулируемый ток в ТРГ. После почти 3 месяцев пуско-наладочных

работ и приемо-сдаточных испытаний в конце 1985 года первый советский СТК – самый мощный в мире на то время (для металлургии), был принят в промышленную эксплуатацию [9].

После этого бригада специалистов ВЭИ, уже под руководством М.В. Ольшванга, отправилась в Комсомольск-на-Амуре на ДВМЗ и летом 1986 года был принят в эксплуатацию и второй отечественный СТК.

А в конце 80-х годов на закате советской власти в СССР были реализованы еще два проекта СТК-35 кВ: на Волжском трубном заводе мощностью 160 Мвар и на второй очереди БМЗ мощностью 130 Мвар. Комплектную поставку обоих СТК осуществляла ВТО «Энергомашэкспорт», а конкретные виды оборудования были закуплены у СВПО «Трансформатор» (тиристорные вентили и системы водяного охлаждения) и Nokia (компенсирующие и фильтровые реакторы, конденсаторные батареи и системы управления). В промышленную эксплуатацию эти СТК были сданы в 1990 г.

Для этих СТК в ОВПТ ВЭИ были разработаны тиристорные вентили второго поколения. Переход на приборы Т273-1250 42 класса позволил уменьшить число последовательно соединенных тириستоров в фазе с 40 до 28 и существенно улучшить массогабаритные показатели ВТВ. На рис.5 приведены фото ВТВ на напряжение 35 кВ и ток 1600 А первого (ММЗ) и второго (БМЗ) поколений.

Следует отметить, что в оборудовании первых советских СТК использовались исключительно отечественные компоненты и материалы с гражданской приемкой (т.е. не самого высокого качества). Тем не менее, заложенные в оборудование технологические запасы и резервирование ключевых компонентов обеспечили их высочайшую надежность, что позволило эксплуатировать все 4 СТК до настоящего времени, т.е. в течение 30-35 лет.

### СТК ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Кроме металлургии СТК также широко применялись и в электроэнергетике, особенно в странах с протяженными линиями передачи – в первую очередь это США, Канада, Австралия, Швеция, Индия, Бразилия, Мексика, ЮАР и т.д. Главная задача этих СТК – путем регулирования реактивной мощности обеспечить стабилизацию напряжения на шинах подстанции в месте установки и повысить статическую и динамическую устойчивость электропередачи.

В СССР, несмотря на большую длину магистральных системообразующих линий электропередач напряжением 330, 500 и 750 кВ, подобные СТК отсутствовали. Устойчивость энергосистем обеспечивалась, в первую очередь, структурой их построения: наличием резервных (недогруженных) цепей, параллельных линий напряжением 220 и 110 кВ и принятой еще с 20-х годов прошлого столетия системой противоаварийной автоматики. Это позволяло при аварийных отключениях отдельных линий осуществлять быстрое перераспределение потоков мощности и избегать лавинообразных отключений потребителей.

Актуальность применения СТК в энергетике в СССР проявилась в процессе проектирования пилотной электропередачи напряжением 1150 кВ «Экибастуз-Урал». По расчетам института «Энергосетьпроект» по условиям устойчивости пропускная способность передачи без СТК была ограничена величиной 2500 МВт. В случае же установки на подстанциях Кустанай, Кокчетав и Челябинск вместо части некоммутируемых шунтирующих реакторов быстродействующих СТК мощностью 1200 Мвар, она увеличивалась до 5600 МВт.

Естественно, что создание такого СТК поручили ВЭИ, а системный инжиниринг проекта – сектору СТК ОВПТ (М.В. Ольшванг и В.С. Чуприков) под руководством главного конструктора СТК И.П. Таратуты. Немало копий было сломано в процессе разработки технического задания на разработку ОКР «Статический тиристорный компенсатор для электропередачи 1150 кВ типа СТК-1170-/390-1200». В конце концов 10.08.1984 г. оно было утверждено техническими управлениями Минэнерго и МЭТП.

Сложность данной разработки заключалась в том, что:

- компенсаторов такой мощности в мире не еще существовало;
- в требования к СТК, помимо стандартных, были заложены такие функции, которые не выполнял (да и сейчас не выполняет!) ни один СТК в мире, а именно:

- снижение внутренних перенапряжений на линии электропередачи,
- симметрирование напряжения по фазам линии в неполнофазных режимах работы,
- обеспечение условий быстрого гашения дуги сопровождающего тока и ограничение перенапряжения на линии в цикле ОАПВ;

■ обычно СТК для энергетики выполняются на класс напряжения 10...35 кВ и подключаются через понижающий трансформатор к шинам подстанции либо к третичным обмоткам подстанционных автотрансформаторов. Однако в нашем случае, для выполнения первой и третьей функции, СТК должен быть подключен НЕПОСРЕДСТВЕННО к линии передачи 1150 кВ через специальный понижающий трансформатор, а для минимизации объема оборудования СТК был выбран его класс напряжения 110 кВ;

■ для выполнения всех трех функций СТК должен был иметь пофазное управление;

■ система управления СТК должна была включать в себя ряд нестандартных алгоритмов регулирования реактивной мощности, подлежащих разработке и скоординированных между собой на приоритетной основе.

Тем не менее, задачи были поставлены и их нужно было решать. Специалисты ОВПТ в сотрудничестве с СВПО «Трансформатор» разработали

ВТВ на напряжение 110 кВ. Специальная система быстрого заряда накопителей ячеек управления, разработанная С.В. Крайновым, позволяла обеспечить включение тиристоров в течение 1–2 мс после появления волны нарастающего напряжения, без которой специальные функции СТК не могли быть реализованы. Сотрудники АСУ ВЭИ создавали полностью цифровую многозадачную систему управления. ВИТ разработал проект уникального трехобмоточного трансформатора 1200/121/121 кВ мощностью 1200 МВА с возможностью непосредственного подключения к линии 1150 кВ.

А сотрудники сектора СТК пытались решить системные вопросы функционирования этого СТК, привлекая для этой цели ведущих специалистов ВЭИ: Г.С. Белкина, А.К. Лоханина, С.И. Лурье, Л.В. Лейтеса, В.В. Левченко, Н.М. Чернышова, А.Я. Ярошенко. В.С. Чуприков создал макет быстродействующего регулятора напряжения СТК с фазо-импульсным преобразователем, позволяющим обеспечить непрерывность тока ТРГ при существенных искажениях напряжения на линии. Ряд опытов, проведенных на физической модели Н.С.Лазарева, показал, что эффективность СТК в режиме снижения перенапряжений при включении холостой линии не хуже, чем у шунтирующих реакторов [10, 11].

Самой тяжелой для реализации оказалась задача обеспечения условий быстрого гашения дуги при КЗ на линии. Несколько лет расчетов на ЭВМ, проведенных сотрудником сектора СТК Г.Мальцевым, показали, что выбранные «Энергосетьпроект» мощности ТРГ и ФКЦ недостаточны для полноценной реализации этой неординарной функции.

Тем не менее, к 1988 году все оборудование этого уникального СТК было разработано и готово к изготовлению. К сожалению, развал СССР не позволил реализовать этот проект и обеспечить работу построенной электропередачи с номинальными параметрами.

Параллельно вышеупомянутому проекту сектор СТК разработал СТК для подстанции 220 кВ «Красноленская» РЭУ «Тюменьэнерго» мощностью 150 Мвар. Рабочий проект установки СТК был выполнен УО

«Энергосетьпроект» в 1989 г., но и этот СТК также не был реализован. В СССР уже полным ходом шла перестройка, и до СТК никому не было никакого дела!

## ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

После распада СССР в отечественном СТК-строении наступила пауза длительностью 15 лет, которая была преодолена в начале XXI века, когда в России появилась потребность в мощных высоковольтных СТК, обусловленная строительством новых предприятий черной металлургии с ДСП. А позже и сетевые компании начали применять СТК на подстанциях магистральных линий электропередачи.

Но их производство возобновилось уже в новых организационных условиях и с применением новых технологий, хотя и с использованием базовых принципов, программных средств и опыта внедрения первых советских СТК. Технологическим преемником ОВПТ ВЭИ стала компания АО «Ансальдо-ВЭИ» (с 2013 года – АО «Нидек АСИ ВЭИ»), которой не только удалось сохранить основные знания в области технологий управления и контроля мощных высоковольтных тиристорных вентилей СТК, но и развить их с применением современной элементной базы и цифровых принципов управления СТК. Данные шаги позволили АО «Нидек АСИ ВЭИ» стать признанным лидером в области СТК-строения в России и странах СНГ, и единственной российской компанией-производителем СТК для металлургических заводов с мощными дугowymi сталеплавильными печами. С 2006 г. компания поставила на промышленные предприятия и сетевые подстанции России более 40 СТК общей мощностью около 3000 МВА. В настоящее время идет выполнение ряда заказов высоковольтных СТК, включая уникальный СТК мощностью 320 Мвар напряжением 35 кВ, аналогов которому не существует в России и странах ближнего зарубежья, для строящегося металлургического завода «Эколант», оснащенного «зеленой» технологией производства стали, а также разработка новых проектов применения СТК. Необходимо отметить, что производство СТК АО «Нидек АСИ ВЭИ» локализовано в РФ практически на 100 %, что обеспечивает российских потребителей бесперебойными постав-



Рис. 6. ООО «НЛМК-Калуга», СТК 35 кВ 180 Мвар для ДСП 150 МВА и АПК 16 МВА



Рис. 7. ООО «АЭМЗ», г. Абинск, СТК 35 кВ 180 Мвар для ДСП 130 МВА и АПК 24 МВА

ками продукции в условиях действия западных санкций.

## ВЫВОДЫ

1. Изложена предыстория разработки СТК на основе ртутных вентилях вплоть до 70-х годов прошлого века в ВЭИ.

2. Выполнен анализ развития техники СТК, преобразователей и мощного испытательного стенда МИС на этапе 70–90-х годов прошлого века в ВЭИ.

3. Показаны тенденции мирового развития электроэнергетики в части средств компенсации реактивной мощности и комплексы электрооборудования в ВЭИ.

4. Анализируются СТК для металлургии и электроэнергетики, разработанные в ВЭИ до 90-х годов прошлого века, техническое, организационное и кадровое обеспечение разработки, производства и ввода в эксплуатацию.

5. Рассмотрено состояние производства СТК в настоящее время.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Флагман отечественной электротехники: 90 лет ФГУП ВЭИ /Всероссийский электротехнический институт

им. В.И. Ленина; [авт.-сост. Л.В. Травин. – М.: Три квадрата, 2011. – 344 С.

2. Ивакин В.Н., Сысоева В.Г., Худяков В.В. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы /Под ред. В.В. Худякова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 336 С.

3. Шульга Р.Н., Хренников А.Ю. Обеспечение надежной работы электрооборудования с учетом предыдущих и перспективных разработок ВЭИ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2021-96 С.: ил. [Библиотечка электротехника, прил. к журналу «Энергетик». Вып 10 (274)].

4. Шульга Р.Н., Хренников А.Ю. Обеспечение надежной работы электрооборудования и инновационные разработки ВЭИ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2022. – 98 С.[Библиотечка электротехника, прил. к журналу «Энергетик». Вып 10 (286)].

5. Шульга Р.Н., Хренников А.Ю. История создания МИС для реализации ППТ. Международная конференция РНК по истории и философии науки и техники РАН, 2022, С. 423–425.

6. Шульга Р.Н., Овчаров И.В. Вклад ВЭИ в технику постоянного тока высокого напряжения. Международная

конференция РНК по истории и философии науки и техники РАН, 2022, С.425–428.

7. Шульга Р.Н., Смирнова Т.С. Вклад ВЭИ в технику постоянного тока высокого напряжения. «Энергоэксперт» № 3,2021, С. 68–75.

8. Ольшванг М.В., Таратута И.П., Чуприков В.С. Особенности разработки статического тиристорного компенсатора для передельных металлургических заводов. // Тезисы докладов н/т конференции «Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических системах». М., МДНТП, 1982 г.

9. Нечаев О.П., Таратута И.П., Чуприков В.С. Электрические воздействия на оборудование статического тиристорного компенсатора на Молдавском металлургическом заводе. // «Электротехника» № 8, 1989 г.

10. Чуприков В.С. Применение статических тиристорных компенсаторов для ограничения коммутационных перенапряжений на линиях переменного тока. // Тезисы докладов Всесоюзной н/т конференции «Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовоточной и полупроводниковой техники», ч. I. М., 1989 г.

11. Чуприков В.С. Управление статическим тиристорным компенсатором для линий электропередачи. // «Электричество», № 4, 1990 г.

12. Чуприков В.С. Комплекс программ для расчета параметров статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности. // Сборник научных трудов ГУП «Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина» «Системы управления и силовая электроника». М., 2001 г.

13. Кузьменко В.А., Таратута И.П., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (опыт разработки и внедрения). // «Электро», № 5, 2003 г.

14. Чуприков В.С. Компенсация реактивной мощности – ключ к повышению передаточной способности электрических сетей. // «Энергоэксперт», № 4, 2008 г.

15. Чуприков В.С. Концепции применения статических тиристорных компенсаторов в электрических сетях сверхвысокого напряжения // «Энергоэксперт», № 5, 2014 г.



## АО «Нидек АСИ ВЭИ» – решения для улучшения качества электроэнергии с 1996 года

**100 % локализация быстродействующих высоковольтных тиристорных устройств компенсации реактивной мощности: СТК и УШРТ! Суммарная мощность устройств эксплуатирующихся в России и СНГ около 3000 МВА!**

Компания обладает 40-летним опытом разработки технических решений по улучшению качества электроэнергии в промышленности и энергетике и является ведущим российским производителем устройств компенсации реактивной мощности типа СТК мощностью до 320 Мвар, УШРТ мощностью до 180 Мвар, СТАТКОМы мощностью до 130 Мвар, обладает собственными технологиями в области силовой электроники, систем управления и программного обеспечения, обеспечивающими устойчивое развитие в условиях негативного воздействия внешних факторов. Компания успешно продолжает наращивать объемы производства и поставок оборудования российским заказчикам.



2021 г. СТК 20 Мвар 10 кВ для симметрирования напряжения и фильтрации высших гармоник от внешней сети 110 кВ



2022 г. УШРТ 30 Мвар 220 кВ для стабилизации напряжения и компенсации зарядной мощности линии 220 кВ.



2022 г. СТАТКОМ+ФКЦ 8 Мвар 6 кВ для компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник



2023 г. УШРТ 25 Мвар 110 кВ для стабилизации напряжения и компенсации зарядной мощности линии 110 кВ

**МНОГОУРОВНЕВЫЕ СТАТКОМы напряжением 6...35 кВ мощностью до 130 МВА  
Собственное производство в России, испытательный и сервисный центр**

# ОБРАЗОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ – ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ РИСК ДЛЯ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ

КРИСТИАН ПЁНИКЕР, Эксетерский университет, Великобритания

Силовые трансформаторы (СТ) являются неотъемлемой частью электрической сети, и их отказы могут серьезно повлиять на надежность сети и привести к финансовым потерям. Одна из причин отказа СТ – образование пузырьков в изоляции обмоток, которое связано с быстрым повышением температуры из-за сильных кратковременных перегрузок. Попадая в область сильного электрического поля, пузырьки могут вызвать отказ СТ из-за пробоя. Таким образом, риск образования пузырьков является одним из основных факторов, ограничивающих нагрузку СТ, и понимание основ механизмов образования пузырьков позволит при необходимости использовать кратковременные перегрузки СТ с минимальными рисками.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, перегрузка, температура, отказ, пузырьки, вода, бумага, старение, обмотка, изоляция

В статье изучается процесс образования пузырьков в системах изоляции СТ. Автором представлена испытательная установка, которая была разработана для проведения последовательного исследования возможных воздействующих факторов, таких как повышение температуры и тип и состояние различных изоляционных материалов. Были проведены испытания с минеральным маслом и нетермостойкой крафт-бумагой, чтобы подтвердить пригодность испытательной установки для изучения воздействующих факторов на процесс образования пузырьков.

## ТЕМПЕРАТУРА ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

В стандартах IEC и IEEE [1, 2] содержатся рекомендации по условиям нагрузки СТ как в нормальных, так и в аварийных условиях эксплуатации, для предотвращения выхода СТ из строя из-за образования пузырьков. Согласно этим рекомендациям, максимальная температура наиболее нагретой точки составляет 140 °С, и превышение этого значения может привести к образованию пузырьков в изоляции обмоток СТ. Кроме того, для изоляции, состоящей из минерального масла и нетермостойкой крафт-бумаги при-

водится уравнение [2–4] для расчета температуры образования пузырьков в зависимости от влагосодержания в бумаге, давления в системе и наличия растворенных газов. Различные исследования показали, что, помимо прочего, влагосодержание является основным параметром, влияющим на образование пузырьков [4–9].

Из уравнения для принятого температурного ограничения в 140 °С следует, что влагосодержание в бумаге составляет около 2 %. Температура и влагосодержание в бумаге тесно взаимосвязаны и влияют на образование пузырьков в изоляции СТ, поэтому важно уделять особое внимание этим факторам для предотвращения негативных последствий.

В зависимости от условий нагрузки температура в СТ постоянно меняется, что также влияет на состояние изоляции и миграцию химических веществ между жидкой и твердой изоляциями. Кроме того, обмотки имеют неравномерное распределение температуры, причем наиболее нагретые точки обычно находятся в верхней части обмоток.

Если рассматривать влагосодержание в бумаге как один из основных факторов, влияющих на образование пузырьков, то надо иметь в виду, что на него сильно влияет локальная температура внутри системы. Температу-

ра и влагосодержание в бумаге имеют обратную зависимость, поэтому при более высокой температуре влагосодержание в бумаге будет меньше, и наоборот. Кроме того, в СТ химическое равновесие трудно достижимо – вода постоянно мигрирует между бумагой и маслом. Все эти факторы препятствуют возможности оценить риски образования пузырьков на основе уравнения, приведенного в стандартах. В дополнение к постоянной нагрузке возможные сценарии могут включать гораздо больше колебаний, и пока не совсем ясно, каково влияние таких условий нагрузки на вероятность образования пузырьков. Это ставит под сомнение возможность применения этого уравнения для сценариев, где также необходимо учитывать условия нагрузки СТ и состояние изоляции.

## ФАКТОРЫ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВ

Явление образования пузырьков в бумажно-масляной изоляции СТ изучается в течение нескольких десятилетий. Согласно данным [8, 10], образование пузырьков зависит от наличия микропузырьков, которые возникают из растворенных частиц. С повышением температуры газы и вода диффундируют в микропузырь, что приводит к увеличению его объема. Как след-

стве, когда внутреннее давление пузырька превышает внешнее давление, может возникнуть устойчивый пузырь. Этот процесс требует быстрого повышения температуры, приводящего к испарению воды за короткое время, при этом объем водяного пара превышает объем воды в 1700 раз [8]. Как следствие, если пузырьки возникают в области с высокой напряженностью электрического поля или перемещаются в нее, это может привести к возникновению частичных разрядов.

Большинство имеющихся исследований было выполнено с наиболее распространенным сочетанием изоляционных материалов: нетермостойкая крафт-бумага и минеральное масло. В исследованиях предложено несколько важных параметров, таких как [8]:

- количество испаряемой воды в бумаге;
- микроструктура бумаги;
- поверхностное натяжение;
- градиент повышения температуры;
- внешнее давление, статическое давление в жидкости;
- растворенные газы в масле.

На рис. 1 приведены два примера факторов, влияющих на температуру образования пузырьков в зависимости от влагосодержания в бумаге. В а) состояние крафт-бумаги варьируется в зависимости от степени полимеризации (СП) в сочетании с минеральным маслом. Воздействие минерального и растительного масла в сочетании с крафт-бумагой сравнивается в б). Кроме того, тщательный анализ исследуемых факторов и текущих ограничений данных был проведен в [11, 12].

Учитывая, что для образования пузырьков температура наиболее нагретой точки должна превышать 140 °С,

а влагосодержание в бумаге при этом составлять 2 %, значения температуры образования пузырьков в литературных данных варьируются примерно от 140 °С до 155 °С. Этот диапазон подчеркивает возможное влияние других факторов для одной и той же комбинации изоляционных материалов и может отражать различия в парке СТ. Следовательно, применение единственного значения температуры, основанного на влагосодержании в бумаге, может быть поставлено под сомнение даже для наиболее распространенного типа изоляции.

Дополнительным и часто упускаемым из виду фактором является разница между используемыми испытательными установками и процедурами, упоминаемыми в литературе, такими как толщина изоляции, методы наблюдения или измерения, которые, вероятно, влияют на разницу температур и еще не полностью изучены. Скорость повышения температуры является еще одним важным фактором. Недостаток информации о таких факторах ставит под сомнение сопоставимость литературных данных, чтобы предлагать обновленные модели для оценки потенциального риска образования пузырьков.

Таким образом, последовательное исследование воздействия различных факторов на образование пузырьков в системах изоляции СТ, таких как нагрузка или альтернативные изоляционные материалы, представляется необходимым для оценки возможных будущих сценариев. В идеале измерения должны проводиться в проверенных условиях с той же испытательной установкой, чтобы гарантировать сопоставимость результатов.

## ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Ведущий рубрики



**Дарьян Леонид Альбертович**

Д.т.н., профессор НИУ МЭИ, директор по научно-техническому сопровождению АО «Техническая инспекция ЕЭС», заслуженный член СИГРЭ

### ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для изучения образования пузырьков в системах изоляции СТ была разработана испытательная установка на основании аналогичного эксперимента Хайнриха [13], проведенного в конце 1970-х годов. Предлагаемая испытательная установка (рис. 2) состоит из стеклянной пробирки диаметром 25 мм и длиной 150 мм. Пробирку заполняют 40 мл изоляционной жидкости и погружают в нее патронный нагреватель длиной 90 мм (220 В, 100 Вт), который размещают по центру относительно шайб сверху (85 мм) и снизу (0 мм). Таким образом, установка имеет осесимметричную конструкцию по отношению к центру патронного нагревателя и обе-

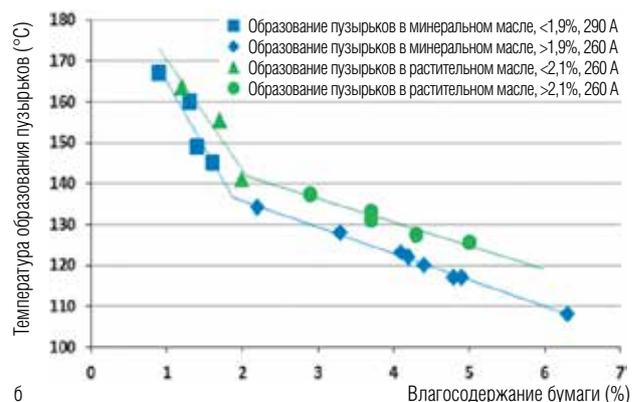
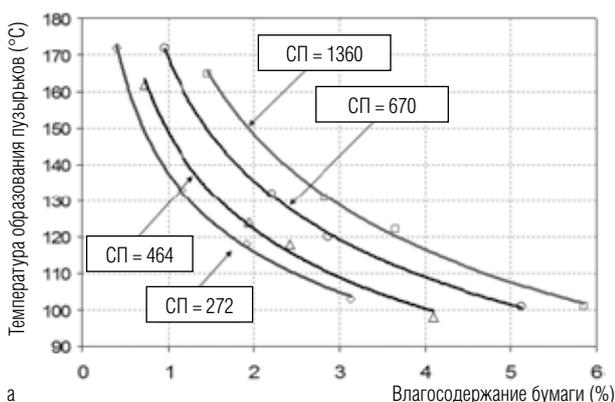


Рис. 1. а) Влияние СП и б) альтернативных изоляционных жидкостей на температуру образования пузырьков, на основании данных из [6, 7].

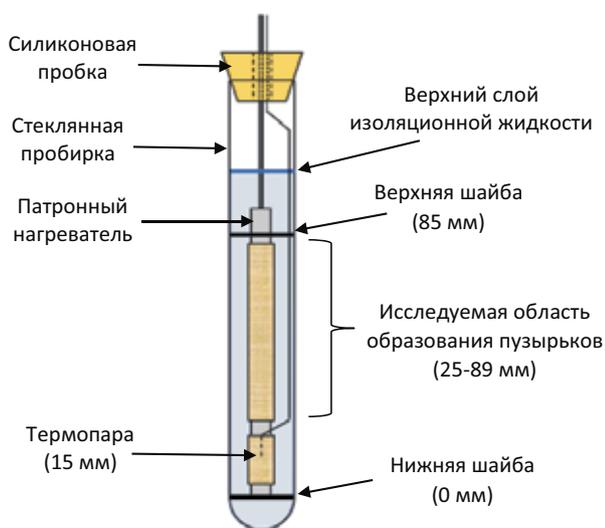


Рис. 2. Эскиз испытательной установки

спечивает одинаковые условия нагрева по окружности поверхности. Полая силиконовая пробка, прикрепленная к верхней части стеклянной пробирки, фиксирует провода и обеспечивает дополнительную поддержку при сохранении свободного пространства под давлением окружающей среды во время испытаний. Патронный нагреватель при этом обернут изоляционной бумагой в исследуемой зоне образования пузырьков (25–80 мм). Кроме того, на расстоянии 15 мм крепится термопара, которая используется для измерения эталонной температуры. Испытательная установка нагревается путем подачи напряжения на патронный нагреватель через лабораторный автотрансформатор. Две видеокамеры, расположенные в противоположных направлениях, используются для регистрации пузырьков, образующихся во время испытаний. Таким образом, разработанная установка обеспечивает одинаковые условия по периметру и позволяет быстро и легко изменять условия испытаний.

### ТЕРМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Температура – один из ключевых параметров в процессе образования пузырьков. Поэтому важно знать тепловой профиль как патронного нагревателя, так и жидкости. Тепловой профиль испытательной установки был получен на основании нескольких измерений (рис. 3). Температуру измеряли на поверхности патронного нагревателя (под слоями бумаги), на поверхности бумаги, между

поверхностями бумаги и стекла, а также на поверхности стекла на семи уровнях высоты вдоль пробирки, в результате чего было получено 28 точек. Каждое измерение было выполнено отдельно, чтобы уменьшить воздействие погружных термопар (стержневого типа диаметром 0,5 мм) на поток жидкости или поверхность патронного нагревателя. Проведение этих измерений стало возможным благодаря высокой повторяемости отдельных циклов нагрева (см. раздел 6).

На созданной на основе измерений тепловой карте (рис. 4) показано изменение во времени распределения температуры внутри образца. Патронный нагреватель обладает неравномерным температурным профилем с наиболее нагретой областью между 45 мм и 60 мм, которая, вероятно, является областью образования пузырьков. Неравномерный температурный профиль патронного нагревателя не позволяет измерить температуру напрямую в процессе образования пузырьков. Таким образом, испытания на определение температуры в месте образования пузырьков проводились в два этапа, о чем подробнее сказано в следующем разделе.

### ИСПЫТАНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ

Поскольку тепловой профиль вдоль патронного нагревателя является неравномерным, был разработан метод определения температуры образования пузырьков, при котором измерения

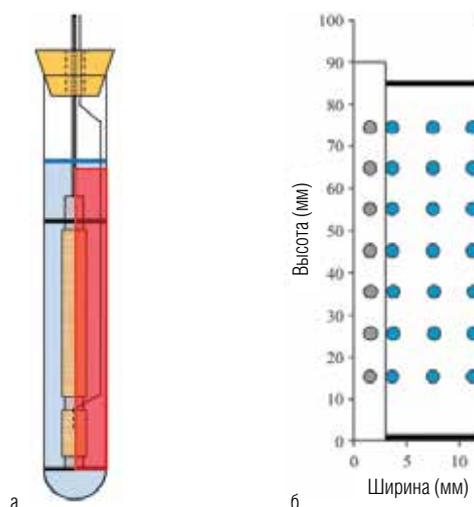


Рис. 3. а) Схема испытательной установки с выделенной областью, б) иллюстрирующей точки расположения термопар

проходят в два этапа. На первом этапе отслеживают время и место образования пузырьков, а на втором этапе измеряют температуру в месте образования пузырьков. Кроме того, термопара, прикрепленная на расстоянии 15 мм, используется для проверки повторяемости теплового профиля между двумя испытаниями. Подробная информация об этапах испытания приведена ниже.

### Этап 1: Наблюдение за образованием пузырьков

Напряжение скачкообразно повышалось, чтобы вызвать первый цикл нагрева, во время которого с помощью видеокамер регистрируется образование пузырьков, а температура в контрольной точке (15 мм) определяется с помощью регистратора. Электропитание отключают, как только начинается образование пузырьков, и образец бумаги извлекают для измерения в нем влагосодержания во время образования пузырьков. Точное время и место образования пузырьков затем определяют из видеозаписей.

### Промежуточный этап:

Когда нагреватель остывает, термопару прикрепляют к поверхности патронного нагревателя под замененными слоями бумаги в месте, где началось образование пузырьков на первом этапе.

### Этап 2: Измерение температуры

Образец нагревают посредством того же скачка напряжения, регистри-

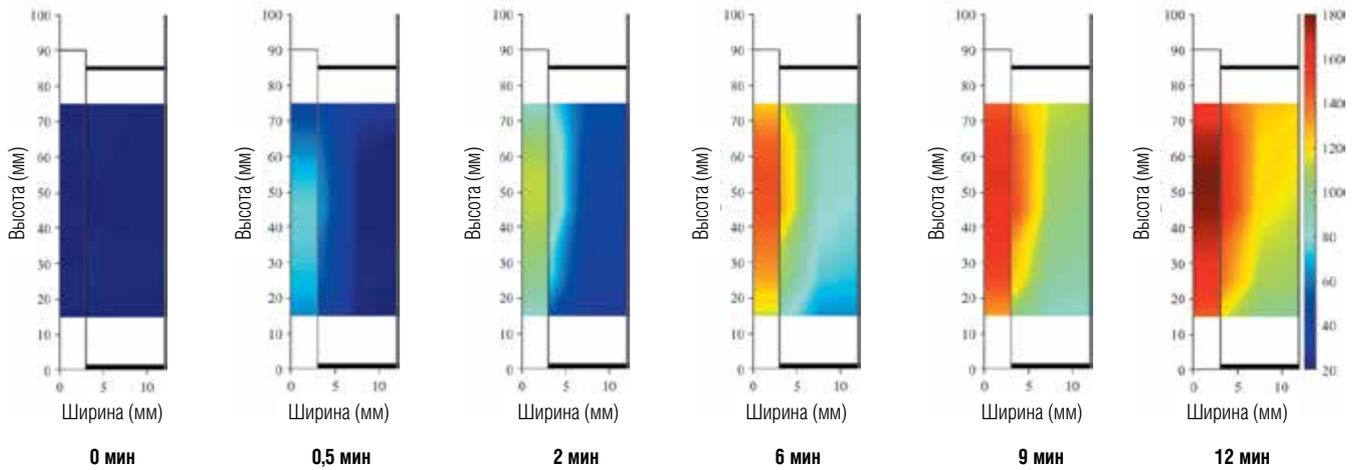


Рис. 4. Тепловые карты, демонстрирующие изменение температуры внутри образца во время цикла нагрева

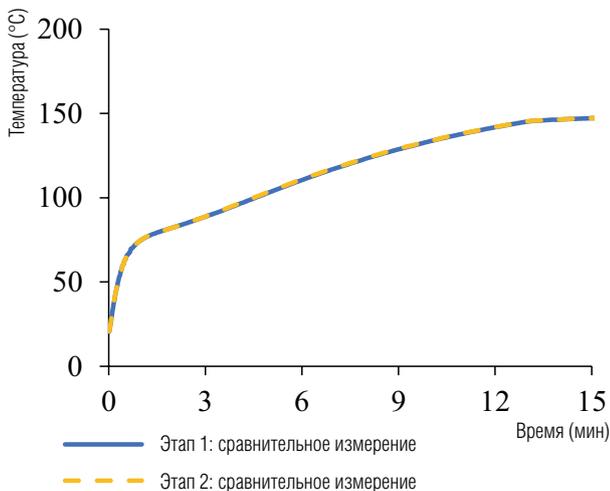


Рис. 5. Сравнение эталонных измерений на первом и втором этапах испытаний для проверки повторяемости

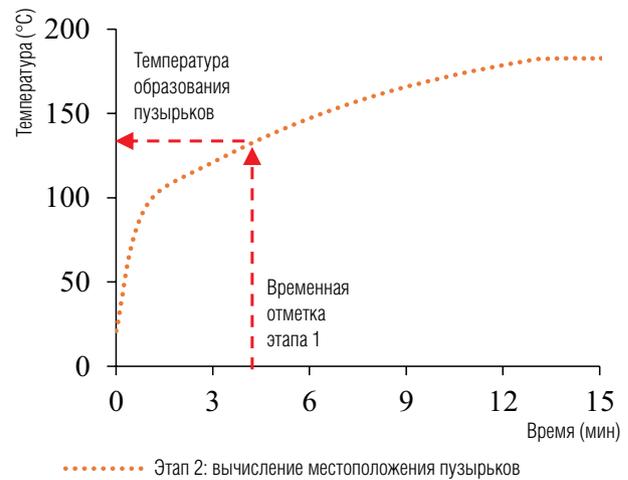


Рис. 6. Корреляция первого и второго этапов испытаний для определения температуры в месте образования пузырьков

руя температуру в месте образования пузырьков и контрольной точке (15 мм) в течение времени, превышающего время образования пузырьков на первом этапе.

**Корреляция результатов каждого отдельного этапа:**

Температурные профили, зарегистрированные в контрольной точке (15 мм), используются для проверки повторяемости между двумя этапами (рис. 5). Затем время до образования пузырьков, полученное на первом этапе, используется для оценки температуры образования пузырьков из результатов измерения температуры на втором этапе (рис. 6).

Тепловой профиль патронных нагревателей определяют до испытаний, и любой нагреватель с отклонениями

исключается. Кроме того, были проведены многократные измерения нагревателей с одним патроном, чтобы подтвердить воспроизводимость отдельных нагревателей. На рис. 7 показан температурный профиль, полученный в результате измерений в разные дни, в двух точках – 15 мм и 50 мм и указано максимальное стандартное отклонение в 1 °С. Кроме того, были проведены испытания с различными нагревателями, где было получено максимальное стандартное отклонение, равное 2 °С.

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ**

Помимо температуры, ключевым фактором, влияющим на процесс образования пузырьков, является влагосодержание в бумаге. Как и в случае

с тепловым профилем испытательной установки, для оптимизации результатов исследования требуются тщательный анализ и соответствующая процедура измерения. В большей части литературы не берется во внимание миграция воды в системе и предполагается, что влагосодержание в момент образования пузырьков остается таким же, как и начальное влагосодержание [4, 6]. Однако предварительные испытания, проведенные с разработанной установкой, указывают на значительную миграцию влаги во время процесса нагревания, и поэтому для измерения влагосодержания в бумаге было выбрано значение влагосодержания сразу после образования пузырьков на первом этапе.

Поэтому образец бумаги следует брать сразу после начала образова-

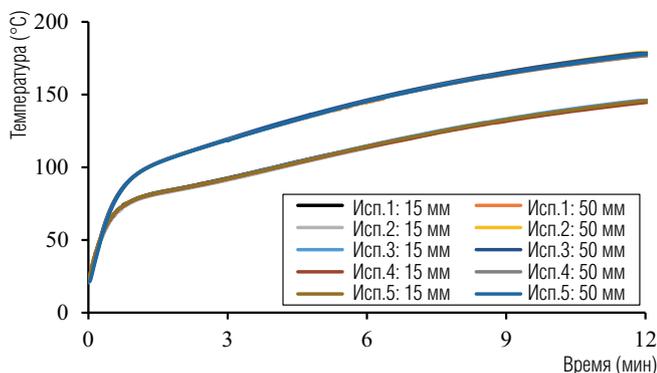


Рис. 7. Температурные профили, измеренные в разные дни и в разных местах, демонстрирующие высокую повторяемость

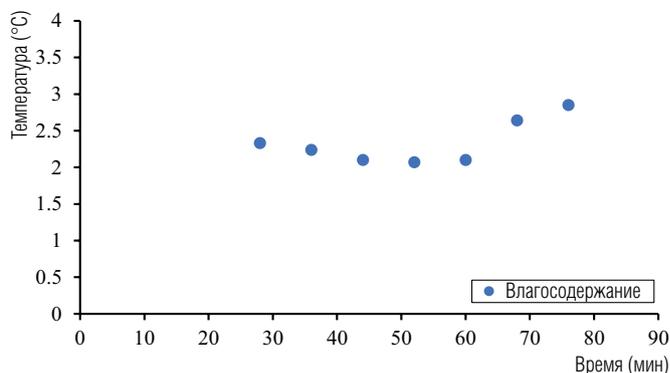


Рис. 8. Влагосодержание в бумаге в зоне наблюдения после нагревания

ния пузырьков и отключения питания. Образец бумаги для измерения влагосодержания берется из внутреннего слоя, поскольку именно в нем образуются пузырьки. Этот процесс должен выполняться максимально быстро, чтобы избежать любого воздействия условий окружающей среды. Измерение влажности, проведенное с несколькими образцами непосредственно перед началом образования пузырьков и после, подтвердило, что процесс образования пузырьков оказывает незначительное влияние на влагосодержание в бумаге, что может быть связано с предотвращением чрезмерного образования пузырьков путем прекращения испытания при первом наблюдении образования пузырьков. Кроме того, объем воды в газообразной фазе примерно в 1700 раз больше, чем в жидкой фазе [8], что означает, что пузырьки могут образовываться из гораздо меньшего объема воды.

Место взятия образца для измерения влагосодержания выбиралось путем измерения влагосодержания в нескольких местах по высоте патронного нагревателя. На рис. 8 приведены показатели влагосодержания в семи точках по высоте патрона, полученные в ходе испытания образца бумаги, подвергнутого нагреву. Наиболее нагретая область (от 45 мм до 60 мм) имеет самую низкую влажность и является одинаковой. Это подтверждает, что измерение влагосодержания в любом образце бумаги, взятом из наиболее нагретой области, является репрезентативным для влагосодержания в наиболее нагретой области. Поэтому для измерения влагосодержания был

использован один большой образец, взятый из этой области. Образцы, в которых образование пузырьков происходило за пределами этой области, исключались.

#### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Предварительные испытания направлены на проверку пригодности испытательной установки для измерения температуры образования пузырьков в соответствии с предлагаемой конструкцией испытательной установки, процедурой и методом измерения.

Для предварительных испытаний на образование пузырьков было изготовлено пять образцов с использованием нетермостойкой крафт-бумаги [14] и минерального масла [15]. Они были кондиционированы с высоким начальным влагосодержанием (выше 5 %), чтобы увеличить вероятность образования пузырьков. Два образца использовали для проверки равномерного распределения содержания воды по бумаге. Остальные три образца использовали для испытаний на образование пузырьков в соответствии с процедурой, описанной ранее. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Результаты испытаний показали, что места образования пузырьков находятся в наиболее нагретой области патронного нагревателя, что подтверждает предположения автора об основ-

ном месте образования пузырьков. Время образования пузырьков широко варьируется, как и, следовательно, температура образования пузырьков. Влагосодержание, измеренное в момент образования пузырьков, было ниже начального влагосодержания во всех трех образцах, что еще раз подтверждает миграцию влаги в изоляции. Однако все три результата следуют общей тенденции увеличения температуры образования пузырьков при уменьшении влагосодержания в бумаге. Результаты показывают, что могут существовать дополнительные факторы, такие как структура поверхности бумаги, которые могут влиять на хаотичность процесса образования пузырьков.

На рисунке 9 приведены результаты предварительных испытаний, нанесенные на график вместе с результатами литературных данных. Полученные результаты хорошо коррелируют с имеющимися данными и доказывают пригодность разработанных испытательной установки и метода измерений для дальнейших исследований.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потенциальной причиной отказа СТ при перегрузке может быть образование пузырьков в изоляции обмоток. На данный момент принято считать, что образование пузырьков возникает, когда температура наиболее на-

Таблица 1. Результаты предварительных испытаний

Номер пробы	Расположение на патронном нагревателе (мм)	Время до образования пузырьков (мин)	Температура образования пузырьков (°C)	Влагосодержание бумаги (%)
1	60	5,9	153	2,30
2	53	3,5	132	3,86
3	56	8,7	175	1,45

гретой точки превышает 140 °С при соответствующем влагосодержании в изоляции обмотки около 2%. Однако имеющиеся литературные данные относительно влагосодержания в бумаге сильно различаются и вряд ли сопоставимы из-за различий в используемых испытательных установках и параметрах. Следовательно, применение единого значения температуры для возможных будущих сценариев, таких как влияние изменений нагрузки или типа и состояния изоляционного материала, не является целесообразным.

В этой статье представлена разработанная испытательная установка, состоящая из пробирки с патронным нагревателем, для изучения образования пузырьков в системах изоляции СТ. Было подтверждено, что наиболее важными факторами, влияющими на образование пузырьков, являются температура и влагосодержание в бумаге. Во-первых, с помощью установки было выполнено подробное термокартирование, которое показало неоднородный тепловой профиль с отчетливой наиболее нагретой областью вдоль патронного нагревателя. На основании этих результатов было применено косвенное измерение температуры, чтобы избежать любого внешнего воздействия во время испытания до тех пор, пока не начнется образование пузырьков. Кроме того, был разработан новый метод определения влагосодержания в бумаге путем измерения содержания воды сразу после начала образования пузырьков, что позволяет учесть миграцию влаги в изоляции в процессе нагрева.

Предварительные результаты коррелируют с литературными данными, что подтверждает пригодность испытательной установки для исследования образования пузырьков в системах изоляции СТ. Установка может использоваться для изучения факторов, воздействующих на образование пузырьков, таких как повышение температуры или тип, толщина и состояние изоляции, что поможет выявить, представляет ли образование пузырьков потенциальный риск для надежности сети.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Power Transformers-Part 7: Loading Guide for Mineral-Oil-Immersed Power transformers, IEC 60076-7, IEC, 2018.

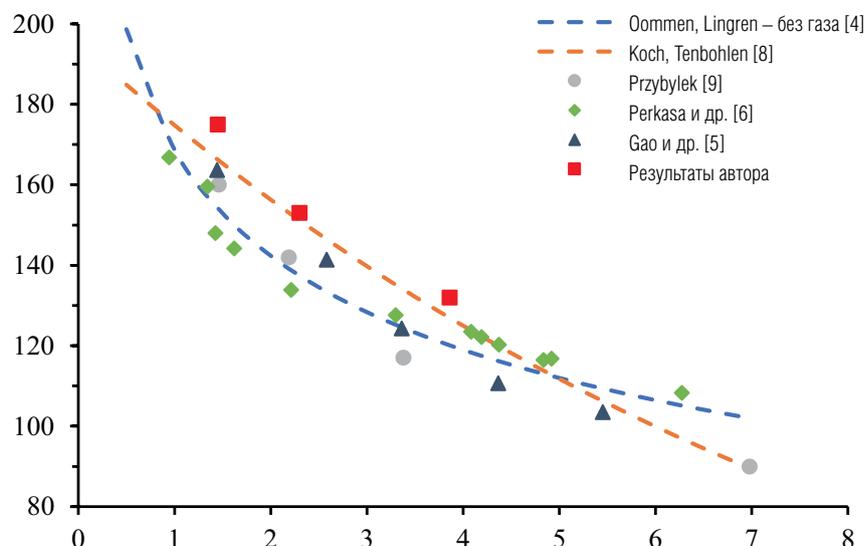


Рис. 9. Сравнение полученных результатов испытаний и литературных данных для изоляции, состоящей из нетермостойкой крафт-бумаги и минерального масла

2. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step Voltage Regulators, IEEE Standard C57.91-2011, IEEE, 2011.

3. Power transformers – Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation material, IEC 60076-14, IEC, 2013.

4. T.V. Oommen and S.R. Lindgren, “Bubble evolution from transformer overload,” in 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294), 2-2 Nov., vol. 1, pp. 137–142, 2001.

5. M. Gao, Y. Ding, T. Wang, T. Wen, and Q. Zhang, “Study on bubble evolution in oil-paper insulation during dynamic rating in power transformers,” in 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 6–9 July, pp. 341–344, 2016.

6. C.Y. Perkasa, N. Lelekakis, T. Cza-szejko, J. Wijaya, and D. Martin, “A comparison of the formation of bubbles and water droplets in vegetable and mineral oil impregnated transformer paper,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 5, pp. 2111–2118, 2014.

7. P. Przybylek, “A comparison of bubble evolution temperature in aramid and cellulose paper,” in 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), 30 June-4 July, pp. 983-986, 2013.

8. M. Koch and S. Tenbohlen, “Evolution of bubbles in oil-paper insulation influenced by material quality and ageing,”

IET Electric Power Applications, vol. 5, no. 1, pp. 168–174, 2011.

9. P. Przybylek, “The influence of cellulose insulation aging degree on its water sorption properties and bubble evolution,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 3, pp. 906–912, 2010.

10. S. Fischer, “Blasenbildung von in Flüssigkeiten gelösten Gasen,” PhD dissertation, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technical University of Munich, 2001.

11. J. Hill, Z. D. Wang, Q. Liu, C. Krause, and G. Wilson, “Analysing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation,” High Voltage, vol. 4, no. 3, pp. 210-216, 2019.

12. J. Hill, Z. D. Wang, Q. Liu, C. Krause, and D. Walker, “Review of experiments investigating transformer insulation condition on bubble inception temperature,” in 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 20-24 May, pp. 863–866, 2018.

13. F.W. Heinrichs, “Bubble Formation in Power Transformer Windings at Overload Temperatures,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 5, pp. 1576–1582, 1979.

14. Specification for cellulosic papers for electrical purposes. Part 3: Specifications for individual materials. Sheet 5: Special papers, IEC 60554-3-5, IEC, 1984.

15. Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment, IEC 60296, IEC, 2020.

# ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

РУСОВ В.А., к.т.н., ДИМРУС, г. Пермь

В статье рассмотрен минимально достаточный и технически возможный объем диагностических тестов для проведения периодических испытаний силовых трансформаторов, по результатам которых можно с приемлемой достоверностью определять текущее техническое состояние. Предложены четыре переносных диагностических прибора, при помощи которых эти испытания и диагностические тесты могут быть выполнены. Это приборы производства фирмы ДИМРУС: TD-Tester, TI-Tester, FreDA и PD-Analyzer. Разработано программное обеспечение оценки технического состояния силовых трансформаторов по результатам периодических испытаний, позволяющее в автоматическом режиме рассчитывать как коэффициент текущего технического состояния, так и индекс технического состояния силового трансформатора. По итогам всех расчетов программой автоматически формируется диагностическое заключение о возможности дальнейшей эксплуатации трансформатора.

**Ключевые слова:** силовые трансформаторы (СТ), испытания СТ, техническое состояние высоковольтной изоляции СТ, параметры диагностики, частичные разряды, коэффициент технического состояния трансформатора

Для обеспечения безаварийной работы силовых трансформаторов с рабочим напряжением 110 кВ и выше необходимо проведение периодических диагностических испытаний на месте эксплуатации, включающих в себя онлайн и офлайн тесты, проводимые на отключенном и работающем трансформаторе. По результатам проведения комплекса таких тестов и испытаний рассчитываются два интегральных параметра технического состояния:

- коэффициент текущего технического состояния трансформатора КТТС, связанный с наличием признаков дефектных состояний, определяющий необходимость проведения сервисных и ремонтных работ. Этот параметр рассчитывается экспертной системой и действует в рамках текущего межремонтного цикла эксплуатации трансформатора;

- индекс технического состояния трансформатора ИТС, характеризующий комплексное состояние всех подсистем силового трансформатора. Параметр рассчитывается с учетом

результатов текущих тестов на основании нормативных документов в интервале полного срока эксплуатации трансформатора.

Эти комплексные коэффициенты максимально полезны для практического использования, так как позволяют формализовать и интегрировать в себе множество конструктивных и технологических параметров трансформатора, а также учитывают выявленные признаки дефектных состояний. Это удобно для оптимизации управления эксплуатацией ответственного высоковольтного оборудования.

Очевидно, что если интегральные коэффициенты технического состояния трансформаторов определять не по результатам проведения периодических испытаний, а по данным работы систем стационарного мониторинга, то их диагностическая эффективность будет выше. Но при таком подходе к оценке технического состояния оборудования критическим будет экономический фактор: система мониторинга должна быть смонтирована на каждом трансформаторе, что обычно

дорого, а периодические испытания могут проводиться всего одним комплексом переносных приборов.

Необходимо сделать еще одно практически значимое замечание: периодические комплексные (выборочные) испытания силовых трансформаторов в настоящее время чаще всего проводятся по договорам сторонними организациями, что не всегда экономически обосновано. Если оснастить диагностические службы предприятия комплексом технических и алгоритмических средств, обязательно включающим экспертные диагностические системы, то эффективными периодическими комплексными испытаниями можно охватить весь парк трансформаторного оборудования. Специализированные предприятия и отдельные эксперты при такой организации диагностических работ будут привлекаться для анализа технического состояния только самых «сложных» трансформаторов.

Ниже в статье рассматривается оптимальный набор диагностических тестов для проведения комплексной

оценки технического состояния силовых трансформаторов, выбранных на основе совместного рассмотрения их особенностей: технической возможности проведения тестов на месте эксплуатации, информативности получаемых результатов и наличия сравнительно недорогих и доступных переносных приборов, позволяющих проводить эти испытания.

### ОФЛАЙН ТЕСТЫ ТРАНСФОРМАТОРА, ВЫВЕДЕННОГО ИЗ РАБОТЫ

#### Контроль омического сопротивления изоляции силового трансформатора

Это обычно первый и обязательный тест, который проводится диагностическим персоналом после расшиновки трансформатора. Для проведения этого измерения используются мегомметры, предложение которых на отечественном рынке достаточно велико. При выборе мегомметра предпочтение нужно отдавать тем приборам, которые также могут измерять коэффициент абсорбции (R60/15). При помощи этого коэффициента оценивается влагосодержание и наличие примесей в баке трансформатора и во вводах.

#### Стандартные испытания силовых трансформаторов

Для проведения стандартных испытаний силовых трансформаторов предназначен выпускаемый фирмой ДИМПУС универсальный прибор марки TD-Tester, внешний вид которого показан на рис. 1.

Все диагностические испытания силовых трансформаторов, проводимые на отключенном оборудовании при помощи прибора TD-Tester, могут быть объединены в три группы:

- первичные испытания трехфазного силового трансформатора. На этом этапе испытаний может быть определена группа соединения трехфазных обмоток трансформатора. Для трансформатора, уже находящегося в эксплуатации, этот тест является избыточным. К первичным испытаниям можно отнести контроль омического сопротивления обмоток трансформатора. В состав подготовительных операций, проводимых прибором TD-Tester перед проведением всех

других диагностических испытаний силового трансформатора, входит процедура размагничивания сердечника;

- испытания трансформатора, проводимые в режиме опытного холостого хода. Для проведения этих испытаний используется встроенный в прибор TD-Tester трёхфазный источник с регулируемой частотой и амплитудой выходного напряжения. По результатам проведения этих тестов определяется коэффициент трансформации, рассчитываются параметры намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора;

- стандартные испытания силового трансформатора, проводимые в режиме опытного короткого замыкания. По результатам этих испытаний определяется сопротивление рабочей ветви схемы замещения трансформатора  $Z_k$ . Сравнительный анализ этого параметра позволяет выявлять нарушения геометрической формы обмоток, возникшие после протекания через трансформатор сквозных токов короткого замыкания. Также в режиме опытного короткого замыкания при помощи прибора TD-Tester проводится FRSL тест, реализуемый при подаче на трансформатор испытательного напряжения переменной частоты. Проведение этого теста позволяет на основании анализа связи дополнительных потерь в обмотках трансформатора с частотой питающего напряжения выявлять наличие замыканий между элементарными проводниками в обмотках.

Достоинством практического использования прибора марки TD-Tester для проведения стандартных испытаний силовых трансформаторов является наличие в нем встроенных регулируемого трехфазного источника переменного тока и управляемого коммутатора. Прибор достаточно один раз подключить при помощи двух трехфазных кабелей к обмоткам ВН и НН трансформатора, после чего все перечисленные выше испытания могут производиться в автоматическом режиме в запрограммированной оператором последовательности без каких-либо внешних коммутаций.

Кроме возможности проведения набор стандартных диагностических тестов при помощи прибора марки



Рис. 1. Прибор TD-Tester для проведения стандартных тестов силового трансформатора

TD-Tester можно контролировать техническое состояние и других важных подсистем силового трансформатора. Например, наличие в приборе двух дополнительных измерительных каналов для контроля положения устройства РПН и вибрации бака РПН позволяет проводить в режиме опытного короткого замыкания универсальный DRM тест. В этом режиме контролируются техническое состояние всех контактных соединений РПН и временные параметры диаграммы работы контактора в положении моста. При проведении этого теста управление приводом устройства РПН может осуществляться вручную или автоматически с прибора TD-Tester.

В целом можно отметить, что при помощи прибора TD-Tester выполняются практически все значимые стандартные офлайн диагностические тесты силовых трансформаторов (за исключением контроля технического состояния высоковольтных вводов), являющиеся основанием для расчета интегральных коэффициентов технического состояния.

#### Оценка технического состояния высоковольтных вводов и обмоток трансформатора при помощи измерительного прибора марки TI-Tester

Измерительный прибор марки TI-Tester производства фирмы ДИМПУС (рис. 2) предназначен для проведения испытаний и оценки технического со-



Рис. 2. Прибор TI-Tester для контроля состояния высоковольтных вводов силовых трансформаторов



Рис. 3. Прибор FreDA для контроля деформаций обмоток и влагосодержания в изоляции

стояния изоляции высоковольтных вводов и обмоток силовых и измерительных трансформаторов.

Основными функциональными элементами прибора марки TI-Tester являются встроенные универсальный высоковольтный источник испытательного напряжения регулируемой амплитуды и частоты, эталонный вакуумный высоковольтный конденсатор и многоканальный синхронный векторный измеритель параметров токов и напряжений.

Благодаря наличию этих конструктивных особенностей при помощи прибора TI-Tester можно в автономном режиме выполнять все необходимые диагностические испытания и тесты, предназначенные для определения текущего технического состояния высоковольтной изоляции как вводов, так и обмоток силовых трансформаторов.

Измерение параметров высоковольтной изоляции производится при приложении к контролируемому трансформатору испытательного напряжения переменной частоты от встроенного источника высокового напряжения. Это позволяет уменьшить влияние наведенных помех промышленной частоты, уровень которых на территории

высоковольтной подстанции обычно очень высок.

По результатам выполненных испытаний в программном обеспечении прибора марки TI-Tester рассчитываются основные и самые информативные параметры высоковольтной изоляции:

- тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции высоковольтных вводов трансформатора;
- емкость контролируемого объекта (емкость С1 высоковольтного ввода трансформатора);
- активная, реактивная и полная мощности высоковольтного оборудования;
- активное, реактивное и полное сопротивления высоковольтного оборудования.

Наиболее важная функция прибора TI-Tester – измерение тангенса угла потерь в изоляции и величины емкости С1 высоковольтных вводов силовых трансформаторов. Именно эти параметры определяют техническое состояние вводов с различными типами изоляции.

### Контроль технического состояния изоляционной системы трансформатора

Оценка технического состояния высоковольтной изоляции силового трансформатора по результатам измерений первичных параметров, выполненных на отключенном от сети трансформаторе – достаточно сложная задача.

Наиболее информативный и достоверный – метод контроля концентрации растворенных газов, проводимый при помощи хроматографического анализа, но и этот метод имеет ограничения. Во-первых, необходимо, чтобы трансформатор перед взятием проб масла находился в эксплуатации. Во-вторых, при помощи этого метода контролируются только признаки наличия дефектных состояний – наличие зон электрических разрядов и тепловых перегревов элементов трансформатора. Само техническое состояние элементов изоляционной системы трансформатора (изоляционного масла и изоляции обмоток) при помощи этого метода не контролируется.

Влагосодержание в масле бака трансформатора – важный диагностический параметр, определяющий

его электрическую стойкость. Однако, измерять влагосодержание в пробе масла трансформатора, выведенного из работы для проведения испытаний, некорректно, количественно оно будет соответствовать предшествующему режиму работы трансформатора и чаще всего будет завышено.

Влагосодержание в твердой изоляции обмоток трансформатора может быть определено на основании пересчета данных по влагосодержанию в масле, или же может быть прямо или косвенно рассчитано с использованием трех диагностических методов: по величине коэффициента абсорбции ( $R_{60/15}$  – любой хороший мегомметр), по методу контроля возвратного напряжения (прибор AC-Tester производства фирмы ДИМПУС) или по методу частотной спектроскопии FDS (прибор FreDA производства фирмы ДИМПУС). Несмотря на разные красивые названия все эти методы работают по одному принципу: они базируются на регистрации и анализе токов абсорбции. К сожалению, следует сказать, что достоверность работы этих трех диагностических методов применительно к контролю влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора, очень низка. Причина этого очевидна: корректно решить одно уравнение, в котором присутствуют два неизвестных (последовательно включенные сопротивления масла в баке и твердой изоляции обмоток), невозможно.

Вероятно, что для получения корректных результатов необходим углубленный контроль параметров изоляционного масла в баке, но диагностическая направленность такого теста несколько иная, регенерация или даже замена масла связана с полным циклом службы трансформатора, а это уже другая целевая функция оценки текущего технического состояния.

### Контроль частотно зависимых параметров силового трансформатора

Существуют три метода испытаний силового трансформатора в режиме офлайн, когда на его обмотки подается напряжение переменной частоты. В зависимости от диапазона частот подаваемого напряжения методы предназначены для решения разных диагностических задач:

■ метод SFRA (метод контроля частотного отклика при переменной частоте), при котором к обмоткам трансформатора прикладывается переменное напряжение с частотой от 20 Гц до 20 МГц. При помощи этого метода производится поиск обмоток с деформированной формой. Метод является более чувствительным, чем аналогичная диагностика на основе анализа величины сопротивления короткого замыкания  $Z_k$  схемы замещения трансформатора;

■ метод FRSL (метод контроля случайных потерь в обмотках), при котором к обмоткам трансформатора прикладывается переменное напряжение с частотой от 15 до 500 Гц. Метод предназначен для поиска замыканий между элементарными проводниками в обмотках трансформатора. Метод реализован в приборе TD-Tester и частично описан выше;

■ метод FDS (метод частотной спектроскопии), при котором к обмоткам трансформатора прикладывается переменное напряжение с частотой от 0,0001 до 1000 Гц. Метод предназначен для контроля влагосодержания в изоляции обмоток трансформатора. На практике он используется отдельно или совместно с методом PDC. Как уже указывалось выше, достоверность получаемых результатов в данном методе достаточно низкая.

Для практической реализации метода SFRA для поиска деформаций в обмотках силового трансформатора можно использовать прибор FreDA, показанный на рис. 3. Прибор имеет два диагностических модуля и единый блок питания от сети и от встроенного аккумулятора.

Высокочастотный измерительный модуль прибора марки FreDA-SFRA реализует метод поиска деформаций обмоток трансформатора, а низкочастотный модуль FreDA-LF позволяет проводить диагностику в области сверхнизких частот по методу частотной спектроскопии FDS.

#### ОНЛАЙН ТЕСТЫ ТРАНСФОРМАТОРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Часть периодических диагностических испытаний трансформатора, предназначенных для оценки техни-

ческого состояния, производится под рабочим напряжением. В процессе этих испытаний контролируются физические процессы в трансформаторе, которые возникают только при наличии высокого рабочего напряжения.

#### Измерение частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов

Частичные разряды обычно возникают в изоляции силовых трансформаторов в зонах локальных изоляционных нарушений или дефектов, которые в процессе дальнейшей эксплуатации могут расширяться и в конечном итоге приводить к критическим перекрытиям полных изоляционных промежутков.

Оптимальным является измерение частичных разрядов при помощи датчиков-электромагнитных антенн, работающих в СВЧ диапазоне частот. Такие датчики при проведении измерений обеспечивают максимальную защиту от высокочастотных импульсных помех. Сложность состоит в том, что эти антенны должны быть заранее смонтированы внутри бака трансформатора на заводе изготовителе.

Оперативное измерение частичных разрядов в силовых трансформаторах можно проводить, используя датчики ВЧ диапазона частот, которые устанавливаются на измерительных вводах высоковольтных вводов трансформаторов. Простота установки ВЧ датчиков частичных разрядов практически на любых типах силовых трансформаторов во многом нивелируется очень высоким уровнем высокочастотных помех, имеющихся в этом диапазоне частот.

Для повышения достоверности получаемых диагностических результатов необходимо использовать приборы измерения частичных разрядов, способные отстраиваться от высокого уровня наведенных помех. К таким приборам можно отнести шестиканальный PD-Analyzer/6P, работающий в СВЧ и в ВЧ диапазонах частот.

После выявления наличия частичных разрядов в трансформаторе и определения типа дефекта можно провести его пространственную локализацию в баке, используя акустические датчики частичных раз-



Рис. 4. Прибор марки PD-Analyzer/6P для контроля частичных разрядов в изоляции

рядов и соответствующий диагностический прибор, например, AR700 или другой.

#### Оценка технического состояния конструкции трансформатора и качества прессовки обмоток и сердечника при помощи контроля вибрационных параметров

При помощи входящего в комплект прибора TD-Tester вибрационного датчика могут производиться дополнительные обследования силового трансформатора с целью оценки технического состояния его конструкции. Признаками ухудшения состояния конструкции обычно являются повышение общего уровня вибрации вообще и по отдельным зонам бака, а также появление в спектре вибрационного сигнала информативных синхронных и несинхронных гармоник.

В приборе TD-Tester также реализована диагностическая программа ВЕСТА, при помощи которой можно обрабатывать регистрируемые вибрационные сигналы и контролировать качество прессовки обмоток и сердечника трансформатора. Если при помощи диагностического параметра  $Z_k$  или по методу SFRA выявляются уже имеющиеся искажения формы обмоток, то при помощи вибрационного обследования выявляется ослабление прессовки, которое при протекании через трансформатор сквозных токов короткого замыкания может привести к искажению формы обмоток. Кроме того, возникновение практических всех нарушений формы обмоток трансформатора сопровождается скачкообразным снижением усилия прессовки.

### Экспертный расчет коэффициентов технического состояния трансформатора

После выполнения всего объема запланированных испытаний контролируемого силового трансформатора, получив большой объем первичной, промежуточной и итоговой экспертной информации по каждому диагностическому методу, персонал все еще не может однозначно ответить на три самых важных вопроса управления эксплуатацией этого ответственного высоковольтного оборудования. Эти вопросы следующие:

- нужен ли контролируемому трансформатору ремонт сейчас, или же он будет необходим на будущих этапах эксплуатации? Если сервисное обслуживание или ремонт все-таки нужны, то что и к какому сроку нужно готовить для эффективного проведения ремонтных работ?
- может ли трансформатор надежно работать дальше и безаварийно отработать предстоящий осенне-зимний период до следующего периодического обследования?

■ каков полный остаточный ресурс трансформатора, нужно ли планировать его замену и на каком временном интервале это нужно будет делать?

Фирмой ДИМПУС разработана специализированная версия программного обеспечения марки INVA-Portable, которая предназначена для ответа на эти важные эксплуатационные вопросы.

Информация о всех диагностических испытаниях контролируемого силового трансформатора, выполненных при помощи приборов TD-Tester, TI-Tester, FreDA и PD-Analyzer/6P, а также данные о концентрации растворенных в масле бака трансформатора газов собираются на персональном компьютере с программным обеспечением INVA-TD для дальнейшей комплексной обработки:

- встроенная в программное обеспечение специализированная экспертная диагностическая система разработки фирмы ДИМПУС рассчитывает обобщенный коэффициент текущего технического состояния КТТС силового трансформатора;

■ при помощи всей имеющейся информации с использованием формализованных нормативных графиков и табличных зависимостей, а также паспортных и иных параметров силового трансформатора, в программе автоматически рассчитывается индекс технического состояния контролируемого силового трансформатора ИТС;

■ по результатам проведенных расчетов программой формируется отчетный документ о техническом состоянии трансформатора. Совместный анализ коэффициента и индекса технического состояния дает возможность экспертной системе прогнозировать возможность и срок дальнейшей безаварийной эксплуатации трансформатора.

Если в памяти программы INVA-Portable уже хранится информация о предыдущем (одном или нескольких) комплексных обследованиях этого трансформатора, то это позволит выявить тренды в развитии технического состояния и более достоверно проводить все прогнозные расчеты, определяющие эффективное управление эксплуатацией трансформатора.

**Отраслевой журнал о последних изобретениях, разработках и тенденциях в области электротехники и электроэнергетики.**

**Главное отличие** – всестороннее рассмотрение поднятой проблемы: от технологий до экономической эффективности и социальной значимости.

**С нами сотрудничают** специалисты и руководители энергетических предприятий, крупные ученые-электротехники, а также эксперты из смежных отраслей промышленности. Журнал не просто рассказывает о новинках электротехники, но и сравнивает оборудование между собой.

**В сотрудничестве с зарубежными экспертами публикуются эксклюзивные материалы.** При этом издание не продвигает западные технологии, а лишь рассказывает то, чем обладают иностранные коллеги.



Издательский дом «Вся электротехника»

# ЭНЕРГОЭКСПЕРТ

информационно-аналитический журнал



000 «Издательский дом «Вся электротехника» ■ www.energyexpert.ru ■ e-mail: pvi@energyexpert.ru ■ тел.: (916) 591-94-24

на правах рекламы

# ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В СОСТАВЕ СОПТ

ВОРОШИЛОВ А.Н., ООО «Феникс», Москва

ХАКИМЗЯНОВ Э.Ф., к. т. н., АГЗАМОВ М.Ф., ГАЗЕТДИНОВ Р.Ф., ООО «ИЦ «ЭнергоРазвитие», Казань

Организация систем оперативного постоянного тока (СОПТ) на объектах электроэнергетики с использованием современного оборудования – перспективная техническая задача для производителей электрооборудования. В последнее время широко обсуждается применение литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) в качестве гарантированного источника энергии в системах оперативного постоянного тока на высоковольтных распределительных подстанциях. В статье рассматривается экономическое обоснование использования ЛИАБ в СОПТ.

**Ключевые слова:** литий-ионная аккумуляторная батарея, система оперативного постоянного тока, технико-экономическое обоснование

Первый проект с использованием ЛИАБ в СОПТ в России был реализован в 2013 г. при проведении реконструкции главной понизительной подстанции (ГПП) 220 кВ предприятия АО «Уральский электрохимический комбинат» (входит в Государственную Корпорацию «Росатом») [1]. В начале 2014 г. аналогичный проект был реализован на одной из компрессорных станций Комсомольского ЛПУ ООО «Газпром трансгаз Югорск» [2]. По результатам приемочных испытаний, проведенных после опытно-промыш-

ленной эксплуатации, возможность применения ЛИАБ в составе систем постоянного тока на объектах ПАО Газпром была закреплена в отраслевых стандартах [3, 4]. Экстраполяция данных реальной эксплуатации позволяет предположить, что срок эксплуатации ЛИАБ в составе СОПТ при правильно организованных алгоритмах ее работы составит не менее 20 лет, что соответствует общепринятым в отечественной энергетике требованиям к сроку службы для стационарных аккумуляторных батарей. Тем не менее,

несмотря на довольно успешный опыт, применение ЛИАБ в составе СОПТ до сих пор имеет ограниченный характер.

Один из факторов ограничения применения ЛИАБ в СОПТ – сложившееся мнение, что ЛИАБ дороже по сравнению с свинцово-кислотными (СКАБ). Однако расчеты экономической эффективности показали, что применение ЛИАБ в составе СОПТ экономически оправдано как на больших подстанциях (с высшим напряжением 110 кВ и выше), использующих обслуживаемые СКАБ

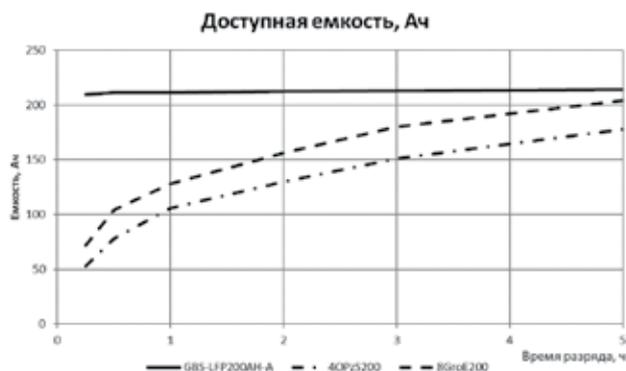


Рис. 1. Зависимость доступной емкости от времени разряда аккумуляторов ЛИА (GBS-LFP200Ah), СКА (40PzS 200, 8GroE 200), имеющих одинаковую номинальную емкость

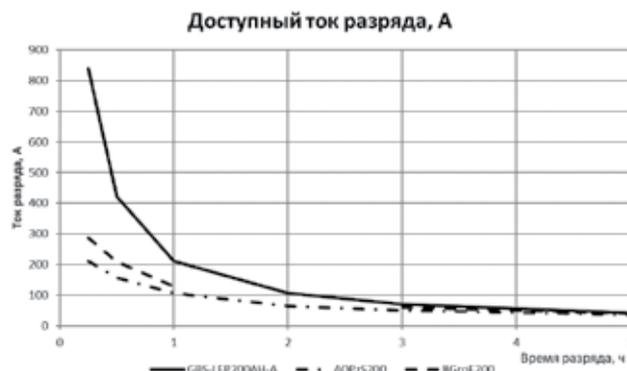
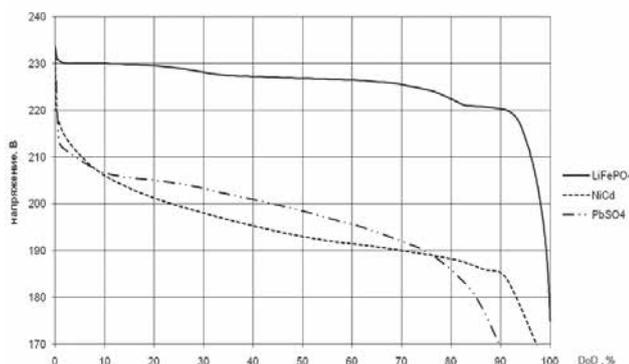


Рис. 2. Зависимость доступного тока разряда от времени разряда аккумуляторов ЛИА (GBS-LFP200Ah), СКА (40PzS 200, 8GroE 200), имеющих одинаковую номинальную емкость



**Рис. 3.** Зависимости напряжения от степени разряда для различных АБ при разряде токами 0,2 С (напряжение подзаряда каждой АБ равно 232 В)

открытого типа, так и на небольших подстанциях (с высшим напряжением 35–110 кВ), использующих герметизированные СКАБ. Результаты расчетов представлены ниже.

**СРАВНЕНИЕ ЛИАБ И СКАБ**

В основе функционирования литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) и

свинцово-кислотных аккумуляторов (СКА) лежат разные по типу электрохимические реакции. В данной работе рассматриваются ЛИА, которые в качестве активного вещества положительного электрода используют литий-железо-фосфат (LFP), в качестве активного вещества отрицательного электрода – нанострук-

турированный углерод. В качестве электролита используется соль лития, растворенная в смеси органических растворителей.

Детальное сравнение технических характеристик ЛИАБ и СКАБ, а также особенностей их эксплуатации является темой отдельной публикации, здесь мы ограничиваемся лишь кратким перечислением, которое представлено в таблице 1.

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ЛИАБ И СКАБ ОТКРЫТОГО ТИПА**

СКАБ открытого типа используются на подстанциях высшим напряжением 110 кВ и выше.

**Выбор параметров батареи**

Методика расчета аккумуляторной батареи (АБ) для СОПТ представлена в [12].

**Таблица 1.** Сравнение ЛИАБ и СКАБ

Параметр	ЛИАБ	СКАБ	Примечания
Разрядные характеристики	При переходе к большим разрядным токам происходит незначительное снижение емкости, обусловленное увеличением потерь энергии на внутреннем сопротивлении	При разряде в течение 30 минут доступная емкость становится меньше номинальной приблизительно в 2–3 раза [5; с. 67].	Разрядные характеристики представлены на рисунках 1 и 2 для АБ с номинальной емкостью 200 А·ч.
Значение поляризационного потенциала для единичного аккумулятора	5–10 мВ	150–180 мВ	При переходе ЛИАБ из режима поддерживающего разряда в режим разряда напряжение на ней уменьшается существенно меньше по сравнению со СКАБ. Это показано на рисунке 3, [6].
Кривая разряда	Пологая, напряжение изменяется незначительно вплоть до степени разряда 90 % (рисунок 3).	Значительное снижение напряжения при разряде	Данный факт описан в [8].
Величина внутреннего сопротивления	В 1,5 раз меньше по сравнению со СКАБ		Значение, приведенное к напряжению 2 В для единичного аккумулятора
Специальное помещение	Не требуется	СКАБ размещается в специализированных помещениях с классом взрывоопасности В-1а.	Требования [10; глава 4.4]
Чувствительность к температуре	Слабо чувствительны к воздействию высоких температур.	При увеличении температуры эксплуатации на каждые 10 С срок их эксплуатации сокращается в два раза [5; с. 32].	Для СОПТ на базе СКАБ иногда требуется система кондиционирования
Работа на толчковую нагрузку	Отличные характеристики при работе на толчковую нагрузку. Обеспечивает ток до 10 С	При работе на толчковую нагрузку иногда требуется использование дополнительных элементов или стабилизаторов напряжения.	Позволяет уменьшить номинал ЛИАБ по сравнению со СКАБ в несколько раз [9] или отказаться от использования дополнительных элементов
Необходимость организации системы контроля и управления (СКУ)	В процессе эксплуатации ЛИАБ необходим мониторинг состояния ее аккумуляторов (наличие СКУ).	СКУ применяется как опция	
Балансировка АБ	Требуется	Не требуется	Необходимо периодически выравнивать степень заряженности аккумуляторов в составе ЛИАБ.
Особенности АБ в режиме поддерживающего заряда	Требуется использование алгоритмов, ограничивающих влияние пульсаций напряжения на подзаряд ЛИАБ.	Режим поддерживающего заряда является нормальным режимом эксплуатации	Неправильная эксплуатация ЛИАБ в режиме поддерживающего заряда может существенно сократить сроки его эксплуатации.

<sup>1</sup> С – значение тока в относительных единицах (С-рейтинг). С-рейтинг определяет скорость разряда или заряда аккумулятора (батареи). С10 соответствует силе тока, при которой полностью заряженный аккумулятор разряжается в течение десяти часов, соответственно 1С – за один час, 0,5С или С2 – за два часа, 2С – за полчаса и т.п.

Для наглядности сравнения ЛИАБ и СКАБ взяты исходные данные из примера, представленные в приложении А указанной методики. Исходные данные для расчета параметров АБ представлены в таблице 2. Диаграмма нагрузки показана на рис. 4. Результаты расчетов параметров кабелей с медными жилами представлены в таблице 3.

В соответствии с методикой определяем параметры СКАБ и ЛИАБ. В качестве СКА рассмотрен аккумулятор типа БП (полный аналог GroE), поскольку данный тип лучше других обеспечивают импульс тока. В качестве ЛИА рассматриваются аккумуляторы производства GBS. Они имеют оптимальное соотношение цена/качество, кроме того, производителем предоставлены разрядные таблицы.

Определяем количество аккумуляторов в батарее, исходя из необходимости обеспечения напряжения поддерживающего заряда не выше  $1,05 U_n = 231$  В в рабочем режиме, и напряжения ускоренного заряда не выше  $1,1 U_n = 242$  В в послеаварийном режиме. Напряжение поддерживающего заряда выбранного типа СКА равно 2,23 В. Соответственно для батареи необходимо использовать 104 аккумулятора. Напряжение поддерживающего заряда для выбранного ЛИА равно 3,34–3,36 В. Соответственно для батареи выбираем 68 аккумуляторов.

Определяем минимально допустимое напряжение на единичном аккумуляторе в конце режима разряда в момент толчковой нагрузки. Напряжение определяется исходя из условия обеспечения напряжения на клеммах максимально удаленного электроприемника не ниже  $0,85 U_n = 187$  В. Падение напряжения на кабеле до наиболее удаленного потребителя в момент толчковой нагрузки составляет 7,42 В. Исходя из этого определяется минимально допустимое напряжение на выходе аккумулятора. Для СКА напряжение на его выходных клеммах должно быть не ниже 1,88 В. Для расчета берется ближайшее табличное значение сверху – 1,9 В. Для ЛИА при тех же параметрах имеем минимально допустимое напряжение 2,85 В. Для расчета берется ближайшее табличное значение сверху – 2,90 В.

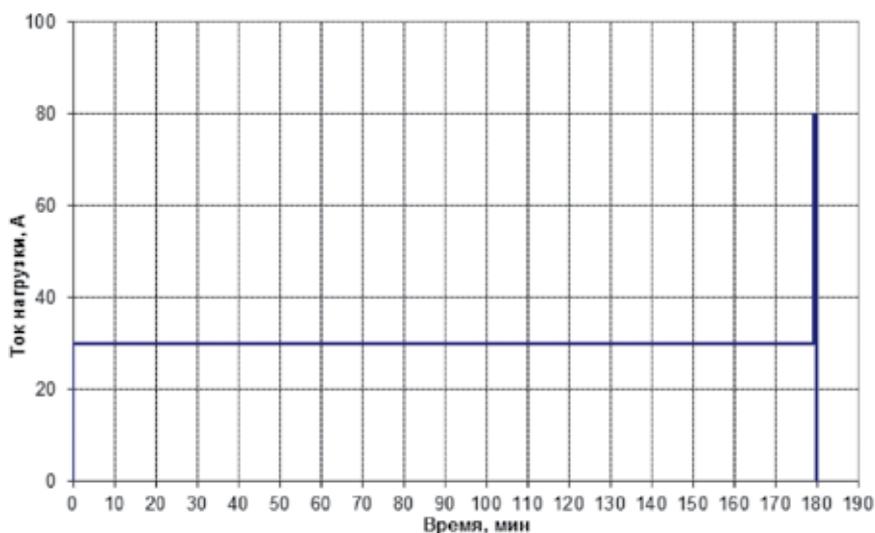


Рис. 4. Диаграмма нагрузки СОПТ

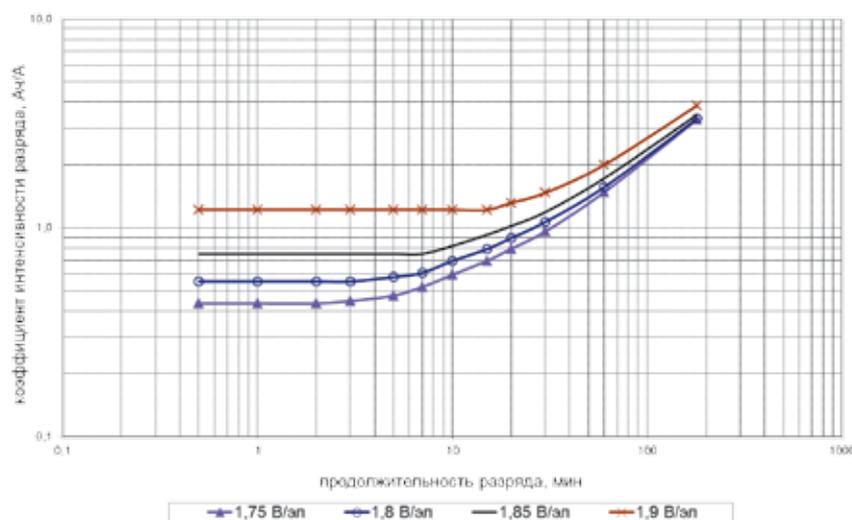


Рис. 5. Зависимость коэффициента интенсивности разряда, k(t) от продолжительности разряда для аккумуляторов 12БП 300

Таблица 2. Исходные данные для выбора АБ (пример 1)

Параметр	Значение	Примечание
Номинальное напряжение СОПТ, В	220	
Длительность аварийного режима, ч	3	
Ток постоянной и временной нагрузки, А	30	В течение трех часов
Ток кратковременной нагрузки (толчковый ток), А	50	В течение 5 сек в конце разряда
Ток наиболее удаленного потребителя, А	50	В течение 5 сек в конце разряда

Таблица 3. Параметры кабелей для расчета

Участок	Сечение, мм <sup>2</sup>	Длина, м	Сопротивление, мОм	Обозначение
Кабель от АБ до ЩПТ	185	20	3,9	RK1
Кабель от ЩПТ до ЭП	95	375	142,1	RK2

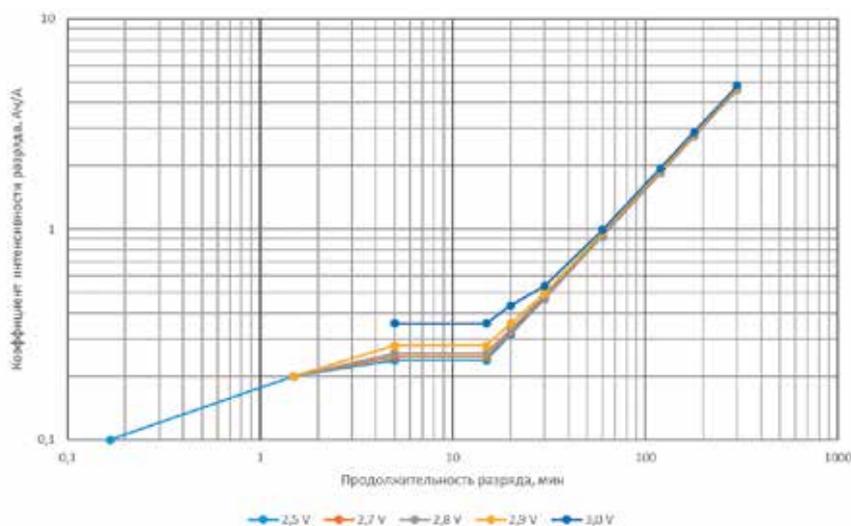


Рис. 6. Зависимости коэффициента интенсивности разряда,  $k(t)$  от продолжительности разряда для аккумуляторов GBSLFP-100AH

Определяем требуемую емкость аккумулятора исходя из графиков коэффициентов интенсивности разряда, характеризующих снижение емкости аккумуляторов при заданном времени разряда относительно номинальной емкости. Расчет делается для двух режимов:

- обеспечения заданного тока нагрузки в течение 3-х часового разряда (180 минут);
- обеспечения толчкового тока в течение 5 секунд в конце цикла разряда;
- обеспечения напряжения на выходе аккумулятора не ниже 1,90 В.

Графики коэффициента интенсивности разряда для СКА типа БП представлены на рис. 5.

Графики коэффициента интенсивности разряда для ЛИА представлены на рис. 6. График построен на основании разрядных таблиц, предоставленных производителем [13]. Кроме того, при построении графиков коэффициента интенсивности разряда учитывается тот факт, что производитель разрешает разряжать аккумулятор током до 10 С в течение 10 секунд, и током 5 С в течение 90 секунд.

Коэффициенты интенсивности  $k_i$  определяются временем разряда, снижением емкости аккумулятора при его разряде в течение этого времени относительно номинальной емкости, а также ограничением, связанным с тем, что аккумулятор к кон-

цу разряда не может быть разряжен полностью, а только до конкретного напряжения (в данном случае до напряжения 1,9 В). Из графика видно, что для разряда СКА до напряжения 1,9 В в течение времени 180 минут коэффициент интенсивности разряда  $k_1$  равен 3,8 (А·ч/А). Это означает, что для обеспечения тока 30 А в течение 180 минут требуется СКА емкостью С1 равной 114 А·ч. Если бы снижение емкости при разряде в течение трех часов не происходило, и аккумулятор мог быть разряжен полностью (до напряжения 1,8 В), то коэффициент  $k_1$  был бы равен 3,0.

Чтобы определить требуемую дополнительную емкость для обеспечения толчкового тока в конце разряда, нужно учесть коэффициент  $k_2 = 1,4$ . Это связано с тем, что согласно разрядным таблицам, для обеспечения напряжения на выходе аккумулятора не ниже 1,9 В, допустимый ток его разряда будет меньше 1 С. Таким образом дополнительная емкость

С2 равна 70 А·ч. Суммарная емкость СКА должна быть не менее 184 А·ч.

Аналогичный коэффициент  $k_1$  для ЛИА, разряжаемого до напряжения 2,9 В в течение 180 минут, равен 2,85 (А·ч/А)<sup>1</sup>. Требуемая емкость С1 равна 85,5 А·ч.

Коэффициент  $k_2$  для ЛИА равен 0,2, так как в течение заданного времени ЛИА может обеспечить ток 5 С<sup>2</sup>. Требуемая емкость С2 равна 10 А·ч. Суммарная емкость ЛИА должна быть не менее 95,5 А·ч.

Уменьшение коэффициента  $k_1$  (и требуемой емкости С1) у ЛИА по сравнению со СКА обусловлено тем, что у ЛИА практически не происходит снижение емкости при увеличении интенсивности разряда.

Уменьшение коэффициента  $k_2$  (и требуемой емкости С2) у ЛИА по сравнению со СКА обусловлено тем, что ЛИА может обеспечить ток до 5С (и при этом напряжение на нем не будет ниже 2,9 В), в отличие от СКА, который при конечном напряжении 1,9 В способен выдать ток менее 1 С.

Для определения требуемой емкости нового аккумулятора необходимо полученное значение увеличить на коэффициент 1,5. Для СКА этот коэффициент обусловлен необходимостью запаса на старение и запаса на возможную его эксплуатацию при температуре +10 °С и ниже (при этом снижается емкость). Для ЛИА снижение емкости при переходе к более низким температурам меньше, но для обеспечения длительного срока службы нужно его эксплуатировать при степени заряженности не выше 90–95 %.

<sup>1</sup> Коэффициент К1 для ЛИА оказался меньше 3-х вследствие того, что фактическая емкость данных аккумуляторов больше заявленной номинальной.

<sup>2</sup> Практически ЛИА может обеспечить ток до 10 С, но при этом напряжение на его выходе будет ниже 2,9 В.

Таблица 4. Стоимость оборудования различных АБ (тыс. руб. с НДС)

Компонент	Стоимость, тыс. руб. с НДС	
Батарея	ЛИАБ	СКАБ
Аккумуляторы	806,4	4368,0
BMS	110,9	0,0
Конструктив	107,7	240,0
Защитные аппараты и компоненты	39,1	0,0
Монтаж и ПНР	200,0	100,0
Итого:	1264,1	4708,0

Для СКА имеем  $C = 276$  А·ч.

Для ЛИА имеем  $C = 143,3$  А·ч.

Итого, для указанного примера требуется использовать СКАБ, состоящую из 104 аккумуляторов 12БП 300 номинальной емкостью 300 А·ч, либо ЛИАБ – состоящую из 68 аккумуляторов GBSLFP-160АН-А номинальной емкостью 160 А·ч. При этом в случае использования ЛИАБ можно либо снизить номинал зарядно-выпрямительного устройства, либо уменьшить время заряда после восстановления нормального режима работы.

### Стоимость оборудования

Цены актуальны на 01.08.2022 г. Цены на аккумуляторы БП представлены производителем. Цены на аккумуляторы GBS представлены дилером с учетом доставки на территорию Российской Федерации. В конструктив ЛИАБ входят компоненты шкафов и монтажные панели. В конструктив СКАБ входят сейсмостойкие стеллажи. Расчет стоимости изготовления различных АБ представлен в таблице 4. На рис. 7 представлено сравнение стоимости в графическом виде.

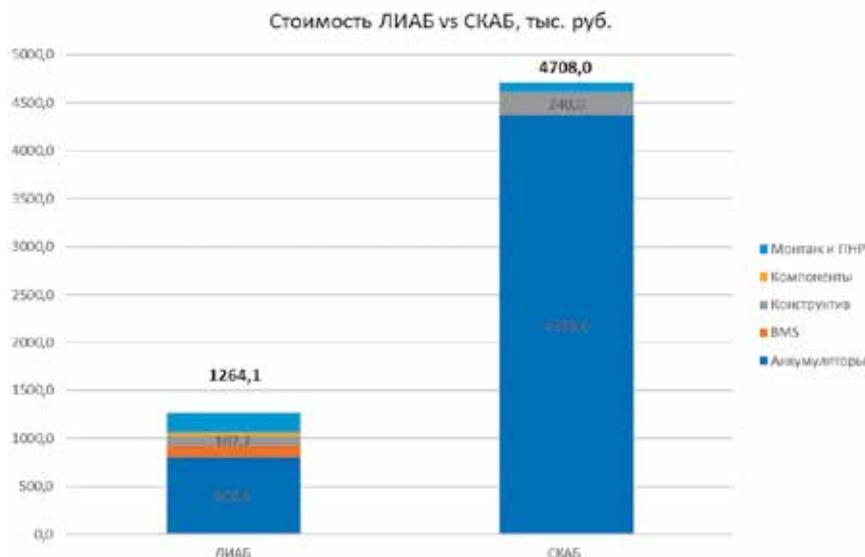


Рис. 7. Сравнение стоимости оборудования ЛИАБ и обслуживаемой СКАБ

Отметим, что суммарная стоимость компонентов СКАБ превышает ЛИАБ практически в четыре раза.

### Стоимость ремонта аккумуляторного помещения и инфраструктуры

Как было указано выше, для эксплуатации СКАБ открытого типа требуется отдельное помещение и до-

полнительная инфраструктура. В случае реконструкции действующей подстанции аккумуляторное помещение уже имеется, но требуется его ремонт и обустройство. Для расчета стоимости обустройства была взята типовая спецификация строительно-монтажных работ в аккумуляторном помещении с учетом поправочных коэффициентов, актуальных на 01.01.2022 г. В таблице 5 представлен перечень работ с действующими расценками.

Видно, что стоимость работ, связанных с ремонтом и обустройством аккумуляторного помещения, равна 3,208 млн. руб. с НДС. Для отдельных аккумуляторных помещений систему кондиционирования не используют, так как тепловыделением СКАБ в процессе эксплуатации можно пренебречь.

Для эксплуатации ЛИАБ работы, связанные с обустройством помещения, проводить не нужно, так как для этой батареи не требуется отдельное помещение, и она может быть размещена в непосредственной близости от остального оборудования.

Таблица 5. Перечень работ по реконструкции аккумуляторного помещения

Этап работ	Стоимость руб., с НДС
Устройство автоматики вентиляции	249 310,59 Р
Устройство системы вентиляции	985 417,05 Р
Устройство отопления и освещения	412 836,50 Р
Ремонтные работы	1 560 101,96 Р
<b>Итого:</b>	<b>3 207 666,09 Р</b>

Таблица 6. Сравнение стоимости владения ЛИАБ и СКАБ

Статья расходов	Тыс. руб. с НДС	
	ЛИАБ	СКАБ
Аккумуляторная батарея	1264,1	4708,0
Стоимость обустройства аккумуляторного помещения	0	3207,7
<b>Итого</b>	<b>1264,1</b>	<b>7 915,7</b>

Таблица 7. Исходные данные для выбора АБ (пример 2)

Параметр	значение	примечание
Номинальное напряжение СОПТ, В	220	
Длительной аварийного режима, ч	2	
Ток постоянной нагрузки, А	7,62	
Ток временной нагрузки, А	7,29	В течение двух часов
Ток кратковременной нагрузки (толчковый ток), А	57,44	В течение 5 сек в конце разряда
Ток наиболее удаленного потребителя, А	2,6	Электромагнит отключения ВГТ-110.III-40 при напряжении 187 В

### Сравнение стоимости двух решений

В таблице 6 представлено сравнение стоимости двух решений.

Видно, что экономия средств за счет использования ЛИАБ составляет 6,65 млн руб. (с НДС) на одну батарею для параметров СОПТ, представленных в [12].

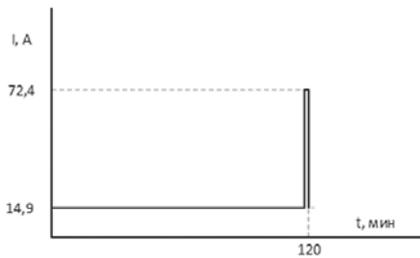


Рис. 8. График нагрузки СОПТ

### ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ЛИАБ И ГЕРМЕТИЗИРОВАННОЙ СКАБ

Герметизированные СКАБ, как правило, используются на небольших подстанциях с высшим напряжением 35 – 110 кВ на которых не предусмотрено отдельное аккумуляторное помещение.

#### Выбор параметров батареи

Для сравнения ЛИАБ и герметизированной СКАБ в качестве примера был взят реализованный проект реконструкции одной из ПС 110 кВ. Проектом предусмотрено в качестве АБ использовать герметизированную СКАБ, изготовленную по технологии AGM, состоящую из 17-и блоков 12V125F. В качестве альтернативы рассматривается ЛИАБ, собранная на аккумуляторах GBS.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 7.

График распределения нагрузок представлен на рис. 8. Результаты расчетов параметров кабелей с медными жилами представлены в таблице 8.

В соответствии с методикой определяем параметры СКАБ и ЛИАБ.

Исходя из обеспечения требуемого напряжения заряда и подзаряда, выбираем количество аккумуляторов в батарее. Напряжение поддерживающего заряда герметизированного аккумулятора типа V равно 2,27 В. Аккумуляторы собраны в блоки по 6 штук. Необходимое количество таких блоков – 17 штук (эквивалентно 102 элементам напряжением 2 В). Напряжение поддерживающего заряда для ЛИА выбрано 3,36 В. Необходимое количество ЛИА – 68 штук, подключенных последовательно.

Определяем минимально допустимое напряжение на единичном

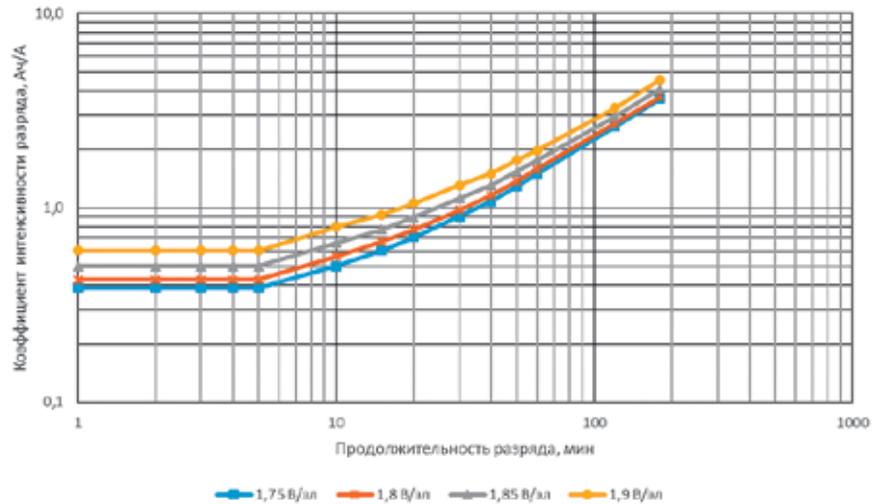


Рис. 9. Зависимость коэффициента интенсивности разряда  $k(t)$  от продолжительности разряда для аккумуляторов типа 12V

аккумуляторе в конце режима разряда в момент толковой нагрузки. Минимально допустимое напряжение на электроприемнике также равно 187 В. Падение напряжения на кабеле до наиболее удаленного потребителя в момент толковой нагрузки составляет 5,20 В. Исходя из этого определяется минимально допустимое напряжение на выходе аккумулятора. Для СКА напряжение на его выходных клеммах должно быть не ниже 1,88 В. Для расчета берется ближайшее табличное значение – 1,9 В. Для ЛИА для тех же параметров имеем минимальное напряжение 2,82 В. Для расчета берется ближайшее табличное значение – 2,9 В.

Определяем требуемую емкость батареи исходя из графиков коэффициентов интенсивности разряда. Расчет делается для двух режимов:

- обеспечения заданного тока нагрузки в течение 2-х часового разряда (120 минут).
- обеспечения толкового тока в течение 5 секунд в конце цикла разряда.

На рис. 9 представлены зависимости коэффициента  $k_i$  аккумулятора 12V Front terminal Series производства PowerSafe для различных напряжений в конце разряда. При построении зависимостей коэффициента использовались разрядные характеристики, представленные производителем. Зависимости коэффициента  $k_i$  для ЛИА представлены на рис. 6.

Таблица 8. Параметры кабелей для расчета

Участок	Сечение, мм <sup>2</sup>	Длина, м	Сопротивление, мОм	Обозначение
Кабель от АБ до ЩПТ	16	5	11,25	RK1
Кабель от ЩПТ до ШРОТ	10	10	36	RK2
Кабель от ШРОТ до ЭП	2,5	50	720	RK3

Таблица 9. Стоимость оборудования различных АБ (тыс. руб. с НДС)

Компонент	Стоимость, тыс. руб. с НДС	
Батарея	ЛИАБ	СКАБ
Аккумуляторы	311,0	468,8
BMS	110,9	0,0
Конструктив	61,8	107,7
Компоненты	39,1	9,0
Монтаж и ПНР	150,0	50,0
Итого:	672,8	635,5

Расчетные коэффициенты интенсивности разряда приняты для напряжения аккумулятора в конце разряда, равного 1,9 В. Коэффициент  $k_1$ , определенный для времени разряда 120 минут, равен 3,26 (А·ч/А). Коэффициент  $k_2$  равен 0,61, что соответствует минимальной продолжительности разряда на разрядной характеристике 60 с. Исходя из полученных значений имеем:

$$C = 82,4 \text{ А·ч}$$

Для ЛИА коэффициент  $k_1$ , определенный для времени разряда 120 минут, равен 1,90. Коэффициент  $k_2$  принят равен 0,2, что соответствует продолжительности разряда 90 с. Исходя из полученных значений имеем:

$$C = 39,4 \text{ А·ч}$$

С учетом коэффициента запаса 1,5 получаем для требуемой емкости аккумуляторов величину 123,6 А·ч и 59,1 А·ч соответственно.

Полученным расчетным значениям емкости соответствует СКА 12V125F номинальной емкостью 125 А·ч и ЛИА GBSLFP-60AH-A номинальной емкостью 60 А·ч.

### Стоимость оборудования

Был произведен расчет стоимости оборудования различных АБ. Расчеты стоимости изготовления ЛИАБ и СКАБ представлены в таблице 9. На рисунке 10 представлено сравнение стоимости в графическом виде.

Отметим, что суммарная стоимость компонентов ЛИАБ превышает СКАБ примерно на 5 %.

### Учет срока эксплуатации

Срок эксплуатации ЛИАБ в режиме поддерживающего заряда, при пра-

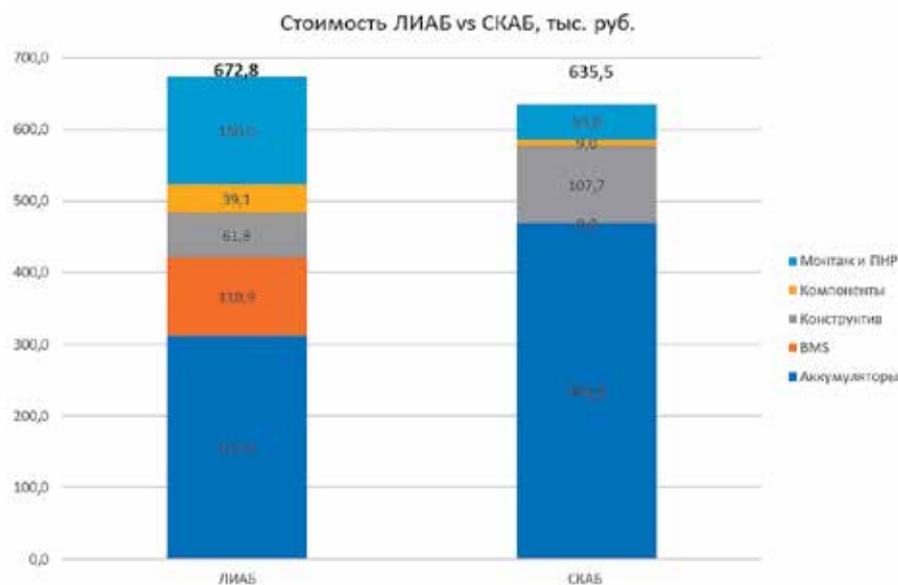


Рис. 10. Сравнение стоимости оборудования ЛИАБ и герметизированной СКАБ

вильно организованных алгоритмах работы, равен не менее 20 лет.

Срок эксплуатации СКАБ даже при идеальных условиях не превышает 10–12 лет. Факторы, ограничивающие время жизни герметизированных СКА:

- химическая реакция коррозии свинцового электрода, при которой ухудшается связь пластины с проводником тока [5];
- неполная рекомбинация молекул кислорода на отрицательном электроде, в результате чего концентрация электролита падает. Этот процесс особенно критичен для герметизированных СКА, изготовленных по технологии AGM (Absorbent Glass Mat), поскольку приводит к «высыханию» сепаратора и неравномерности его заполнения электролитом [14];
- деполяризация отрицательного электрода в процессе эксплуата-

ции, в результате чего затрудняется (или прекращается вовсе) процесс протекания электрохимической реакции в режиме поддерживающего заряда [14].

Соответственно, в течение 20 лет эксплуатации необходимо будет как минимум один раз произвести замену АБ. При этом остальное оборудование СКАБ можно будет не заменять.

### Учет стоимости системы кондиционирования

Заявленный заводами-изготовителями срок жизни СКАБ обеспечивается при поддержании оптимального, достаточно узкого температурного диапазона эксплуатации. Если СКАБ размещается в помещении, в котором есть дополнительные источники тепла, необходимо использовать систему кондиционирования. Поскольку герметизированная АБ расположена в помещении совместно с остальным оборудованием, приходится кондиционировать все помещение.

Определим затраты, обусловленные эксплуатацией системы кондиционирования подстанции. При этом отдельно выделим капитальные вложения на приобретение сплит-системы, отдельно – на поддержание ее в рабочем состоянии. К эксплуатационным затратам также

Таблица 10. Сравнительные затраты в течение 20 лет эксплуатации ЛИАБ и СКАБ

Статья расходов	Тыс. руб. с НДС		Примечание
	ЛИАБ	СКАБ	
Начальная стоимость оборудования	672,8	635,5	разница в цене -37,3 тыс. руб. (1)
Замена СКАБ на 13-й год	0	468,8	требуется замена СКАБ на 13-й год (3)
Стоимость одного кондиционера	0	80	требуется замена кондиционеров на 11-й год (2)
Стоимость электроэнергии на один кондиционер в год	0	15,9	без учета дисконтирования
Стоимость обслуживания одного кондиционера в год	0	1,25	без учета дисконтирования

Сравнительные затраты на обслуживание СКАБ в ОПУ ПС 110 кВ, тыс. руб.

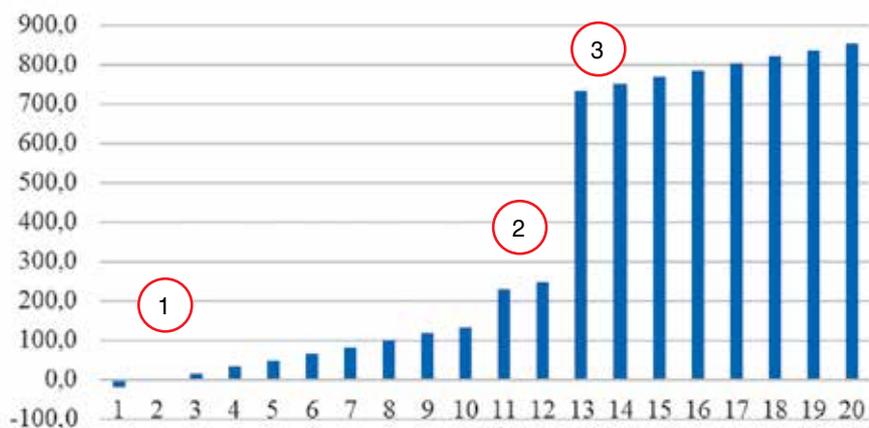


Рис. 11. Динамика ежегодных затрат на эксплуатацию СКАБ на ПС в течение 20-летнего периода, тыс. руб.

отнесем затраты на оплату расхода электроэнергии. При расчете стоимости затрат на электроэнергию принято условие, что предусмотренные проектом кондиционеры работают с мощностью 50 % непрерывно в течение только 3-х летних месяцев. В остальное время кондиционеры не работают.

Для целей кондиционирования рассмотренным проектом предусмотрено использование двух сплит систем MDSF-24HRN1 мощностью по холоду 7 кВт каждая. Потребляемая электрическая мощность каждой системы равна 4,0 кВт.

Затраты на приобретение одного кондиционера MDSF-24HRN1 составляют 80,0 тыс. руб.

Предельный срок эксплуатации системы кондиционирования, как правило, не превышает 10 лет. С учетом горизонта планирования СОПТ – 20 лет эксплуатации, затраты на приобретение кондиционеров удвоятся.

Ежегодное сервисное обслуживание системы кондиционирования составляют 2,5 тыс. руб.

При тарифе электроэнергии в 3,6 руб./кВт·ч (с НДС), стоимость потребленной электроэнергии в год составит приблизительно 31,8 тыс. руб.

При определении экономического эффекта применительно к одной батарее эти затраты были поделены на два, так как в помещении ОПУ эксплуатируются две СКАБ.

### Сравнение стоимости двух решений

Сравнительные затраты в течение 20 лет эксплуатации представлены в таблице 10. Сравнение стоимости двух решений накопленным итогом в течение 20 лет представлено на рис. 11 (без учета годовой ставки доходности).

Несмотря на то, что начальные затраты на приобретение ЛИАБ немного выше по сравнению со СКАБ, в течение срока эксплуатации суммарная стоимость владения ЛИАБ, посчитанная методом наращивания, будет меньше приблизительно на 850 тыс. руб.

Экономия будет кратно выше, если учесть ставку дисконтирования. При годовой ставке доходности ROE равной 7,03 %, суммарная стоимость владения ЛИАБ, посчитанная методом наращивания, будет меньше приблизительно на 1,6 млн. руб.

### Выводы

С точки зрения использования в составе СОПТ ЛИАБ имеют следующие преимущества по сравнению с СКАБ:

- хорошие разрядные характеристики на малых временах разряда (два часа и менее) и при толковых нагрузках;
- ЛИАБ для своей эксплуатации не требует специального помещения;
- ЛИАБ менее чувствительна к высокой температуре.

Особенно эффективны ЛИАБ при наличии толковых токов в десятки и сотни Ампер. Как показала практика, в том числе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС», в этом случае требуемая емкость ЛИАБ кратно ниже по сравнению со СКАБ. Кроме того, стоимость ЛИАБ заметно ниже свинцово-кислотных аккумуляторов, используемых при наличии толковых нагрузок (Vb, GroE, БП).

На основании проведенного исследования можно утверждать, что использование ЛИАБ в СОПТ энергообъектов различного типа экономически обосновано.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Результаты опытно-промышленной эксплуатации СОПТ на основе литий-ионных аккумуляторов в цехе сетей и подстанций АО «УЭХК». Доклад к заседанию НТС ПАО «Россети» 17.07.2018 г.
2. Шаповало А.А. Опыт применения литий-ионных аккумуляторов в системах постоянного тока (220 В) производственных объектов ПАО «Газпром» / Шаповало А.А., Коноплев Т.Ф., Югай В.Ф., Толмачев В.Н., Устименко Л.А. // Газовая промышленность – Москва, 2019 – № 11 – с. 20–30.
3. СТО Газпром 14-2-1-005-2019. Системы постоянного тока. Технические решения к построению и правила эксплуатации. Стандарт ПАО «ГАЗПРОМ»
4. СТО Газпром 14-2-1-006-2019 Системы постоянного тока. Общие технические условия. Стандарт ПАО «ГАЗПРОМ»
5. Стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Руководство по эксплуатации. Часть 1: Основные понятия, конструкция, режимы работы и область применения. / Exide Technologies, Hanbook, 2006
6. Ворошилов А.Н. Литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея. Моделирование режима заряда / Ворошилов А.Н., Петров А.Н., Чудинов Е.А. // Новости электротехники 2017 – № 2 с. 44–49
7. Методика расчета и выбора аккумуляторных батарей серий Classic GroE b Classic OSCM для применения в энергетике, М. 2005, с. 7;

8. Чудинов Е.А. Применение литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей в составе СОПТ на распределительных подстанциях и электростанциях / Е. А. Чудинов, А. Н. Ворошилов, С.В. Кучак // Энергоэксперт: информационно-аналитический журнал – Москва: Издательский дом «Вся электротехника», 2016 – № 2 – С. 46–54

9. Лебедев Д.Е. Система обеспечения резервного питания подстанции с

помощью литий-ионных батарей. Испытание опытного образца / Лебедев Д.Е., Потапенко А.М., Иваницкий С.С. // Энергия единой сети – Москва, 2021 – №№ 5–6, с.с. 34–40.

10. Правила устройств электроустановок, изд. 7-е, раздел 4.4;

11. Стандарт DIN 40729

12. СТО 56947007-29.120.40.216-2016 Методические указания по выбору оборудования СОПТ. Стандарт

организации ПАО ФСК ЕЭС (редакция от 2021 г.)

13. ZHEJIANG GBS ENERGY CO. Ltd. Test Report No GBS0327. Cell Performance Test Report № GBS20221123

14. Скроцкий С.Г. Герметизированные необслуживаемые свинцово-кислотные аккумуляторы. В чем различие между аккумуляторами GEL И AGM? // ЗАО «Акку-Фертриб»

## КОММЕНТАРИЙ ЭКСПЕРТА

### АЛЕКСАНДР КЛЮШИН,

начальник службы главного энергетика, главный энергетик АО «УЭХК»

Применение литий-ионных аккумуляторных батарей (далее ЛИАБ) вместо свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (далее – СКАБ) в системах постоянного тока позволяет:

- снизить капитальные затраты при комплексных реконструкциях или новом строительстве станций и подстанций по следующим причинам:

- исключается необходимость строительства специализированных аккумуляторных и кислотных помещений, т.к. ЛИАБ можно устанавливать в помещениях релейных щитов. При этом ЛИАБ шкафного исполнения занимает площадь кратно ниже в сравнении со СКАБ,

- исключается необходимость устройства специализированной системы отопления и вентиляции, которые требуется предусматривать в аккумуляторных и кислотных помещениях;

- снизить эксплуатационные затраты по следующим причинам:

- на техническое обслуживание АБ в составе СОПТ, т.к. у ЛИАБ увеличенный интервал обслуживания,
- на техническое обслуживание специализированных систем вентиляции и отопления с исключением из эксплуатации опасных производственных помещений (аккумуляторная и кислотная),

- организован постоянный дистанционный контроль состояния элементов батареи,

- снижается потребление электроэнергии собственных нужд, т.к. по-

тери в ЛИАБ в три раза ниже СКАБ, что подтверждается результатами НИОКР в рамках Национального проекта «Энергоэффективная подстанция» и исключается потребление электроэнергии специализированной системы отопления и вентиляции;

- повысить безопасность эксплуатации:

- исключается вероятность накопления взрывоопасных газов, которые могут выделяться при эксплуатации СКАБ,

- в ЛИАБ организован постоянный дистанционный контроль состояния каждого элемента, что позволяет выявить неисправности на ранних этапах;

- повысить удобство эксплуатации:

- время заряда ЛИАБ до четырех раз ниже времени заряда СКАБ, что снижает время готовности СОПТ после аварийного разряда,

- малообслуживаемость и возможность дистанционного контроля параметров ЛИАБ позволяет реализовать малолюдные технологии эксплуатации объектов.

В АО «УЭХК» в 2013 году был реализован пилотный проект, включающий испытания и опытно-промышленную эксплуатацию переоборудованной на ЛИАБ стационарной системы оперативного постоянного тока главной понизительной подстанции № 2 (ГПП-2). Проект подтвердил положительный технико-экономический эффект внедрения решений на базе ЛИАБ и позволил разработать методику расчета эффективности перевода энергетического обо-

удования на ЛИАБ с оценкой прогнозируемого экономического эффекта.

Исходя из полученной практики опытно-промышленной эксплуатации ЛИА на ГПП-2 и полученных технико-экономических эффектов, в АО «УЭХК» была проведена реконструкция ГПП-4, а в настоящее время проводится реконструкция ГПП-3 с заменой свинцово-кислотных аккумуляторных батарей на литий-ионные накопители энергии производства ООО «НПО «Центротех».

В настоящее время в ОАО «МРСК Урала» с положительным результатом завершена опытно-промышленная эксплуатация системы оперативного постоянного тока на основе ЛИАБ производства ООО «НПО «Центротех». Подготовлено заключение об успешном завершении ОПЭ, включающее итоги и выводы о проведенной ОПЭ, а также предложения по снятию выявленных ограничений в составе НТД для применения других источников энергии, кроме свинцово-кислотных аккумуляторов в СОПТ электрических подстанций.

Замена на ЛИАБ традиционно используемых свинцово-кислотных или щелочных аккумуляторов позволило АО «УЭХК» значительно снизить затраты на трудоемкий процесс обслуживания аккумуляторного оборудования, а также вывести из эксплуатации опасные производственные объекты – аккумуляторные и кислотные помещения, в которых зарядка традиционных аккумуляторов сопровождалась выделением водорода с возможностью образования взрывоопасных смесей.

# УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ В РОССИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

НИКИШИНА М.В., ИВАНОВСКИЙ Д.А., АО «СО ЕЭС»

В России управление спросом на электроэнергию – относительно новый механизм, позволяющий участникам получить стимулирующие выплаты за счет изменения потребления электроэнергии относительно их нормального профиля нагрузки в период высоких цен на электроэнергию на оптовом рынке. Функционировать данный механизм начал с 2017 года. Тогда основными участниками стали крупные промышленные потребители, приобретающие электроэнергию на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Однако, ресурс управления спросом оптовых потребителей ограничен в силу, во-первых, относительно небольшого количества таких потребителей и, во-вторых, их активной вовлеченности в использование всех доступных инструментов оптимизации затрат на электроэнергию. Вместе с тем значительный потенциал управления спросом сосредоточен у потребителей розничного рынка, но ресурс управления спросом каждого отдельного розничного потребителя слишком мал, чтобы удовлетворять требованиям, предъявляемым на ОРЭМ, а издержки на взаимодействие с инфраструктурой оптового рынка слишком высоки. Поэтому вовлечение в управление спросом средних и малых потребителей требует применения специальных методов и инструментов управления спросом. В ходе работы авторами произведен анализ отечественной практики управления спросом, а также предложены варианты вовлечения в управление спросом новых групп потребителей, в том числе бытовых.

**Ключевые слова:** управление спросом на электроэнергию, ценозависимое снижение потребления, агрегаторы управления спросом

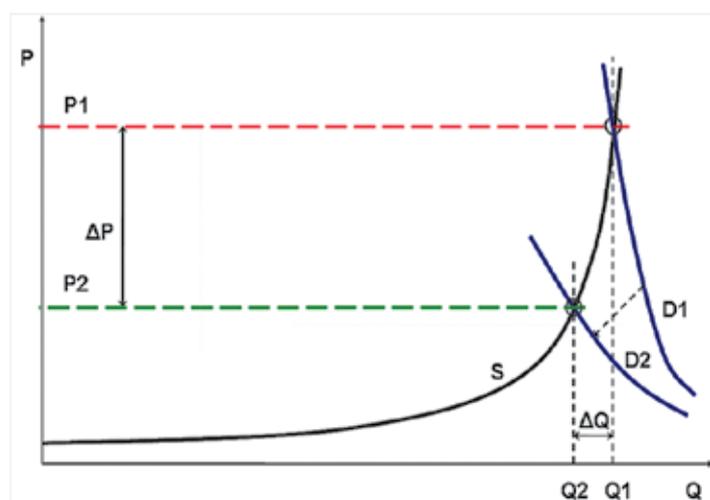


Рис. 1. Влияние механизма управления спросом на изменение цены электроэнергии.

Управление спросом – один из эффективных инструментов для снижения цены электроэнергии на ОРЭМ в пиковые часы, когда для покрытия спроса на электроэнергию привлекаются наиболее дорогостоящие генерирующие объекты. При этом относительно небольшое снижение потребления электроэнергии может привести к существенному снижению ее стоимости [1]. Нормальный рост кривой предложения ( $S$ ) сменяется резким ростом в замыкающей части, что соответствует загрузке наиболее дорогих генерирующих мощностей (рис. 1). Снижение потребления в пиковые часы с величины  $Q1$  до величины  $Q2$  приводит к изменению кривой спроса  $D1$  в кривую  $D2$  и снижению цены на электроэнергию на величину  $\Delta P$ .

Основной предпосылкой к активному внедрению механизма управления спросом на электрическую энергию в отечественной энергетике стал активный рост технологических возможностей для изменения потребителями режимов собственного электропотребления в силу

развития технологий телекоммуникаций, средств автоматизации производства, а также роста установленной мощности объектов распределенной генерации.

Данное обстоятельство позволяет потребителям электроэнергии без негативного влияния на основные технологические процессы перераспределять собственное электропотребление между часами суток, то есть обладать гибкостью электропотребления, за счет чего получить индивидуальный экономический эффект в следствии снижения выработки дорогостоящей электроэнергии низкоэффективными генерирующими мощностями.

Рыночные механизмы управления спросом разрабатываются в целях создания возможности задействовать технологический потенциал изменения потребителями режимов собственного электропотребления для повышения эффективности работы энергосистемы и дать потребителям электрической энергии возможность монетизировать свои технологические возможности, а также оказывать влияние на формирование цены на электрическую энергию и мощность.

### УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА ОПТОВОМ РЫНКЕ

Первым этапом интеграции управления спросом в России стало внедрение механизма для потребителей оптового рынка (рис. 2). Механизм управления спросом потребителей оптового рынка с 2017 года включен в рынок на сутки вперед (РСВ), а с 2020 года учитывается на рынке мощности при проведении конкурентных отборов мощности.

На оптовом рынке электроэнергии объем управления спросом учитывается для потребителя как снижение обязательств по покупке мощности. При этом обязательства потребителя, участвующего в механизме, состоят в готовности осуществить разгрузку не более 5 раз в месяц длительностью 2 или 4 часа подряд (выбор длительности фиксированный и осуществляется при подаче заяв-

ки в рамках проведения конкурентного отбора). При этом, получение данных коммерческого учета электроэнергии, формирование и контроль исполнения графика потребления осуществляются в рамках существующих процедур, применяемых для всех потребителей оптового рынка электроэнергии. На 1 квартал 2023 г. в рынке мощности учитываются ресурсы управления спросом в объеме 89,4 МВт [2].

### УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА РОЗНИЧНОМ РЫНКЕ

Вторым этапом интеграции ресурсов управления спросом в России стало создание механизма для потребителей розничного рынка электроэнергии [3].

Участие крупных потребителей оптового рынка в управлении спросом достигается открытием различных сегментов рынка для их участия: созданием условий, обеспечивающих возможность их конкуренции с генерирующими объектами, и соответствующих экономических стимулов. Внедрение программ управления спросом обычно начинается с вовлечения таких потребителей, однако потенциал их участия ограничен: крупных потребителей относительно немного и, являясь квалифицированными участниками рынка электроэнергии, они в значительной степени уже используют потенциал гибкости своего потребления для оптимизации затрат до внедрения механизмов явного управления спросом. При этом значительный потенциал управления спросом находится на стороне небольших, в том числе, розничных потребителей электроэнергии.

Непосредственное взаимодействие малых и средних потребителей и заинтересованных инфраструктурных организаций остается нецелесообразным, поскольку затраты на такое взаимодействие слишком высоки относительно малого объема разгрузки, предоставляемого этими потребителями. Поэтому распространение механизмов управления спросом на розничных потребителей требует решения, позволяющего изб-

## РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ведущий рубрики



### Илюшин Павел Владимирович

Руководитель Центра «Интеллектуальные электроэнергетические системы и распределенная энергетика» ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», главный научный сотрудник, д.т.н., руководитель Национального исследовательского комитета С6 «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергоресурсы» РНК СИГРЭ, председатель секции НП «НТС ЕЭС»

жать полноценного участия розничного потребителя в работе оптового рынка и непосредственного взаимодействия с инфраструктурными организациями.

Одним из перспективных вариантов такого решения являются специализированные организации – агрегаторы управления спросом. Агрегаторы управления спросом – это поставщики товаров и услуг на оптовом рынке электроэнергии, которые управляют оборудованием группы потребителей, чтобы представлять совокупность розничных потребителей электроэнергии

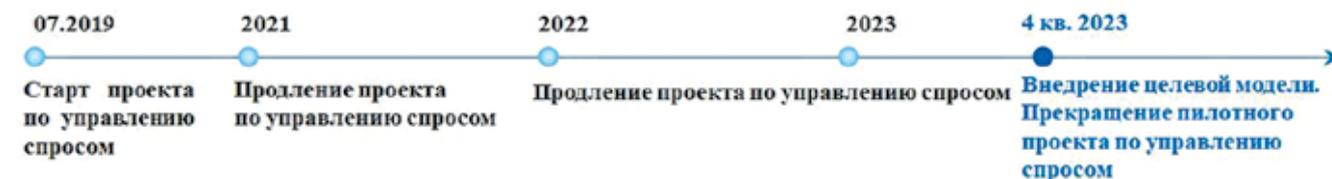


Рис. 2. Этапы реализации механизма управления спросом в России.



Рис. 3. Объединение розничных потребителей в агрегированные объекты управления.

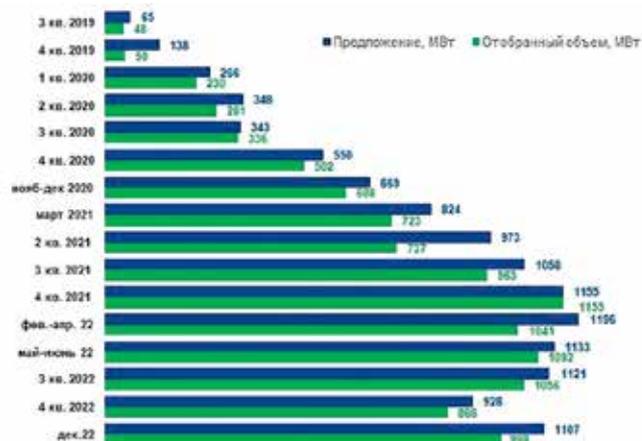


Рис. 4. Динамика объемов управления спросом

как единый объект на ОРЭМ (рис. 3). Агрегатором управления спросом может стать любой субъект электроэнергетики, потребитель электрической энергии, действующая энергосбытовая организация – гарантирующие поставщики, а также независимые энергосбытовые компании [4].

Агрегаторы выполняют следующие функции:

- формирование агрегированных объектов управления на базе потребителей, имеющих техническую возможность перераспределения потребления внутри суток и экономическую заинтересованность в оказании услуг;
- представление группы потребителей при взаимодействии с инфраструктурными организациями ОРЭМ, как на этапе отбора заявок, так и после заключения договора с отобранными участниками;
- распределение долевого участия в разгрузке в конкретный час между конечными потребителями, входящими в объект агрегированного управления.

К агрегированным объектам управления (ОУ) предъявляются следующие требования [5]:

- длительность непрерывного снижения потребления должна составлять от двух до четырех часов подряд (по выбору исполнителя), при этом минимальный заявляемый объем снижения потребления не ограничен;
- энергопринимающие устройства, входящие в объект управления, не должны относиться к иным ОУ;
- все энергопринимающие устройства, входящие в ОУ, должны относиться к одной группе точек поставки (ГТП), функционирующей на ОРЭМ;

- все энергопринимающие устройства, входящие в ОУ, должны соответствовать предъявляемым к ним требованиям;
- не допускается исключать из состава энергопринимающего устройства, входящего в состав ОУ, отдельные элементы (энергопринимающие устройства, объекты электросетевого хозяйства, объекты по производству электрической энергии) в отсутствие надлежащим образом оформленных границ балансовой принадлежности между элементами;
- все точки поставки должны быть оборудованы приборами учета, позволяющими измерять 30-минутные или почасовые объемы потребления электрической энергии, допустимый класс точности приборов учета 1,0 и выше.

При этом потребитель розничного рынка выполняет следующие функции:

- выбирает агрегатора управления спросом и заключает договор оказания услуг;
- совместно с агрегатором управления спросом производит оценку технологических возможностей по разгрузке энергопринимающих устройств;
- формирует оптимальный сценарий участия при оказании услуг по управлению спросом;
- уведомляет агрегатора о готовности к разгрузке в конкретные сутки;
- выполняет обязательства по изменению нагрузки;
- передает данные коммерческого учета электроэнергии агрегатору.

На данный момент, основной инфраструктурной организацией, с которой взаимодействуют агрегаторы, является Акционерное Общество «Системный оператор Единой Энергетической Системы» (АО «СО ЕЭС»).

В рамках пилотного проекта по управлению спросом на электрическую энергию АО «СО ЕЭС» выполняет следующие функции:

- проводит отборы субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, оказывающих услуги по управлению спросом на электрическую энергию;
- консолидирует информацию о готовности к снижению потребления, полученную от агрегаторов, и передает эти данные Администратору торговой системы оптового рынка электроэнергии (АО «АТС»);
- транслирует агрегаторам информацию, о возникновении события управления спросом, полученную от АО «АТС»;
- принимает данные коммерческого учета от агрегаторов и контролирует исполнение обязательств по снижению потребления объекта управления;
- производит оплату услуг по управлению спросом на электрическую энергию.

### ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ИТОГИ РЕАЛИЗАЦИИ ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ

Предложенный механизм вызвал большой интерес субъектов электроэнергетики. За период с июля 2019 по декабрь 2022 года объем, отобранный для оказания услуг по управлению спросом, вырос более чем в 20 раз с 50 МВт до 1,126 ГВт. Динамика предложения и отобранных объемов за период проведения пилотного проекта представлена на рис. 4.

В 2022 году в рамках пилотного проекта по управлению спросом, отработаны подходы, стимулирующие к по-

вышению качества исполнения обязательств по договорам оказания услуг по управлению спросом, в том числе:

- обеспечение финансовой ответственности за неисполнение обязательств с возможностью назначения штрафа агрегаторам;
- введение минимального порога готовности;
- предоставление возможности неполной разгрузки объекта управления (в диапазоне 75–100 % от заявленного объема) в рамках события управления спросом.

Суммарно к 4 кварталу 2022 года в проекте приняли участие более 60 компаний в качестве агрегаторов управления спросом на электроэнергию, в отношении более 350 объектов управления, включающих в себя различных потребителей розничного рынка, расположенных в 56 регионах РФ (рис. 5). В проекте принимают участие потребители с широким спектром технологий управления потреблением, различных сфер деятельности – от домохозяйств до металлургических заводов. Распределение объемов участия в проекте по управлению спросом по сферам деятельности представлено на рис. 6.

Всего за период с июля 2019 года по 2022 год совокупный эффект для всех потребителей в РСВ составил 3,78 млрд рублей, в том числе для потребителей, не участвующих в управлении спросом – 950 млн рублей.

Исходя из текущих итогов реализации механизма управления спросом можно утверждать, что новая модель взаимодействия участников рынка доказала свою работоспособность. Потребители розничного рынка электроэнергии и энергокомпании продемонстрировали заинтересованность в развитии механизма.

Кроме того, одним из перспективных направлений является проведение оценки влияния механизма управления спросом на снижение углеродного следа в электроэнергетике. Данный эффект достигается за счет снижения выработки неэффективной генерации в пиковые часы и загрузки более эффективной во внепиковые часы (разница КПД, снижение затрат на транспортировку газа и т.д.). Также за счет широкого применения механизма управления

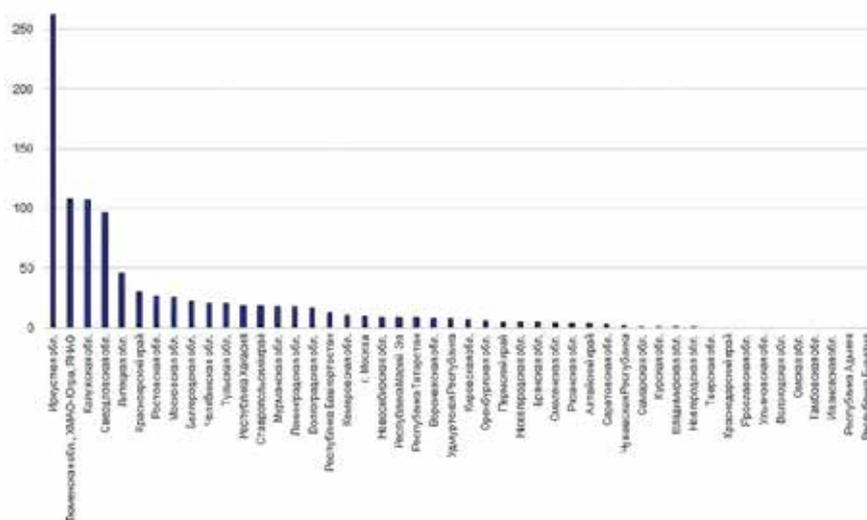


Рис. 5. Распределение объемов управления спросом по регионам России



Рис. 6. Распределение объемов мощности участия в проекте по управлению спросом по сферам деятельности в декабре 2022 г., МВт

спросом имеется возможность снизить потребность в новом строительстве объектов генерации, что в свою очередь также приведет к снижению выбросов.

### ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ

В 2023 году планируется завершение пилотного проекта и запуск целевой модели по управлению спросом, что позволит добиться полной интеграции в ОРЭМ и формирования нового вида услуг на оптовом рынке. Проект Федерального Закона, направленный на внедрение целевой модели управления спросом на электрическую энергию, прошел все не-

обходимые согласования и 13.12.2022 года принят в первом чтении Государственной Думой Российской Федерации. Второе чтение законопроекта намечено на март 2023 года. На период до начала функционирования целевой модели Правительство Российской Федерации продлило действие пилотного проекта по управлению спросом потребителей розничного рынка электроэнергии на 2023 год (Постановление Правительства от 26.01.2023 №96).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы авторами произведен анализ отечественной практики реализации механизма управления спросом.

Отмечено, что вовлечение в механизм управления спросом крупных промышленных потребителей, функционирующих на ОРЭМ, ограничено: таких потребителей относительно немного и, являясь квалифицированными участниками рынка электроэнергии, они в значительной степени уже используют потенциал гибкости своего потребления для оптимизации затрат до внедрения механизмов явного управления спросом.

Рассмотрены и проанализированы отличительные особенности переходной модели механизма управления спросом, описан субъектный состав, а также основные правила и ограничения, применяемые ко всем участникам пилотного проекта. Подведены промежуточные итоги реализации пилотного проекта внедрения механизма управления спросом на электрическую энергию в первой и второй ценовых зонах оптового рынка электрической энергии и мощности, продемонстрирована существенная позитивная динамика участников как по составу, так

и по привлекаемым объемам и сложности (комплексности) управляемых объектов.

Особо отмечено позитивное влияние результатов пилотного проекта на снижение углеродного следа как участников самого пилотного проекта, так и привлекаемых к покрытию спроса генерирующих объектов единой энергетической системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ишкова Е.М.* Управление спросом на электроэнергию в ЕЭС России. состояние и перспективы развития. В сборнике: Электроэнергетика глазами молодежи – 2018. Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах. Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. 2018. С. 81–84.
2. Результаты КОМ на 2022–2024 гг. URL: <https://kom.so-ups.ru/> (дата обращения 10.02.2023 г.).
3. URL: [https://kom.so-ups.ru/Generic/MDFileDownload.axd?From=Grid&RecordId=2CAE9846-E225-C257-9570-5C871F204F4C&EntityId=GeneralDocumentFiles&FileFieldsName=GeneralDocumentFiles.File\\_doc](https://kom.so-ups.ru/Generic/MDFileDownload.axd?From=Grid&RecordId=2CAE9846-E225-C257-9570-5C871F204F4C&EntityId=GeneralDocumentFiles&FileFieldsName=GeneralDocumentFiles.File_doc) (дата обращения 10.02.2023 г.).

5C871F204F4C&EntityId=GeneralDocumentFiles&FileFieldsName=GeneralDocumentFiles.File\_doc (дата обращения 10.02.2023 г.).

4. Постановление Правительства от 20 марта 2019 г. № 287 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в Единой энергетической системе России, а также совершенствования механизма ценозависимого снижения потребления электрической энергии и оказания услуг по обеспечению системной надежности» (в действующей редакции).

5. Положение о порядке проведения отбора субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, оказывающих услуги по обеспечению системной надежности (в действующей редакции). URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/order\\_syst\\_rel\\_210520.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/order_syst_rel_210520.pdf) (дата обращения 10.02.2023 г.).

## Испытания электротехнических изделий

В издательстве «Инфра-Инженерия» вышла книга «Испытания электротехнических изделий», принципиально отличающаяся от выпущенной много лет назад издательством «Высшая школа» и выдержавшей два издания книги [1, 2].

Новая книга отличается тем, что все механические, климатические, электрические и другие испытания рассмотрены на примере изделий одного типа.

Кроме этого, в книге рассказано о взаимосвязи с процессами испытаний двух важных документов, используемых во время испытаний – технических условиях и программе и методике испытаний.

- Книга иллюстрирована осциллограммами, полученными во время испытаний, образцами протоколов, оформляемых на основании полученных результатов.
- Приведены примеры как положительных, так и отрицательных результатов испытаний.

**Книга предназначена специалистам, занимающимся проектированием, испытаниями и настройкой различного электрооборудования.**

#### Литература:

1. *Захаров О.Г.* Испытания электротехнических изделий: учеб. пособие для ПТУ/2-е изд., перераб. и доп. М: Высшая школа, 1987, 246 с.
2. *Захаров О.Г.* Испытатель электрических машин, аппаратов и приборов: учеб. пособие. М: Высшая школа, 1982.





18–21 АПРЕЛЯ

Россия, Чувашская Республика,  
г. Чебоксары

2023

VII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

# РЕЛАВЭКСПО–2023

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ЭНЕРГОСИСТЕМ В НОВЫХ УСЛОВИЯХ

- ☀ VII Международная научно-практическая конференция: пленарное заседание, работа круглых столов и сессий
- ☀ Выставка электротехнического оборудования
- ☀ Расширенное техническое совещание со службами РЗА эксплуатирующих организаций энергетических компаний
- ☀ Молодежная площадка
- ☀ Экскурсии на электротехнические предприятия, центр кибербезопасности в энергетике
- ☀ Чемпионат Группы РусГидро по стандартам WorldSkills

Организаторы



Ассоциация  
«ИнТЭК»



Министерство  
промышленности  
и энергетики ЧР

Генеральные партнеры



РЕЛЕМАТИКА  
Традиция. Надежность. Инновации.

При участии



РОССЕТИ



РусГидро

Официальные медиа-партнеры

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА  
И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Научно-практическое издание



[www.relavexpo.ru](http://www.relavexpo.ru)

16+

☎ +7 (8352) 224-560

✉ [rci21@mail.ru](mailto:rci21@mail.ru)

# КРАТКИЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ, СВЯЗАННЫХ С НЕПРАВИЛЬНОЙ РАБОТОЙ РЗА

УХАНОВ А.В., главный эксперт АО «Техническая инспекция ЕЭС»

К особенностям функционирования Единой энергетической системы России можно отнести необходимость обеспечения значительных транзитов мощности от электрических станций к крупным промышленным энергорайонам и обеспечение бесперебойного энергоснабжения социально значимых объектов. В таких условиях особое значение имеет надежное функционирование устройств релейной защиты и автоматики. В последние годы более половины произошедших аварий с существенными негативными последствиями для функционирования ЕЭС произошли вследствие отказа или излишней работы устройств релейной защиты и автоматики. Отдельные аварии имели межсистемный характер.

**Ключевые слова:** ЕЭС, устройства РЗА, нормативно-правовые акты (НПА) и нормативно-правовая документация (НТД)

Количество аварий в единой энергетической системе России по причине неправильной работы РЗА в период с 2018 г. по 2022 г. приведено на диаграмме № 1.

На диаграмме № 1 видно, что за период с 2018 по 2022 гг. наблюдается устойчивый рост количества аварий по причине неправильной работы устройств РЗА. Количество аварий за последние пять лет из-за неправильной работы устройств релейной защиты, противоаварийной и режимной автоматики увеличилось на 28 %.

В целях приведения организации эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА на объектах электроэнергетики в надлежащее состояние были внесены соответствующие изменения в

НПА и НТД. Приведем краткий обзор основных нормативных документов по данному направлению и их основных требований.

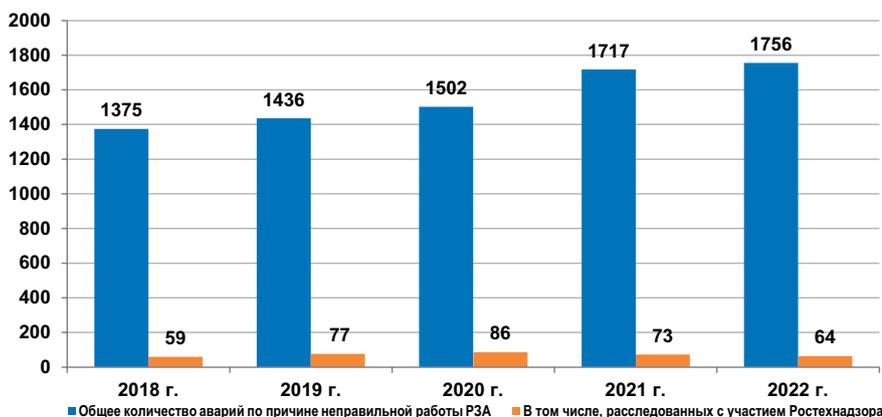
**Требования к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики (утверждены Приказом Минэнерго России от 13.02.2019 г. № 101)**

Данные НТД устанавливают требования к релейной защите и автоматике, оснащению и принципам функциониро-

вания релейной защиты и сетевой автоматики, автотрансформаторов (трансформаторов), шунтирующих реакторов, управляемых шунтирующих реакторов классом напряжения 110 кВ и выше, систем шин, обходных шиносоединительных и секционных выключателей напряжением 110 кВ и выше, устройств резервирования отказа выключателя, оснащению и принципам функционирования релейной защиты генерирующего оборудования, работающего на сборные шины генераторного напряжения, блоков «генератор-трансформатор» при проектировании, строительстве, реконструкции, модернизации и техническом перевооружении объектов электроэнергетики.

Определены основные требования, которые необходимо реализовать на существующих объектах (ранее введенных в эксплуатацию), а именно:

- осуществление функционального и (или) аппаратного резервирования устройств РЗА;
- обеспечение правильной работы устройств РЗА при изменении частоты электрического тока в диапазоне 45–55 Гц;
- резервные защиты ЛЭП (оборудования) должны удовлетворять требованию взаимной совместимости;
- применение следующих видов ПА: АПНУ (включая АРО СГО), АРПМ, АРКЗ, ЦСПА и (или) комплексы АПНУ;
- использование в ПА следующих видов управляющих воздействий:



**Диаграмма 1.** Количество аварий в единой энергетической системе России по причине неправильной работы РЗА в период с 2018 по 2022 гг.

кратковременная (импульсная) и длительная разгрузка энергоблоков ТЭС, отключение генераторов, отключение нагрузки потребителей электрической энергии, деление энергосистемы на несинхронно работающие части, автоматическая загрузка генераторов, электрическое торможение, изменение топологии электрической сети, изменение режимов работы и эксплуатационного состояния управляемых элементов электрической сети;

■ выполнение АЛАР, АОСЧ, АОПЧ, АОСН, АОПН, АОПО в виде локальной ПА и реализация устройствами, выполняющими функции противоаварийного управления;

■ сохранение всех функций и настроек параметров устройств РЗА в полном объеме после восстановления оперативного тока (в том числе изменяемые при помощи переключающих устройств РЗА);

■ исключение срабатываний устройств РЗА при замыкании на землю в одной точке в сети оперативного постоянно-го тока;

■ совмещение в одном устройстве функций РЗ и АПНУ (за исключением функций фиксации отключения и фиксации состояния ЛЭП, сетевого и генерирующего оборудования), РЗ и ЧДА не допускается.

Определены требования, которые необходимо учитывать при проектировании и строительстве новых объектов электроэнергетики, а именно:

■ использование стандартных интерфейсов связи для ввода (вывода) данных в устройства (из устройств) РЗА;

■ непрерывное выполнение проверки целостности исполняемой программы и данных системой самодиагностики микропроцессорных устройств РЗА;

■ фиксация во встроенном журнале событий результатов отрицательных проверок целостности исполняемой программы или данных микропроцессорного устройства РЗА;

■ обеспечение резервирования цепей напряжения устройств РЗА ЛЭП классом напряжения 500 кВ и выше от двух ТН данной ЛЭП;

■ автоматическое подключение цепей напряжения устройств РЗА переводимых присоединений при изменении фиксации присоединения по системам шин к ТН соответствующей системы шин;

■ обеспечение автоматического контроля исправности используемых каналов связи;

■ применение ДЗЛ в качестве основной защиты ЛЭП при наличии каналов связи по ВОЛС;

■ подключение устройств РЗА аппаратно и функционально резервирующие друг друга, в том числе основные и резервные защиты ЛЭП (оборудования), на разные вторичные обмотки ТТ, организация их питания от разных автоматических выключателей оперативного постоянного тока и независимых выходных цепей;

■ регистрация в микропроцессорных устройствах РЗА всех событий, связанных с созданием, редактированием, удалением учетных записей, обновлением системного и прикладного программного обеспечения, изменением параметров настройки (уставок) и алгоритмов функционирования.

**Правила взаимодействия субъектов электроэнергетики, потребителей электрической энергии при подготовке, выдаче и выполнении заданий по настройке устройств релейной защиты и автоматики (утверждены Приказом Минэнерго России от 13.02.2019 г. № 100)**

Данные НТД устанавливают требования к распределению функций по расчету, выбору параметров настройки (уставок), алгоритмов функционирования комплексов и устройств РЗА между диспетчерскими центрами и владельцами объектов электроэнергетики, процедуре представления документов и информации, необходимой для выполнения расчетов и выбора параметров настройки (уставок) и алгоритмов функционирования устройств РЗА, заданиям диспетчерских центров и заданиям владельцев объектов электроэнергетики по настройке устройств РЗА, порядку организации и осуществления контроля их выполнения, включая представление отчетов о выполнении заданий по настройке устройств РЗА, регламенту согласования диспетчерскими центрами параметров настройки (уставок) и алгоритмов функционирования устройств РЗА, расчет и выбор которых осуществляется владельцами объектов электроэнергетики.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Ведущий рубрики



**Шишигин Игорь Николаевич**

Заместитель директора по аудиту электрических сетей АО «Техническая инспекция ЕЭС»

**Правила технического обслуживания устройств и комплексов релейной защиты и автоматики (утверждены Приказом Минэнерго России от 13.07.2020 № 555)**

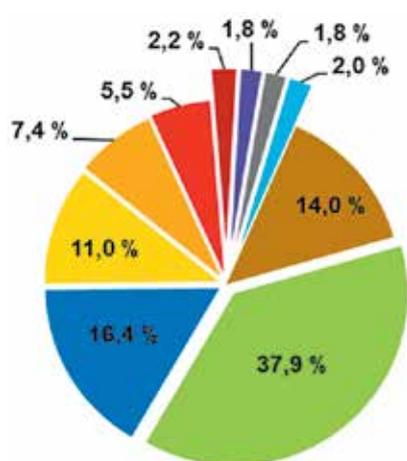
Данные НТД определяют порядок организации, планирования, подготовки и производства технического обслуживания комплексов и устройств релейной защиты и автоматики, а также функционально связанных с ними вторичных цепей, расцепителей автоматических выключателей, измерительных трансформаторов тока и напряжения, элементов приводов коммутационных аппаратов, оборудования высококачественных трактов и каналов, определяют виды, периодичность, последовательность и объемы технического обслуживания устройств и комплексов РЗА и вторичного оборудования.

Правилами определены следующие основные требования:

■ к планированию технического обслуживания устройств РЗА и вторичного оборудования;

■ к проведению различных видов технического обслуживания устройств РЗА;

■ к периодичности технического обслуживания устройств РЗА;



- Не в полном объеме производится техническое обслуживание, проверка отдельных параметров (уставок) устройств РЗА
- Нарушается периодичность проведения технического обслуживания устройств РЗА
- В положениях о службах РЗА (ЭТЛ) не в полном объеме приведен перечень нормативных документов, необходимых для технического обслуживания устройств РЗА
- Имеет место несоответствие параметров настройки устройств РЗА, указанных в картах уставок, записям в протоколах проверки
- Не проводятся работы по определению электромагнитной обстановки и совместимости в местах установки устройств РЗА
- Персонал, эксплуатирующий устройства РЗА, не обучен и не допущен к самостоятельной проверке, не выполняются требования по периодичности повышения квалификации
- Не распределены границы обслуживания между подразделениями при техническом обслуживании устройств передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК) и оборудования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС)
- Не выполняются рекомендации по результатам проведенной работы по обеспечению электромагнитной совместимости и улучшению электромагнитной обстановки
- Владелец субъекта электроэнергетики не выдаются исполнителю задания на настройку (изменение) параметров и (или) алгоритмов функционирования устройств РЗА, не заданных диспетчерским центром
- Не выполняются требования к исполнительной документации

Диаграмма 2. Доля основных замечаний от общего количества выявленных нарушений эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА

- к организационным мероприятиям, выполняемым при проведении работ по техническому обслуживанию устройств РЗА;
- к плановому техническому обслуживанию устройств РЗА;
- к проведению технического обслуживания устройств РЗА по состоянию;
- к организации и оформлению проверки алгоритмов функционирования ЛАПНУ;
- к выполнению наладки устройств ПА на объекте электроэнергетики;
- к выполнению проверки взаимодействия устройств ПА между объектами электроэнергетики;
- к оформлению технической документации.

На основании анализа организации эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА на различных объектах электроэнергетики, выполненного АО «Техническая инспекция ЕЭС» в период 2019 – 2022 гг. можно сделать вывод, что наибольшее количество имеющихся отклонений требований вышеуказанных НПА по следующим направлениям:

- наличие и комплектность проектной и исполнительной документации в отношении обследуемых устройств РЗА;
- полнота перечней нормативных документов, необходимых для качественной эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА, в положениях о службах РЗА (ЭТЛ);
- соответствие внутренней документации предприятия требованиям технических регламентов, технических условий, требованиям законодательных и нормативных правовых актов РФ;
- порядок подготовки персонала, эксплуатирующего устройства РЗА, соответ-

ствие организации работы с персоналом требованиям Правил организации работы с персоналом в организациях электроэнергетики Российской Федерации;

- качество внутренних распорядительных документов, распределяющих границы обслуживания между подразделениями при техническом обслуживании устройств РЗА, передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК) и оборудования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС);
- техническое состояние, организация и проведение технического обслуживания обследуемых устройств РЗА;
- полнота выполнения заданий диспетчерских центров АО «СО ЕЭС» по настройке параметров и алгоритмов функционирования устройств РЗА;
- проведение работ по определению электромагнитной обстановки и совместимости в местах установки устройств РЗА;
- полнота и качество используемых в службах релейной защиты и автоматики положений, регламентов, методик, производственных инструкций и др., их соответствие требованиям действующих НТД.

Доля основных замечаний от общего количества выявленных нарушений эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА показана на диаграмме № 2.

Необходимо обратить внимание на следующие основные имеющиеся недостатки:

- не организовано хранение всех отчетов реализованных заданий ДЦ на изменение уставок и алгоритмов функционирования устройств РЗА;

- владельцем субъекта электроэнергетики не выдаются задания соответствующему исполнителю на настройку параметров и (или) алгоритмов функционирования устройств РЗА не заданных ДЦ;
- не определено разграничение функций расчета уставок и выдачи заданий;
- наличие несоответствия выставленных параметров настройки устройств РЗА (уставок) заданию ДЦ;
- в проектной документации на трансформаторы 63 МВА и более не предусматривается установка двух устройств РЗА с функцией ДЗТ;
- на выключателях 110 кВ и выше не выполняются требования по резервированию отказа выключателя путем применения УРОВ;
- не выполняются требования в части установки регистраторов аварийных событий и процессов;
- не разрабатываются перспективные (многолетние) графики технического обслуживания устройств РЗА;
- не выполняются требования к исполнительным схемам устройств РЗА в части внесения изменений, поддержания их в актуальном состоянии, их пересмотра;
- не в полном объеме проводится проверка отдельных параметров (уставок) устройств РЗА;
- не в полном объеме проводится техническое обслуживание устройств РЗА;
- подрядные организации не в полном объеме проводят ПНР в части наладки устройств РЗА;
- не распределяются границы и функции по обслуживанию оптоволоконных линий, оптических кроссов, используемых для организации каналов связи УПАСК, основных защит линий типа ДЗЛ;

- не проводится проверка элементов приводов выключателей, вторичных цепей автоматического управления высоковольтными выключателями, измерительных трансформаторов и др.;
- не проводится проверка правильности подключения денсиметров и исправности цепей сигнализации высоковольтных выключателей при снижении давления элегаза;
- не выполняются требования по периодичности повышения квалификации персонала в специализированных образовательных учреждениях системы повышения квалификации кадров;
- персонал, эксплуатирующий устройства РЗА не обучен и не допущен к самостоятельной проверке устройств РЗА;
- не проводятся работы по определению электромагнитной обстановки и совместимости в местах расположения устройств РЗА, не выполняются рекомендации по результатам проведенных работ по обеспечению электромагнитной совместимости и улучшению электромагнитной обстановки.

Основные организационные причины имеющих отклонений и увеличения аварийности вследствие неправильной работы устройств РЗА связаны с недостатками в системе планирования и организации проведения технического обслуживания устройств РЗА, снижением качества проведения внешних осмотров элементов устройств персоналом соответствующих эксплуатационных служб, недостаточностью проработки НТД, НПА и других внутренних локальных актов, что выражается в следующем:

- невыполнение полного объема работ при техническом обслуживании устройств РЗА из-за отсутствия типовых протоколов проверки, в которых указывается полный объем проверок и измерений при каждом виде технического обслуживания;
- недостаточный уровень обеспечения комплектности и хранения проектной и исполнительной документации в части устройств РЗА;
- отсутствие разработанных для устройств РЗА графиков технического обслуживания, методических указаний или четких инструкций по техническому обслуживанию увеличивает риски невыполнения в полном объеме технического обслуживания вследствие несоблюдения предписанных норм. В результате могут быть не выявлены дефекты, возникшие

за время, прошедшее с момента предшествующей проверки, а также внесены дефекты при проведении текущего технического обслуживания, которые могут привести к неправильным срабатываниям или отказу функционирования устройств РЗА;

- отсутствие достаточного количества проверочного и испытательного оборудования для проведения технического обслуживания и проверки электрических характеристик устройств РЗА. Отсутствие необходимого количества проверочной и испытательной аппаратуры может прямо повлиять на качество технического обслуживания и эксплуатацию устройств РЗА.

В отдельных случаях процесс координации технического обслуживания, планирования и ремонта устройств РЗА осуществляется без необходимого контроля со стороны вышестоящей эксплуатирующей организации, с недостаточным уровнем организации обеспечения единой технической политики, подхода, создания и поддержания в актуальном состоянии НТД, в части эксплуатации, проектирования, технического обслуживания, выполнения функций по согласованию технической документации, расчету параметров настройки, выдачи заданий на настройку параметров (установок) и алгоритмов функционирования устройств РЗА.

В отдельных случаях увеличение аварийности по причине неправильной работы устройств РЗА вызвано тем, что количество персонала РЗА не соответствует объему выполняемых работ (техническое обслуживание и ремонт, дефекты, документация, ввод в работу новых устройств, рассмотрение документации при ПНР, приемка из наладки) и указывает на недостаточность единиц штатного расписания нормируемым трудозатратам по обслуживанию устройств РЗА. Поэтому, в случае наличия указанного факта рекомендуется рассмотреть возможность увеличения количества штатных единиц служб, участков РЗА (ЭТЛ) и их комплектования квалифицированным персоналом.

В целях снижения количества аварий, обусловленных неправильной работой РЗА, для повышения качества организации эксплуатации и технического обслуживания, надежности работы устройств РЗА представляется необходимым ре-

комендовать следующие приоритетные к выполнению мероприятия:

- рассмотреть возможность создания учебно-тренировочных центров или на базе существующих учебных комбинатов организовать обучение персонала РЗА групповым методом по программам, исходя из производственных задач, а также требований, предъявляемых к соответствующей должности с целью сохранения и развития ранее приобретенных знаний, умений, навыков и компетенций, необходимых для выполнения своих должностных обязанностей, определенных должностными инструкциями и инструкциями по охране труда;
- обеспечить укомплектование производственных подразделений, осуществляющих эксплуатацию и техническое обслуживание устройств РЗА персоналом соответствующей квалификации в необходимом количестве;
- принять меры по соблюдению требований НПА в системе организации, контроля за подготовкой и поддержанием квалификации персонала РЗА;
- обеспечить необходимый уровень контроля за исполнением персоналом РЗА требования вышеуказанных НПА;
- разработать типовые протоколы проверки в соответствии с НТД и требованиями заводов-изготовителей, организовать обобщение опыта эксплуатации и разработку для устройств РЗА методических указаний (инструкций) по техническому обслуживанию;
- при производстве работ персоналом подрядных организаций по монтажу, наладке и техническому обслуживанию устройств РЗА, осуществлять постоянный контроль за выполняемым объемом и качеством проводимых работ;
- в случае отступлений от требований НПА и НТД привести в соответствие исполнительную документацию по РЗА.

Перечень мероприятий должен быть значительно расширен, исходя из местных условий.

В завершение, необходимо отметить, что устранение последствий аварий по причине неправильной работы устройств РЗА, в большинстве случаев, обходится значительно дороже, чем затраты на проведение своевременного технического обслуживания и выполнение организационных мероприятий в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов и нормативно-технической документации.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ МИКРОСКОПИИ ПРИ РАССЛЕДОВАНИИ АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

ОЗОРНИН С.О., к.т.н.

В общем случае задача микроскопии – увидеть то, что не видно вооруженным глазом. Для энергетиков, привыкших к высоким напряжениям, большим энергиям и большим габаритам оборудования, мелкие следы могут показаться малозначимыми. Но в некоторых случаях эти мелкие следы оказываются ключом к пониманию больших процессов. В статье показаны практические примеры исследования повреждений, полученных электрооборудованием в ходе аварий, с помощью современных методов микроскопии.

**Ключевые слова:** фотография с большим увеличением изображения (макрофотография), электронный эндоскоп, электронный микроскоп

Речь пойдет о трех видах оборудования, которое было использовано автором при расследовании нескольких аварий на объектах электроэнергетики. Часть такого оборудования использовалась лично автором; а часть, в силу его сложности, дороговизны и специфичности, было использовано путем передачи образцов в специализированные лаборатории.

Все рассматриваемое оборудование является цифровым. Его теоретические основы описаны в [1]. Речь идет о следующем оборудовании:

- цифровые фотоаппараты со специальными объективами и дополнительным оборудованием, позволяющие делать крупным планом снимки очень небольших предметов. Такие снимки принято именовать макрофотографией;
- электронные эндоскопы, которые не только позволяют делать фотоснимки и видеозаписи предметов с большим увеличением, но и проникать для такой съемки в труднодоступные места;
- электронные микроскопы. Это класс устройств, которые для сканирования образцов используют пучок электронов. Данные устройства дорогие и требуют для использования высококвалифицированного персонала.

Разберем подробнее данные виды оборудования и их возможности.

## ЦИФРОВЫЕ ФОТОАППАРАТЫ

Цифровые фотоаппараты со специальными объективами – мощное средство исследования. Они позволяют не только получить детальное изображение очень мелких объектов или участков, но и его задокументировать.

Рассматриваемые специальные фотообъективы характеризуются степенью увеличения. Степень увеличения обычно находится в пределах от 1:4 до 3:1. Максимальная кратность достигается при фотографировании объекта на минимальном расстоянии, практически в упор. Не вдаваясь в тонкости конструкции оптических приборов, отметим, что такие объективы сильно отличаются от объективов общего назначения по своей конструкции [2–4]. Обозначение подобного объектива обычно содержит указание макро- (macro-lens, макро-объектив). В ГОСТ 25205-82 определен термин «Макросъемочный объектив» – это «съемочный фотографический объектив, специально корригированный для съемки с конечных коротких расстояний».

Может показаться, что увеличение 2:1 очень небольшое по сравнению с

обычными микроскопами (для оптических микроскопов, предлагаемых к продаже, заявляются увеличения от 50 до 1600 крат). Но нужно учесть, что цифровое изображение с матрицы фотоаппарата далее будет увеличиваться. Предположим, изображение (кратность 2:1) с матрицы фотоаппарата с диагональю 21,6 мм будет выведено на монитор, например, 24 дюйма (=609,6 мм). Тогда оно будет увеличено в 28,22 раза. Суммарное увеличение составит примерно 56,44 крат. При этом разрешение монитора (1920 на 1080 точек) составляет примерно 2 Мп (миллиона точек, пикселей), а типовое разрешение матрицы фотоаппарата 16–24 Мп. То есть на экран может быть выведен фрагмент цифрового изображения без потери его качества, но с большим увеличением. Увеличение составит еще примерно в 3–4 раза (поскольку количество пикселей фактически характеризуют площадь, кратность пропорциональна корню квадратному из соотношения числа пикселей). Итого оно составит 169...226 крат. Это вполне сравнимо с оптическими микроскопами. При этом удобство использования фотоаппарата существенно выше. Ведь конструкция классического микроскопа предполагает располо-

жение образца на предметном стекле. Да и обзор фотокамеры несравненно больше, чем у микроскопа.

Имеет смысл кратко сравнить возможности фотокамер и мобильных телефонов (смартфонов), поскольку на практике подавляющее большинство фотоснимков при авариях на объектах электроэнергетики сегодня делаются именно мобильными гаджетами. А реклама утверждает, что возможности встроенных фотокамер смартфонов «безграничны». Проведем небольшой расчет.

Матрица цифрового фотоаппарата имеет диагональ 21,6 мм, ее размеры 17,3×13,0 мм. Это сравнительно небольшой размер для цифровой фотокамеры. Следовательно, с увеличением 2:1 на эту матрицу можно сфотографировать объект размерами примерно 8,5 на 6,5 мм.

Для дорогого смартфона известной корейской марки заявлена матрица типоразмера 1/1,56 дюйма, точные физические размеры производитель не указывает. Диагональ матрицы составляет примерно 2/3 от типоразмера = 10,9 мм. Значит, размеры матрицы примерно 8,7 на 6,56 мм. То есть указанный объект (8,5×6,5 мм) на такую матрицу физически не получится сфотографировать с увеличением 2:1, он просто не влезет на нее целиком. Есть и другие технические аспекты (разрешающая способность объектива, абберации и пр.), по которым смартфон будет уступать фотоаппарату.

Еще один важный вопрос – освещение объекта съемки. Для получения четкого изображения с большой глубиной резкости требуется диафрагмирование объектива [5]. Освещение при съемке электротехнических устройств и их повреждений представляет нетривиальную задачу. Собственное освещение на объектах не рассчитано на фотосъемку. Поэтому часто требуется применение специальных осветительных устройств, таких как кольцевые вспышки, устанавливаемые непосредственно на объектив и других устройств. Подробнее см. [6]. Отметим интересный момент – использование специальных кольцевых вспышек впервые нашло применение в медицине для фотографирования

при операциях и стоматологических манипуляциях.

### ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭНДОСКОПЫ

Из медицины пришли и эндоскопы с фотокамерами [8], которые используются для обследования состояния внутренних органов человека.

Современный электронный эндоскоп представляет собой миниатюрную камеру со светодиодным освещением, выполненную в виде небольшого (диаметром 7–8 мм) моноблока цилиндрической формы. Моноблок снабжен кабелем, на конце которого имеется разъем USB. Эндоскоп подключается к ноутбуку или планшету и способен транслировать на него изображение. Для записи фото- и видеоизображения необходимо соответствующее программное обеспечение.

Эндоскоп позволяет осматривать труднодоступные места электрических машин, обеспечивая при этом существенное увеличение деталей, производить фото- и видеофиксацию. Качество изображения и степень его детализации с электронного эндоскопа уступают аналогичным, получаемым с фотокамеры. Но эндоскоп позволяет получить изображения из мест, недоступных для осмотра и для фотографирования фотоаппаратом. Таким образом, фотоаппарат со специальным объективом и электронный эндоскоп хорошо дополняют друг друга.

### ЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСКОПЫ

Электронные микроскопы представляют собой сложные, дорогие и сравнительно большие и тяжелые устройства. Сам исследуемый образец должен находиться в вакууме. Для работы с электронным микроскопом требуется высокая квалификация специалиста. Поэтому в данном случае проведение исследования на объекте невозможно. Речь может идти только о передаче образцов в специализированную лабораторию.

Общую информацию об электронной микроскопии можно найти в литературе [1, раздел 6.1]. Терминология на русском языке в данной области определена ГОСТ 21006-75.

В настоящей статье речь пойдет об опыте исследований с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектраль-

ного микроанализа (РСМА) на основе энергодисперсионной спектрометрии (ЭДС) и волновой дисперсионной спектрометрии (ВДС).

Растровый (сканирующий) электронный микроскоп формирует изображение исследуемого объекта путем сканирования его поверхности пучком электронов. Взаимодействие пучка электронов с образцом носит сложный характер. Имеет место как упругое взаимодействие электронов с образцом (проще говоря, отражение электронов от поверхностных слоев образца), так и неупругое. Под неупругим взаимодействием понимаются процессы, в которых энергия пучка электронов частично поглощается материей образца, в результате чего возникает множество излучений, источником которых является изучаемый образец – вторичное излучение электронов, рентгеновское излучение, излучение в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой части спектра.

Современные электронные микроскопы способны регистрировать как отраженные и вторичные электроны, так и другие виды излучения. В частности, так называемое характеристическое рентгеновское излучение.

В результате неупругого взаимодействия атома с электроном из высокоэнергетического сканирующего пучка атом может переходить в так называемое возбужденное (неустойчивое) состояние. Возбужденное состояние характеризуется более высокой энергией по сравнению со стационарным. При обратном переходе атом излучает квант электромагнитного излучения, которое в рассматриваемом случае является так называемым характеристическим рентгеновским излучением.

В зависимости от конфигурации электронных оболочек атома возможны его разные энергетические состояния. Соответственно, излучаемые им рентгеновские кванты будут иметь определенную энергию и длину волны (для элементарных частиц оба эти параметра жестко связаны) в зависимости от энергетического уровня атома. Имеет место распределение (дисперсия) излучаемых рентгеновских квантов по определенным уровням энергии в зависимости от конфигурации электронных оболочек атома. Поскольку атомы с разными атомными



Фото 1. Шайба, снятая мобильным телефоном

номерами имеют разное количество и конфигурацию электронных оболочек, то каждый атом имеет свое характерное распределение излучаемых рентгеновских квантов (спектр) в зависимости от энергии сканирующего пучка электронов. Более подробную информацию можно найти в [7].

РСМА – это регистрация и анализ спектра характеристического рентгеновского излучения, возникающего в процессе сканирования образца пучком электронов в электронном микроскопе. Для этого микроскоп оснащается специальными датчиками. Анализ спектра может вестись как по энергии рентгеновских квантов (ЭДС), так и по длине волны (ВДС). Преимущества и недостатки этих методов выходят за рамки настоящей статьи.

Следует упомянуть действующий стандарт в части электронно-зондового микроанализа ГОСТ Р ИСО 22309-2015 «Количественный анализ с использованием энергодисперсионной спектрометрии», регулирующий определения в части ЭДС.

Таким образом, зная энергию пучка электронов, падающих на образец, и анализируя спектр характеристического рентгеновского излучения, можно получить информацию о том, из атомов с каким атомным номером состоит образец – то есть его химический состав. И поскольку пятно от пучка электронов на образце очень маленькое, то в случае неоднородного состава есть возможность установить состав отдельных областей или частиц в образце.

Таким образом, электронный микроскоп позволяет установить внутреннюю структуру и химический состав образцов. Что может оказаться весьма полезным при исследовании объектов, подвергшихся сильному энер-

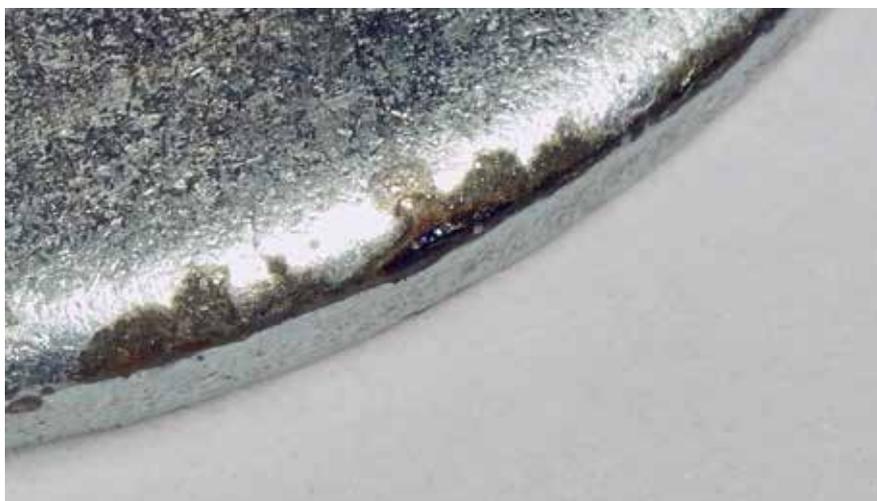


Фото 2. Шайба, снятая с использованием специального оборудования

гетическому воздействию и не сохранивших свою первоначальную форму. Такому воздействию, например, как электрическая дуга.

Ниже приведены конкретные примеры использования указанных средств.

#### ПРИМЕР 1

Крупная городская подстанция 110/35/10/6 кВ. Здания подстанции очень старые, построены в начале XX века, но реконструированы. В ЗРУ 6 кВ произошло короткое замыкание. Ячейки 6 кВ, по сути, бетонные камеры, в одной из которых и произошло замыкание.

При осмотре камеры на полу обнаружена шайба. Незадолго до КЗ в камере проводились работы. Подрядчик работ заявил, что никаких признаков того, что шайба была в момент аварии в камере, а не попала туда после, нет.

Крупный план шайбы, сделанный мобильным телефоном (фото 1) подтверждает наличие на шайбе неких повреждений, но не позволяет судить об их причине и характере.

На фото 2 на кромке шайбы видны следы, характерные для воздействия электрической дуги.

Процессы, близкие к воздействию электрической дуги при КЗ, протекают при точечной сварке. Их подробное описание может быть найдено в [9]. В данном случае наблюдается локальное оплавление металла шайбы – образованы блестящие частицы округлой формы, которые окружены окалиной. Вокруг данного места на-

блюдается цветовой градиент (цвета побежалости), который говорит о локальном неравномерном нагреве. В совокупности эти признаки позволяют утверждать – в данном месте было кратковременное воздействие электрической дугой.

На шайбе были обнаружены еще несколько мест с аналогичными признаками. При более внимательном осмотре камеры было обнаружено и место, куда забыли поставить шайбу. Таким образом, были установлены факты наличия шайбы в камере в момент КЗ, и ее кратковременного контакта с электрической дугой. Кратковременность контакта объясняется тем, что шайба имеет малый вес, и при КЗ, под воздействием электромагнитных сил она двигалась по камере.

Впоследствии было установлено, что причиной КЗ явился старый проходной трансформатор тока, установленный в труднодоступном углу камеры на потолке. Тем не менее, не установив шайбу на место при монтаже и оставив ее в камере после выполнения работ, подрядчик совершил акт головотяпства.

#### ПРИМЕР 2

В сети 10 кВ промышленного предприятия произошла сложная авария. По данным осциллограммы – ОЗЗ в удаленной точке сети 10 кВ перешло в двойное замыкание на землю (в двух разных точках сети), а затем в многофазное замыкание в камере токоограничивающего реактора. Оборудова-



Фото 3. Выступающая часть ТОР



Фото 4. Фланец опорного изолятора

ние – сухой токоограничивающий реактор (ТОР) вертикальной компоновки.

При осмотре были обнаружены признаки перекрытия воздушных промежутков и изоляторов между фазами ТОР (копоть, оплавления). При этом, на обмотках присутствовала только копоть, а оплавление наблюдалось на выступающих частях ТОР (фото 3).

Изолятор, как указано выше, имел признаки перекрытия – следы на обоих фланцах, копоть на юбке изолятора.

Из фото с увеличением (фото 4) стало понятно, что повреждение изолятора вторичное – хорошо видны брызги серебристо-белого металла без признаков коррозии на фланце. То

есть до перекрытия изолятора существовал высокоэнергетический процесс где-то в другом месте, который и стал источником брызг расплавленного металла.

С учетом того, что материал обмотки и выводов ТОР алюминий, можно предположить, что брызги на фото 4 – это алюминий. Получалось, что по неизвестной причине между выводами фаз ТОР возникла электрическая дуга.

В камере ТОР была обнаружена гибкая медная шина («косичка»), которая шла от экрана кабеля к болту заземления (фото 5). Она почти полностью перегорела. Подрядчик, выполнявший монтаж, выдвинул версию,

что оплавление «косички» произошло в результате протекания тока замыкания на землю.

Выступ ближайшей к «косичке» крестовины ТОР был сильно оплавлен. На фото 6 видно, что расплавленный металл образовал слои разного цвета, часть из которых имеет явное сходство с цветом меди. Поэтому можно предположить, что произошел перенос меди с «косички» на стальной выступ в процессе горения дуги.

Кроме того, на выводе того же ТОР обнаружены следы (фото 7), похожие на следы на фланце опорного изолятора. Но при большом увеличении видно, что, помимо брызг серебристо-



Фото 5. Гибкая медная шина («косичка»)



Фото 6. Выступ ближайшей к «косичке» крестовины ТОР



Фото 7. Вывод ТОР



Фото 8. Отверстие в обмотке TOP



Фото 9. Повреждение внутри TOP (снято электронным эндоскопом)



Фото 10. След дугового замыкания с повреждённой обмотки на шлейфы разрядников

белого металла, видны мелкие брызги красного металла без признаков коррозии (на фото 7 указано стрелками).

Визуально металл этих мелких брызг явное сходство с медью «косички». Важно, что в составе TOP присутствует алюминий и сталь, и нет материалов похожего цвета. Сам вывод удален от линии «косичка – оплавленный выступ крестовины», что указывает на существенную энергию процесса, породившего брызги.

Дальнейшая проверка показала, что кабели 10 кВ (спускающиеся с потолка), прикреплены к рамной металлоконструкции хомутом в одной точке (примерно в полуметре от входа в камеру под потолком). Второй точкой является крепление к выводам TOP. Свободная часть кабеля – около 2 метров. Заземление экрана кабеля («косичка») прикреплено к проводу, который идет к болту заземления. Общая длина этого шлейфа около метра, жестко не закреплена, а сам шлейф существенно длиннее расстояния по прямой (т.е. он свисал свободно). Под действием электромагнитных сил эта конструкция способна двигаться. И неизолированная «косичка» могла оказаться в опасной близости от крестовины. Потенциал крестовины – фазное напряжение, потенциал экрана – земля.

Таким образом, было установлено, что имело место замыкание между крестовиной и «косичкой», сопровождавшееся достаточно большим током, поэтому имел место разброс брызг меди.

С учетом ранее проведенного анализа осциллограмм, механизм КЗ в камере TOP был следующий:

- в сети 10 кВ возникло сперва однофазное, а затем двойное замыкание на землю. Поскольку замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью сопровождаются перенапряжениями, это нередкий случай;
- в момент резкого изменения тока (двойное ЗЗ), в результате воздействия электромагнитных сил, шлейф заземления экрана кабеля 10 кВ был притянут к выступу крестовины TOP. Произошел пробой через воздушный промежуток, который недопустимо уменьшился. Возникло сложное (фактически, тройное) замыкание на землю;
- поскольку это произошло в камере, то выброшенные в воздух продукты

горения дуги (мелкие металлические частицы, капли, ионизированный газ) оказались в замкнутом объеме. Что и создало условия для пробоя изоляции через воздушный промежуток между фазами ТОР.

### ПРИМЕР 3

Трансформатор 110/10/6 кВ был отключен действием дифференциальной защиты. При визуальном осмотре на сухом ТОР 10 кВ (находится в зоне действия ДЗТ) персоналом обнаружены следы копоты.

ТОР вертикальной компоновки установлен на ОРУ.

При детальном осмотре в обмотке найдено небольшое отверстие (фото 8). Было принято решение обследовать внутренние объемы ТОР эндоскопом. ТОР имеет внутри обмотки воздушные каналы для вентиляции, через которые к месту найдено отверстие был подведен эндоскоп. Полученная картина говорила о наличии тяжелых повреждений (фото 9). Внутри воздушных каналов наблюдалось большое количество продуктов горения, а с обратной стороны отверстие представляло собой каверну. В целом, обширная область внутри обмотки от отверстия до верхнего края обмотки была покрыта слоем черной сажи.

Сразу возникло предположение, что такие тяжелые повреждения не могли возникнуть одновременно. Дифференциальная защита трансформатора срабатывает без дополнительной выдержки времени, а наблюдаемая картина говорила о продолжительном и/или неоднократном воздействии.

Дальнейший осмотр показал следы нескольких дуговых замыканий с поврежденной обмотки на шлейфы разрядников, т.е. фактически на землю (фото 10).

Было установлено, что незадолго до аварии на объекте проводился ремонт здания ОПУ, в том числе ремонт кровли. ТОР был установлен в непосредственной близости к ОПУ и эксплуатировался на тот момент примерно два года. На земле на ОРУ найдены шурупы. На поверхности обмотки ТОР найдены места механических повреждений, которые могли произойти при контакте с острыми металлическими предметами.

Таким образом, был сделан вывод о следующем характере развития аварии:

- метизы могли притягиваться к обмотке ТОР магнитным полем или даже могли непосредственно попасть в обмотку (с кровли);

- в результате одного из таких попаданий возникло замыкание в обмотке ТОР (между витками через вентиляционный воздушный промежуток). Была повреждена изоляция обмоток, возникла обширная область вокруг, насыщенная углеродом;

- горение дуги в данной области было непостоянным, вероятно усиливаясь при росте тока через ТОР. Из данной области происходил выброс продуктов горения и ионизированных газов, в результате которых происходили пробой на заземленные элементы;

- ток замыкания на землю в сети 10 кВ небольшой, и дифференциальная защита трансформатора не могла среагировать на такие повреждения. В силу того, что ТОР установлен на ОРУ, замыкания на землю не были устойчивыми. А на сигналы «Земля в сети» персонал внимания не обращал. Тем более, что после погасания дуги, проверка показывала исправность изоляции;

- по мере развития повреждения, количество продуктов горения увеличивалось. В какой-то момент их оказалось достаточно для критического снижения уровня изоляции между фазами; – возникло междуфазное замыкание, которое было отключено дифференциальной защитой.

В данном случае, визуальные осмотры оборудования без использования специальных средств ничего не давали. Даже после отключения реактора действием РЗА, персонал обнаружил только следы копоты на наружной поверхности реактора, а настоящий масштаб и история повреждения были неизвестны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение указанных выше средств значительно расширяет возможности специалистов при выяснении причин аварии. Важно, что удается не только увидеть детали, которые нельзя разглядеть невооруженным глазом, но и задокументировать их.

Отдельно нужно подчеркнуть – работа с цифровыми изображениями ускоряет процесс. Часто многие моменты оказывается возможным уточ-

нить прямо при осмотре объекта. Что не исключает внимательный анализ снимков, осциллограмм и другой информации и, если требуется, сделать повторный осмотр.

Применение современного оборудования, подобного описанному выше, нередко встречается с субъективными сложностями – оборудование загромождает объект или же согласование вноса-выноса отнимает слишком много времени. В большинстве случаев это связано с жесткими режимными правилами, которые устанавливают охрана и служба безопасности на объектах. На мой взгляд, ограничения служб безопасности не всегда разумны, и эту проблему нужно – и можно – решать. По большому счету объектов свободно ходят сотрудники со смартфонами, да и посетители чаще всего мобильные гаджеты не сдают при входе. Поэтому опасения, что эксперт может сфотографировать «что-то не то» мотивированы только в том случае, если на объекте есть что скрывать от объективного расследования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Кларк Э.Р., Эберхарт К.Н.* Микроскопические методы исследования материалов, М., «Техносфера», 2007.
2. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов, М., «Машиностроение», 1966 г.
3. *Ногин П.А.* Фотографический объектив, М., «Искусство», 1961 г.
4. *Erwin Puts. Leica M-Lenses.* Their soul and secrets, Leica Camera AG, September 2002 г.
5. *Дыко Л.П., Иофис Е.А.* Фотография, ее техника и искусство, «Искусство», 1959 г.
6. *Deutchman Rod, Deutchman Robin* – Flash techniques for macro and close-up photography, «Amherst Media, Inc.», 2011.
7. *Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э.* Растровая электронная микроскопия и рентгеновский анализ М., «Мир», 1984 г.
8. *Петровский, Б.В.* Большая медицинская энциклопедия, М., Советская Энциклопедия, 1974 – 1988 г., том 26, статья «Фотография».
9. *Орлов Б.Д.* Технология и оборудование контактной сварки, М., «Машиностроение», 1975 г., глава 2, §2, п. 2; глава 3, §3.

# НЕКОТОРЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

БАЛАШОВ В.В., инженер\*

В статье рассмотрены оптимальные возможности применения электромагнитных ТТ, позволяющие избежать некоторых проблем в эксплуатации микропроцессорных устройств РЗ из-за технических характеристик электромагнитных ТТ.

**Ключевые слова:** трансформаторы тока, устройства релейной защиты, микропроцессорные устройства РЗ, обмотка релейной защиты трансформатора тока, класс точности, коэффициент предельной кратности, ток короткого замыкания, магнитопровод (сердечник) ТТ, погрешность ТТ, короткое замыкание



БАЛАШОВ  
Виталий Васильевич

В разных странах мира условия работы электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) в электроэнергетике существенно различаются. Наиболее важное различие в условиях работы ТТ – величины токов КЗ, при которых ТТ должны работать с требуемой погрешностью и обладать требуемыми характеристиками.

В нашей стране изобилие первичных источников энергии, поэтому электроэнергетика у нас развивается традиционным способом с использованием электромашинных генераторов электрической энергии. В РФ отсутствуют законодательные ограничения по величине напряжения высоковольтных линий электропередачи и величине токов КЗ. По мере роста энергопотребления вводятся в работу новые генерирующие мощности, что приводит к росту величин токов КЗ. Рост величин токов КЗ ограничивается, в первую очередь, способностью выключателей отключить токи КЗ.

Максимальный ток КЗ, отключаемый выключателем, выпускаемым в настоящее время в мире, составляет 63 кА. Большинство производителей выпускают выключатели с максимальным током отключения 40 кА. В большинстве случаев снижение величин токов КЗ осуществляется деле-

нием сети на участки, внутри которых величина тока КЗ не превосходит величины тока, который может отключить выключатель. Переходный процесс при КЗ с током большой величины происходит с большей амплитудой и более длительное время, чем при малом значении величины тока КЗ, поскольку схема замещения участка сети с большим током КЗ характеризуется большим значением отношения  $X/R$ , чем для случая с малым током КЗ. Поскольку ТТ рассчитываются на работу при частоте 50 Гц, то значительная по величине и длительная по времени апериодическая составляющая приводят к изменению условий трансформации ТТ первичного тока во вторичный (приводит к насыщению ТТ) и к значительному искажению величины и вида вторичного тока по сравнению с первичным током. При увеличении амплитуды и длительности апериодической составляющей переходного процесса в первичной сети изменяется нагрузочная способность ТТ и условия протекания переходного процесса в ТТ. Из этого следует, что если ТТ в установленном режиме может с допустимой погрешностью работать как при больших, так и при малых токах КЗ, то очевидно, что в переходных режимах КЗ работа ТТ не будет удовлетворительно работать с допустимыми характеристиками и погрешностями

\* Должность не указана, поскольку в н.в. автор не является сотрудником какой-либо компании

в переходных режимах КЗ, особенно при больших токах КЗ.

При проектировании энергообъектов электромагнитные ТТ по величине токов КЗ, в лучшем случае, выбираются на перспективу в 3–5 лет. Дальнейшая перспектива на весь срок службы ТТ не рассматривается. Такой подход приводит к тому, что при росте величин токов КЗ в течение срока службы ТТ, ТТ перестает соответствовать предъявляемым к нему требованиям со стороны МПРЗ, что, в свою очередь, приводит к отказам или к излишней работе МПРЗ. Такая ситуация вполне ожидаема. Поэтому в действующие нормативные материалы по эксплуатации ТТ включено требование их периодической проверки по допустимой нагрузке при существующем на момент проверки уровне токов КЗ. Однако, это требование, как правило, не выполняется. Одной из главных причин этого является как отсутствие у эксплуатации всех необходимых сведений о ТТ и МПРЗ для проведения проверки, так и отсутствие оборудования и персонала, способного такие расчеты выполнять.

Расчеты по ТТ должны выполняться на программно-аппаратных комплексах реального времени (ПАК РВ) специально подготовленным персоналом. В штатном расписании служб РЗ энергосистем нет такого персонала и нет ПАК РВ. В сложившейся ситуации массового несоответствия ТТ, предъявляемым к ним требованиями со стороны МПРЗ, должна быть массовая неправильная работы МПРЗ при КЗ. Однако, массового влияния на правильность работы МПРЗ недопустимых нагрузок на ТТ не фиксируется. Вместо недостатков ТТ при выявлении неправильной работы МПРЗ находятся другие причины неправильной работы МПРЗ, вот почему к ТТ массовых претензий не предъявляется. Для обеспечения допустимой нагрузки на ТТ и обеспечения правильной работы МПРЗ службы РЗА энергосистем могут только уменьшить сопротивление нагрузки ТТ за счет увеличения сечения и изменения материалов кабелей (заменяв алюминии-

вые кабели на медные) между ТТ и МПРЗ, что только в редких случаях позволяет добиться требуемой погрешности ТТ.

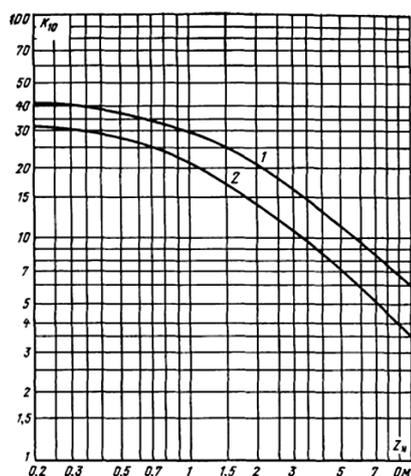
В некоторых странах мира условия работы ТТ очень похожи на условия работы ТТ в нашей стране. В других странах, таких как Западная Европа и странах мира со значительным развитием возобновляемой генерации, условия работы ТТ существенно отличаются от условий работы ТТ в нашей стране. Там принимались законы, ограничивающие технические характеристики электроэнергетики. Например, величина напряжения ВЛ была ограничена величиной 400 кВ, максимальное значение токов КЗ – величиной 40 кА, а минимальное значение – величиной 2 кА. Законодательное регулирование позволяло в этих странах по-другому, не как у нас, строить свою электроэнергетику. Зарубежные страны создавали и применяли нормативы в электроэнергетике в соответствии с имеющимися у них условиями. И такой подход применяется не только для национальных стандартов Китая, Германии, Великобритании, США и ряда других стран, но и для таких международных стандартов, как СИГРЭ и МЭК. В зарубежных странах признается преимущественное право национальных стандартов по электроэнергетике над международными стандартами.

Некоторые технические решения из зарубежной практики могут быть успешно применены и у нас. Например, в зарубежной практике имеется возможность при заказе ТТ определять отдельно необходимую мощность каждой из вторичных обмоток ТТ. В отечественной практике мощность вторичных обмотки ТТ для РЗ была одинакова и изначально определена и не могла быть изменена при заказе ТТ.

Отечественные и зарубежные ТТ, имеют между собой много общего. И это не только электромагнитный принцип, но и сталь, используемая для магнитопроводов ТТ. Возможно, что за рубежом раньше нас поняли, что выпуск ТТ должен приносить больше прибыли. Для этого сначала в зарубежных, а затем и в отече-

ственных ТТ стали в магнитопроводах применять дешевую сталь с прямоугольной петлей намагничивания. Вновь применяемая сталь обладает значительной остаточной индукцией. Величина остаточной индукции может составлять до 86 % от номинальной индукции насыщения стали. Остаточная индукция, полученная ТТ при КЗ, после отключения КЗ снижается до минимальных значений за время, которое измерялось многими часами и днями. При такой величине остаточной индукции в ТТ при его повторном включении на КЗ, например, при неуспешном АПВ при совпадении фаз тока КЗ и остаточной индукции, ТТ мог за единицы миллисекунд насыщаться и перестать полностью или частично трансформировать первичный ток во вторичный. ТТ в насыщенном состоянии может оставаться в течение десятков и сотен миллисекунд, что может приводить либо к отказу, либо к излишнему срабатыванию устройств РЗ. Поэтому при сохранении используемых типов стали были сделаны попытки снизить остаточную индукцию в сердечнике ТТ.

Для снижения величины или исключения появления остаточной индукции в магнитопроводе ТТ было решено выпускать ТТ с неполным или полным немагнитным зазором в магнитопроводе. В результате в дополнении к ТТ типа ТРХ (ТТ без немагнитного зазора) появились ТТ типа ТРР и ТРУ (ТТ с неполным немагнитным зазором) и ТТ типа ТРЗ (ТТ с полным немагнитным зазором). Неполный немагнитный зазор магнитопровода ТТ – это когда сечение немагнитного зазора меньше поперечного сечения магнитопровода ТТ, а полный немагнитный зазор – это когда немагнитный зазор равен поперечному сечению магнитопровода ТТ. Применение немагнитного зазора позволило практически полностью исключить остаточную индукцию для ТТ типа ТРЗ и снизить ее до величины менее 10 % для ТТ типа ТРР и ТРУ. Следует отметить, что, как указано в [6], наличие неполного или полного немагнитного зазора не исключает насыщения магнитопровода ТТ.



**Рис. 1.** Нагрузочные характеристики трансформаторов тока с вторичным номинальным током 5 А и 1 А (Рис. П2-64. ТФНУ-220СТ [4] (снят с производства). 1 –  $\eta_{\text{ном}}$  – 300/5-600/5; 400/5-800/5; 600/5-1200/5; 750/5-1500/5 класса P; 2 –  $\eta_{\text{ном}}$  – 300/5-600/5; 400/5-800/5; 600/5-1200/5; 750/5-1500/5 класс точности 0,5

Следует обратить внимание читателей на то, что для ТТ типов ТРР, ТРУ и ТРЗ:

- переходные процессы во вторичных цепях указанных ТТ происходят с разной скоростью из-за уменьшения постоянной времени вторичной обмотки ТТ (из-за наличия и величины немагнитного зазора). Это приводит к повышенным небалансам в нулевом проводе ТТ при параллельной работе ТТ разных типов;
- при применении ТТ указанных типов следует дополнительно изучить вопрос о проникновении помех во вторичные цепи ТТ указанных типов и в МПРЗ и рассмотреть требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) МПРЗ с ТТ указанных типов;
- для ТТ типа ТРУ, ТРЗ нормируется погрешность в переходном режиме;
- ТТ типа ТРЗ из-за наличия полного немагнитного зазора работает как фильтр и трансформирует во вторичную цепь, практически, только синусоидальную составляющую тока 50 Гц;
- в документации на МПРЗ следует ввести раздел, указывающий типы ТТ с которыми данное устройство МП РЗ может правильно функционировать.

В отечественной практике ТТ, несмотря на их очевидную важность и необходимость, до недавнего времени уделялось крайне мало внимания. Самым крупным отечественным исследованием ТТ, известным автору, был выполненный в конце 1970-х годов Горьковским отделением института Энергосетьпроект [4]. При выполнении этой работы были изучены все типы ТТ, выпускавшиеся в то время в нашей стране и разработана инженерная методика их применения для тех типов устройств РЗ, которые выпускались в то время. Затем работа была продолжена для новых типов ТТ, выпуск которых осваивался промышленностью, а с 90-х годов прошлого века работа в этом направлении не проводилась.

В настоящее время ведутся работы по созданию нормативных документов по применению ТТ разных типов с МПРЗ.

Рассмотрим некоторые технические решения, не противоречащие действующим нормативным материалам по ТТ, которые позволят повысить правильность работы МПРЗ с ТТ разных типов. Приведенные ниже технические решения не противоречат действующим нормативным материалам по ТТ и учитывают разработанные к настоящему времени новые возможности, которые по запросу эксплуатации могут предоставляться производителем ТТ.

Общая идея предлагаемых технических решений заключается в применении таких электромагнитных ТТ и с такими исходными данными, при которых на весь срок службы ТТ не возникнет необходимость проверки ТТ на допустимую погрешность. Это хорошая для эксплуатации идея. Реализация идеи заключается в исполнении действующих нормативов по ТТ и в применении наработанных на сегодня технических решений по ТТ. Рекомендации по применению ТТ будут предлагаться в директивном стиле. Это связано с тем, что обоснование предлагаемых решений требует значительных объемов изложения, не уместных в объеме статьи.

В первую очередь должны применяться ТТ типа ТРР, как имеющий

нормируемое значение остаточной намагниченности. Также допустимо применение ТТ типов ТРУ и ТРЗ, которые также имеют нормируемые значения остаточной намагниченности и погрешности в переходных режимах.

Желательно, чтобы в распределительном устройстве одного класса напряжения на энергообъекте были установлены ТТ одного типа. Это возможно для вновь проектируемых энергообъектов. При реконструкции действующих энергообъектов следует применять ТТ с максимально похожими характеристиками, особенно, в переходных режимах КЗ. При разных типах ТТ применение ТТ типа ТРЗ не рекомендуется. Допустимость принятого решения должна быть подтверждена проверкой на модели.

Далее необходимо выбрать первичный номинальный ток ТТ. Этот ток должен быть больше номинального тока того первичного оборудования, на котором ТТ установлен. Действующий норматив не запрещает установку на первичном оборудовании ТТ с номинальным током большим, чем номинальный ток оборудования, на котором ТТ установлен.

Рассмотрим возможность выбора номинального первичного тока ТТ, например, в два или в три раза больше номинального тока первичного оборудования. Такие решения в ряде случаев уже давно применяются на практике.

Увеличение номинального тока ТТ позволяет в два или три раза снизить предельную кратность тока КЗ к номинальному току ТТ и повысить допустимую вторичную нагрузку на ТТ. Много это или мало, и что это даст? Такое решение позволяет существенно повысить допустимую вторичную нагрузку на ТТ. Рассмотрим, как это выглядит в материалах [4]. На рис. 1 приведены нагрузочные характеристики ТТ с номинальным вторичным током 5 А. Для ТТ с вторичным номинальным током 1 А значение допустимой нагрузки на рисунке должно быть увеличено в 25 раз.

На рис. 1 приведены нагрузочные кривые для ТТ классов P и 0,5 %,

поскольку в то время магнитопроводы обмоток ТТ разных классов выполнялись с применением одинакового типа стали и ТТ с обмотками класса 0,5 % широко использовался для подключения устройств РЗ, поскольку в то время ТТ часто выпускались с двумя вторичными обмотками.

Как следует из рис. 1, допустимая нагрузка ТТ определяется отношением тока КЗ к номинальному первичному току ТТ (предельной кратностью). Для увеличения нагрузочной способности обмотки ТТ необходимо снижать предельную кратность, для чего необходимо увеличивать номинальный первичный ток ТТ. Из сказанного следует, что первичный номинальный ток ТТ должен быть в два и более раз больше первичного номинального тока того первичного оборудования, на котором он установлен.

Например, из рис. 1 следует, что если по первичной обмотке ТТ пропустить ток, например, в 40 раз больше номинального первичного тока ТТ, то допустимая нагрузка будет составлять 0,2 Ома для ТТ с вторичным номинальным током 5 А. Для увеличения допустимой нагрузки следует уменьшить коэффициент предельной кратности за счет увеличения номинального первичного тока ТТ. Если номинальный первичный ток ТТ увеличить в два раза, то предельная кратность снизится в два раза и допустимая вторичная нагрузка возрастет в 10 раз и составит более 2 Ом. Дальнейшее увеличение первичного номинального тока ТТ не приводит к существенному увеличению вторичной нагрузки ТТ.

Далее выбираем вторичный номинальный ток ТТ. Вторичный номинальный ток ТТ также сильно влияет на нагрузочную способность ТТ. Значительное увеличение нагрузочной способности ТТ дает переход на ТТ с вторичным номинальным током 1 А, вместо применения ТТ с вторичным номинальным током 5 А. Как указано для рис. 1, допустимая нагрузка на ТТ при применении вторичного номинального тока 1 А возрастает в 25 раз по сравнению с применением ТТ с вторичным но-

минальным током 5 А. Сегодня сопротивление токовых цепей МПРЗ составляет 0,1 Ома, если принять, что протяженность токовых цепей одного присоединения не превышает 1000 метров, и сопротивление одной фазы токовых цепей не превышает 2,5–7,0 Ома в зависимости от сечения и материала кабелей токовых цепей. Из рис. 1 следует, что допустимая нагрузка на ТТ может быть обеспечена, как при вторичном номинальном токе 1 А, так и при вторичном номинальном токе 5 А.

Для эксплуатации более удобным является вторичный номинальный ток 5 А, поскольку он позволяет обеспечить большие величины вторичных токов при минимальных токах нагрузки. Однако, большая нагрузочная способность ТТ с вторичным номинальным током 1 А позволит создать более благоприятные условия для работы ТТ и МПРЗ в переходных режимах КЗ. Для достижения максимально благоприятных условий работы ТТ и МПРЗ при выборе ТТ следует одновременно принимать оба решения – увеличение первичного номинального тока ТТ в два раза и переходить на вторичный номинальный ток ТТ, равный 1 А. Применение только одного решения существенно ухудшает работу ТТ и МПРЗ в переходных режимах КЗ. ТТ с вторичным номинальным током 1 А должны применяться для всех присоединений напряжением 6 кВ и выше за исключением случаев, когда ТТ используется как источник мощности.

На вопрос о том, при токе КЗ какой величины проверять допустимую вторичную нагрузку на ТТ, следует очевидный ответ – проверку надо проводить при максимальном токе КЗ, который может отключить выключатель присоединения, и при том виде КЗ, который дает максимальную нагрузку на ТТ. При создании схем сети в ремонтных и аварийных режимах соответствующие подразделения энергосистем и СО «ЦДУ ЕЭС» проверяют, что в создаваемых ими первичных схемах ток КЗ не превысит отключающей способности выключателей. Поэтому можно быть уверенным, что вели-

чина максимального отключающего тока выключателя присоединения в создаваемых схемах не будет превышена. Но, конечно, никто не проверяет допустимость создаваемого режима и величины тока КЗ на работу ТТ и МПРЗ. Поэтому предлагаемый подход позволит применить такой ТТ и такую нагрузку на ТТ, при которых при всех возможных режимах работы сети и уровнях токов КЗ обеспечит нормальную работу ТТ и МПРЗ. При замене выключателей, обычно ТТ заменяются вместе с выключателями, особенно, если это встроенные ТТ. Поэтому можно быть уверенным, что ТТ заменят вместе с выключателем и новый ТТ будет работать так же хорошо, как и его предшественник.

Далее производится выбор нагрузочной способности вторичной обмотки ТТ в соответствии с действующими нормативами при максимальном токе отключения выключателя и соответствующем виде КЗ. Возможно, максимальный ток отключения выключателя будет больше реального существующего на момент выбора ТТ тока КЗ в этой точке сети и даже с перспективой на 5 лет вперед. Однако, если поступить предлагаемым образом, то при любых колебаниях величин токов КЗ в сети за весь жизненный цикл ТТ гарантирована правильная работа устройств РЗ по причине, связанной с нагрузкой ТТ. По действующим правилам такой выбор делается в установившемся режиме КЗ и не делается в переходных режимах. Нормативы по выбору нагрузки на вторичную обмотку ТТ в переходных режимах КЗ в настоящее время отсутствуют, но если выбор нагрузки вторичной обмотки ТТ сделать как указано выше, это существенно повысит вероятность правильной работы МПРЗ в переходном режиме работы ТТ при переходных режимах КЗ.

В настоящее время производители ТТ могут по заказу изготавливать вторичные обмотки ТТ, которые способны нести необходимую нагрузку, как при КЗ, так и при токах нагрузки от минимальных значений, до токов КЗ. Например, возможен заказ вторичной обмотки

ТТ, с требуемой нагрузочной способностью как при КЗ, так и в диапазоне токов от (5–7) % до 120 % от номинального тока ТТ. В диапазоне токов от (5–7) % до 120 % от номинального тока ТТ обеспечивается измерение токов с точностью 0,5 %. Такие ТТ могут широко использоваться в ДЗТ трансформаторов и АТ, в которых ток срабатывания составляет 30 % от номинального тока силового трансформатора или АТ, и много меньше 30 % номинальных первичных токов ТТ, установленных на трансформаторов и АТ. Также такие ТТ могут быть полезны для МПРЗ с малыми токами срабатывания.

Почему-то при рассмотрении ТТ учитываются только интересы организаций, эксплуатирующих и использующих ТТ, и совсем не рассматриваются интересы организаций, разрабатывающих и производящих ТТ. Только комплексный учет интересов всех организаций, имеющих отношение к ТТ, позволит создать «идеальный» ТТ, в котором учтены интересы всех. Если вернуться к началу статьи, то очевидно, что все проблемы начались с того, что разработчики и производители ТТ стали применять другую, чем раньше, сталь для магнитопроводов ТТ. Если бы применялась сталь Э310, Э330, то мы бы жили по нормам работы [4] и никаких проблем бы не было.

Новая сталь для магнитопроводов ТТ, которая используется в настоящее время, дешевле, чем та сталь, которая использовалась ранее. Поэтому такой переход вполне понятен по экономическим показателям. Из-за дороговизны и из-за увеличения габаритов для изготовления ТТ не используется аморфное железо.

Для обеспечения точности измерений в ТТ для магнитопроводов обмоток измерений используется пермаллой (прецизионный сплав с магнитно-мягкими свойствами, состоящий из железа и никеля (45–82 % Ni)).

Для снижения массогабаритных показателей и удешевления стоимости магнитопроводов производителям ТТ необходим переход на ТТ с вторичным номинальным током 1 А.

Наибольший выигрыш переход на ТТ с вторичным номинальным током 1 А дает для встроенных в выключатели и в силовые трансформаторы и АТ ТТ из-за значительных веса и размеров магнитопроводов таких ТТ. Предполагаю, что в обозримом будущем нас ожидает переход на ТТ с вторичным номинальным током 1 А или, даже, 0,5 А.

Учет интересов производителей ТТ не является чем-то негативным. Если будут преобладать интересы эксплуатации, то ТТ могут стать очень большими и дорогими, чего эксплуатация не хочет. Поэтому в ТТ должны гармонично сочетаться требования производителей и эксплуатации. Гармоничное сочетание подразумевает то, что изменения не должны осуществляться производителями явочным порядком, а эксплуатация должна быть обеспечена правильной работой МПРЗ с новыми ТТ. Гармония может быть достигнута при аттестации ТТ в СО ЕЭС и в других организациях при учете требований производителей МПРЗ.

Существующие нормативные материалы по ТТ не обеспечивают гармонии между производителями и эксплуатацией. Например, в ГОСТ 7746-2015 в таблице допускаемых погрешностей обмоток для защиты, для токов, не являющимися токами КЗ, предусмотрена только одна контрольная точка – при номинальном токе, составляющая 1 % для ТТ класса 5Р и 3 % для ТТ класса 10Р. Это означает, что при завышении номинального первичного тока, точка с гарантируемой изготовителем точностью уходит из диапазона рабочих токов, что может не устраивать организацию, эксплуатирующую ТТ.

В настоящее время рассматривается проект ГОСТ Р на трансформаторы тока. Этот проект является доработанным вариантом предварительного стандарта ПНСТ 283-2018. В частности, в нем предусмотрена возможность изготовления ТТ с расширенным диапазоном токов. Для такого ТТ, предназначенного для защиты, диапазон токов в котором обеспечивается гарантированная точность, составляет от

10 % до 100 % номинального тока. При этом точность при токах КЗ соответствует классам точности, предусматриваемым этим ГОСТ Р. В обозначение класса точности ТТ с расширенным диапазоном токов добавляется звездочка, например, 5PR\*, 10PR\* или TPZ\*. Это позволяет оптимизировать габариты активной части ТТ путем применения увеличенного номинального тока, не снижая точностных характеристик в диапазоне рабочих токов.

Использование вышеуказанных рекомендаций позволит, на мой взгляд, в эксплуатации уменьшить количество проблем, связанных с применением ТТ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 7746-68. Трансформаторы тока.
2. Стандарт МЭК 61869-2. Издание 1.0 2012-09. Международный стандарт. Измерительные трансформаторы. Часть 2. Дополнительные требования для трансформаторов тока. Редакция 1.0 2012-09.
3. ГОСТ Р 58669-2019 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформатора тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротком замыкании.
4. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. Москва, «Энергия», 1980.
5. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 283-2018. Трансформаторы тока измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока. Издание официальное. Москва. Стандартинформ. 2019.
6. Кужеков С.Л., Дегтярев А.В., Дони Н.А., Шурупов А.А. Характеристики и выбор трансформаторов тока с немагнитным зазором для релейной защиты при наличии в первичном токе аperiodической составляющей. Энергоэксперт, № 3, 2020, с. 25–36.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ



МФЭС



# 2023

## 21-24 ноября

Москва, ВДНХ, павильоны №55, 57

Уважаемые коллеги!

В период с 21 по 24 ноября 2023 года в Москве, на территории ВДНХ, в выставочных павильонах №55 и 57 состоится Международный форум «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ» (МФЭС) – XXV-ое отраслевое мероприятие, предоставляющее оптимальные условия для продвижения передовых энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий, модернизации и технического перевооружения электросетевого комплекса, а так же совершенствования системы управления электрическими сетями.

Основными задачами деловой программы являются обмен техническими знаниями и информацией между инженерным персоналом, учеными и техническими специалистами отрасли, а также опытом планирования развития и эксплуатации энергосистем.

К участию в Международном форуме «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ» приглашаются научные, проектные, строительные, эксплуатационные организации электросетевого комплекса России и других стран, производители электротехнического оборудования, элементов ЛЭП, разработчики и производители средств автоматизации, связи, диагностики оборудования, учета электроэнергии, разработчики и производители программного обеспечения, образовательные учреждения и отраслевые СМИ.

Заявки на участие принимаются до 10 октября 2023 г.

Организатор:  
АО «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ»



Телефон: +7 (495) 640-20-80  
E-mail: [exhibit@twest.ru](mailto:exhibit@twest.ru)

[www.expoelectroseti.ru](http://www.expoelectroseti.ru)

16+

Ретрофит  
присоединений 6–20 кВ

**190 000+**

Ретрофит  
присоединений 35 кВ

**3 000+**

Автоматизация  
сетей 6–20 кВ

**70 000+**

Центры питания  
подстанции 35 кВ

**100+**

Распределительные  
устройства 6–20 кВ

**30 000+**

# Аудит объекта и разработка оптимальных технических решений на внедоговорной стадии

