

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА МОЩНОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

К 100-летию Всесоюзного электротехнического института

АВТОРЫ:

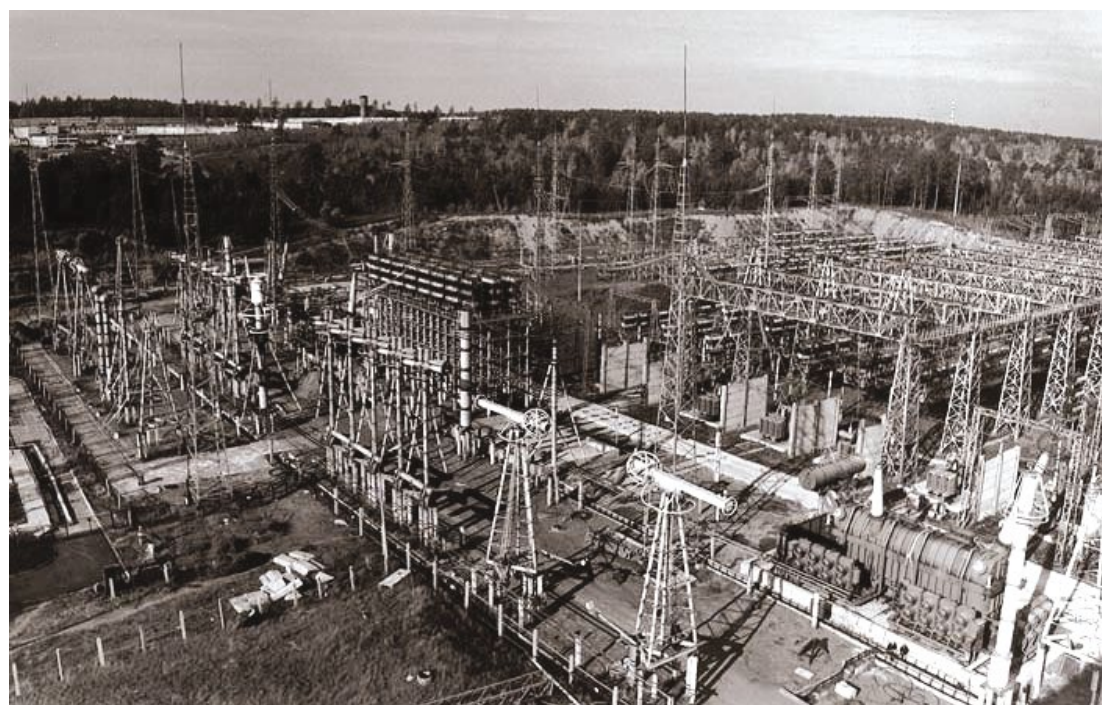
А.Ю. ХРЕННИКОВ,
Д.Т.Н.,
«НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Р.Н. ШУЛЬГА,
К.Т.Н.,
ВЭИ – ФИЛИАЛ ФГУП
«РФЯЦ-ВНИИТФ»

Начатая еще в 1960-х гг. большая программа энергетического обновления страны требовала разработки принципиально новых

технических и организационных методов. Создание мощных испытательных стендов являлось ключевым элементом этой программы.

Ключевые слова: комплексная разработка; проектирование; энергетический объект; мощный испытательный стенд.



Мощный испытательный стенд ВЭИ в г. Тольятти на напряжение 500–1150 кВ

ВВЕДЕНИЕ

Наша страна была лидером энергетического строительства на протяжении 50 лет вплоть до 1990-х гг., у нас впервые в мире построили такие объекты, как передача постоянного тока (ППТ) 1500 кВ «Экибастуз — Центр» мощностью 6 ГВт, Выборгская вставка постоянного тока (ВПТ) мощностью 1,4 ГВт, линия электропередачи (ЛЭП) 1150 кВ «Экибастуз — Урал» и, наконец, мощный испытательный стенд (МИС) в г. Тольятти. Данные объекты создавались с учетом опыта строительства и эксплуатации ранее построенных ППТ 100 кВ «Кашира — Москва» (1950), ППТ 800 кВ «Волгоград — Донбасс» (1964) на основе высоковольтных ртутных вентилях (ВРВ). Длвившаяся примерно 50 лет конкуренция между ВЭИ и фирмой АВВ (Швеция) в части ВРВ и соответственно между одно- и шестианодными вентилями переросла в последующем в конкуренцию в производстве высоковольтных тиристорных вентилях (ВТВ). Сконструированные в ВЭИ под руководством И.П. Таратуты восемь поколений ВТВ вплоть до 1990-х гг. опережали мировые разработки в части водяного охлаждения, светового управления, использования следящего импульса, модульной конструкции и др. Однако к 1970-м гг. произошли изменения в использовании ВРВ и ВТВ, обусловленные недостатками первых в отношении освоения заданных напряжений и токов, регулярными авариями типа обратных зажигания и пропусков зажигания, недостаточной надежностью. ВТВ еще только осваивались и не получили тогда широкого применения, в первую очередь, из-за их облика и структуры, методов охлаждения, проблем коронирования, возникающих при напряжениях выше 25 кВ.

Начатая в 1965 г. большая программа широкого энергетического стро-

ительства создавалась в трудных условиях нехватки средств, оторванности от технологических достижений Запада и на недостаточно проверенных и освоенных технических решениях, особенно в части применения ВРВ или ВТВ. Однако наличие цели опережающего развития энергетики для нужд растущего промышленного производства страны стало определяющим фактором такого решения, которое непосредственно контролировалось лидерами страны — Л.И. Брежневым и А.Н. Косыгиным.

Проводимая в 1990-х гг. либерализация экономики, попытка создания открытого энергетического рынка привели к развалу экономики, деформации электроэнергетики и переходу страны на уровень развивающихся стран. Китай, освоив наши технологические и организационно-экономические достижения, к настоящему времени стал лидером в энергетике в мире. Вводя ежегодно около 100 ГВт генерирующих мощностей (в России вводится около 5 ГВт), Китай разработал и построил десятки ППТ напряжением до 2200 кВ, а также начал создавать кабельные сети в виде многоподстанционных сетей постоянного тока (МСПТ) вплоть до 500 кВ даже при недостаточно проработанных и освоенных выключателях постоянного тока такого напряжения. В России после неудачных попыток встроиться в ВТО и открытый рынок, тем более в условиях санкций, осложненных пандемией, назрела необходимость в организационной перестройке электроэнергетики. Несмотря на ряд застарелых болезней, таких как неиспользуемые мощности, устаревшая техника генерации и распределения, бурный рост применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распределенной генерации, централизованная энергетика остается опорой развития экономики страны

с учетом новых организационных и технологических достижений.

Задача настоящей статьи состоит в том, чтобы в канун 100-летия ВЭИ и 100-летия плана ГОЭРЛО вспомнить некоторые технические и организационные методы достижения поставленных целей опережающего развития электроэнергетики путем создания мощных испытательных стендов даже при ограничениях ресурсной базы. Для этого рассмотрена реализация ключевого объекта — МИС, необходимого для создания ВПТ, ППТ. Организационной предпосылкой строительства указанных объектов явилось взаимодействие ведущих организаций Минэнерго (П.С. Непорожный): «Энергосетьпроект» (С.С. Рокотян), НИИПТ (А.В. Поссе) и Минэлектротехпрома: ВЭИ (В.П. Фотин). Главная роль отводилась Минэлектротехпрому во главе с А.К. Антоновым, Ю.А. Никитиным, Н.А. Оболенским и др., которые смогли скоординировать работу более 60 организаций и предприятий страны для поставки старого и нового оборудования. Следует отметить, что даже традиционное оборудование (трансформаторы, реакторы, разрядники, конденсаторы и пр.), создаваемое в расчете на повышенные параметры, трудно было назвать таковым. К новому оборудованию относились высоковольтные вентили (ВВ) на класс напряжения до 400 кВ, комплектное распределительное устройство элегазовое (КРУЭ) на напряжение от 110 до 1150 кВ, комплекс аппаратуры элегазовый (КАЭ) 1500 кВ, статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК) 10, 35, 1150 кВ и пр.

Многокомпонентный комплекс электротехнического оборудования постоянного тока (КЭО), разрабатываемый впервые в мире, потребовал создания унифицированного испытательного стенда, которым стал МИС. Затруднения

в части кооперации и согласования документов для весьма крупного проекта ППТ между организациями Минэнерго и Минэлектротехпрома привели к затягиванию сроков выполнения проекта. Например, подготовка и согласование основополагающей таблицы координации типовых и контрольных испытаний оборудования классов напряжения 400 и 800 кВ заняли до двух лет наряду с проработкой и согласованием ряда вариантов схемотехники ППТ, системы защиты от перена-

пряжений (СЗП), типов разрядников и ограничителей перенапряжения нелинейных (ОПН), системы управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА). В ВЭИ был создан штаб в виде отделения разработки комплексов электрооборудования (Н.Н. Соколов, В.П. Кулаков, А.Г. Викулин), который взаимодействовал с проектировщиками и заводами — изготовителями оборудования. Трудности координации, согласования, испытаний и приемки разнотипного оборудования при-

вели к идее разработки и поставки от ВЭИ для ВПТ комплектного высоковольтного преобразовательного устройства (КВПУ), которое впервые было введено в строй в Выборге в 1982 г. для связи энергосистем «Нордел» (Финляндия) и ЕЭС с окончательным вводом четырех КВПУ в 2002 г.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗНАЧИМОСТЬ СОЗДАНИЯ МИС

С середины 1960-х гг. в ВЭИ проводились интенсивные работы по созданию ВТВ для ППТ и ВПТ. Преимущества этих энергетических объектов могли быть реализованы только в том случае, если создаваемое оборудование обладает высокой надежностью. Возникла необходимость в проведении полномасштабных испытаний в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Для этого в конце 1960-х гг. в г. Тольятти началось строительство МИС, а уже в 1972 г. проводились натурные испытания образцов высоковольтной преобразовательной техники.

С начала 1980-х гг. активно развивалось второе направление, связанное с организацией и проведением испытаний сверхвысоковольтного оборудования переменного напряжения 1150 кВ. В результате на МИС сформировались стенды для испытаний, в том числе длительных испытаний на надежность, электрооборудования 1500 кВ постоянного и 1150 кВ переменного тока, испытаний на стойкость при коротком замыкании (КЗ).

МИС располагал территорией в 19,6 га с открытым распределительным устройством 500 кВ,

питание которого осуществлялось от линии электропередачи 500 кВ «Волжская ГЭС — Бугульма» (сейчас Жигулевская ГЭС) (рис. на стр. 24).

Создание в конце 1970-х — начале 1980-х гг. МИС ВЭИ для проведения электродинамических испытаний трансформаторно-реакторного оборудования (ТРЭО) было обусловлено острой необходимостью решения названной проблемы в СССР и внесло большой вклад в повышение надежности проектируемого оборудования.

С учетом непосредственной близости мощных источников, и прежде всего Волжской ГЭС, а также развитой сетевой инфраструктуры оказалось возможным обеспечить на данном стенде мощность КЗ 12–18 ГВА, достаточную для проведения электродинамических испытаний трансформаторов мощностью до 666 МВА, реакторов и другого оборудования на напряжение до 500 кВ и выше.

Главная схема электрических соединений стенда изображена на рис. 1. Стенд присоединен к воздушной линии (ВЛ) 500 кВ с помощью выключателей Q1... Q4 по схеме четырехугольника. Выключатели Q5... Q10 служат для подключения фильтрокомпенсирующих устройств ФКУ1, ФКУ2 и двух трансформаторных групп ТГ1, ТГ2.

Стенд для испытания оборудования постоянного тока состоит из двух преобразовательных мостов М1, М2, выполненных по трехфазной обесточиваемой схеме Ларионова, которые обеспечивают испытательные воздействия:

- номинальный ток 2100 А;
- ток 15-минутной перегрузки 2800 А;
- выпрямленное напряжение моста 375 кВ;

ДИСКРЕТНЫЙ СПЕКТР ГАРМОНИК ТОКА, ГЕНЕРИРУЕМЫХ КРУГОВОЙ СХЕМОЙ СТЕНДА В ПИТАЮЩУЮ ЭНЕРГОСИСТЕМУ

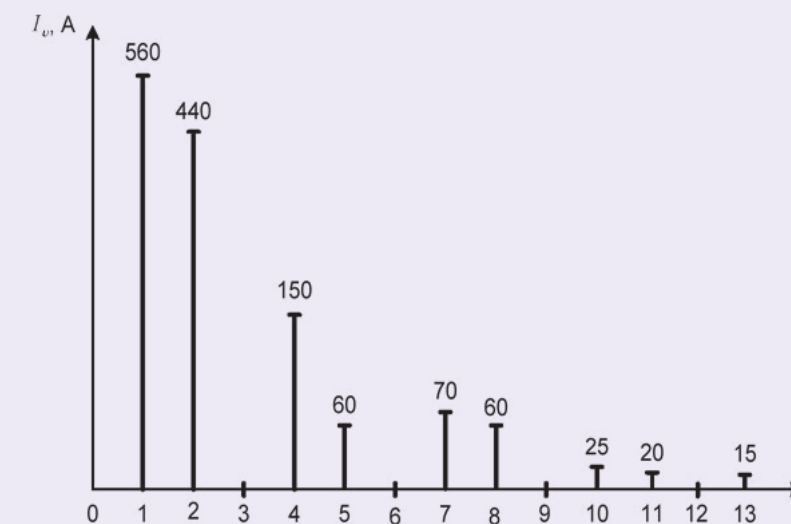


Рис. 2

- максимальное рабочее напряжение верхнего полюса и фазы моста относительно земли 1200 кВ.

ВТВ и оборудование, входящее в состав преобразовательных мостов М1, М2, размещались на двух платформах промежуточного потенциала, изолированных от земли на напряжение 750 кВ. В контуре постоянного тока мостов М1, М2 включена реакторная группа L с суммарной индуктивностью 2 Гн, рассчитанная на длительную работу с током 2400 А.

Каждый преобразовательный мост М1, М2 питается от своей группы однофазных преобразовательных трансформаторов 3 × 175 МВА. В зависимости от схемы соединения вентильных обмоток выпрямленное напряжение преобразовательных мостов составляет 110, 190, 375 кВ.

Для проведения полномасштабных испытаний оборудования стенда постоянного тока предусмотрен специальный источник подпора постоянного напряжения, состоящий из диодного блока (VD) и высоковольтного испытательного трансформатора (Т) с напряжениями обмоток 6/500 кВ. «Подпор» напряжением этого источника имитировал воздействия, которые имеют место в реальных условиях на последнем от земли мосту преобразовательной подстанции.

В зависимости от режима питающей энергосистемы, цели и числа единиц поставленного на испытания оборудования на стенде были реализованы:

- круговая схема, когда работает один преобразовательный мост

ГЛАВНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ МИС

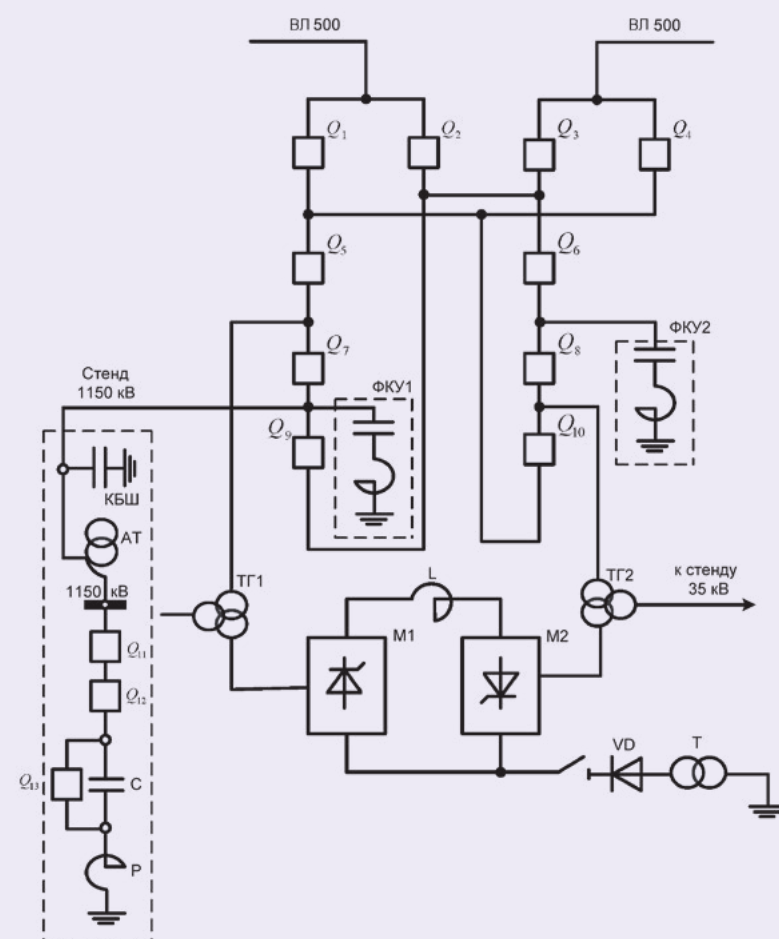


Рис. 1

(M1 или M2) на реакторную группу L, которая должна включаться между полюсами работающего моста. В этом случае одна группа вентилей преобразовательного моста (например, вентили анодной группы) работает в выпрямительном режиме, а другая группа вентилей (соответственно вентили катодной группы) работает в инверторном режиме. Потребление активной мощности из питающей энергосистемы определяется уровнем потерь в испытуемом оборудовании, главным образом в ВТВ преобразовательного моста;

- кольцевая схема, когда один преобразовательный мост (например, M1) работает в выпрямительном режиме на другой преобразовательный мост (соответственно M2) в инверторном режиме через реактор L, как было показано на рис. 1. Потребление активной мощности из питающей энергосистемы определяется, главным образом, уровнем потерь в ВТВ двух преобразовательных мостов;
- режим ВПТ, когда осуществляется транзит активной мощности, передаваемой по ВЛ 500 кВ, через преобразовательные мосты M1, M2, один из которых работает в выпрямительном, а другой — в инверторном режиме.

Соответственно изменяется состав фильтров ФКУ1, ФКУ2 и коммутация выключателей Q1... Q10. Для реализации указанных режимов испытаний при номинальной нагрузке необходим правильный выбор параметров фильтров по условиям минимального искажения формы напряжения на шинах 500 кВ и отсутствия резонансных явлений в питающей энергосистеме. На первом этапе создания МИС из-за ограничения финансирования (на уровне 60 млн руб.) была внедрена схема с одним мостом с круговым режимом.

На рис. 2 приведен дискретный спектр возможных значений основной и высшей гармоник тока $v = 3k \pm 1$, где $k = 0, 1, 2, \dots$, генерируемых круговой схемой при номинальном режиме при угле включения вентилей $\alpha = (10-30)$ эл. град. Высокий уровень гармоник в такой схеме не соответствовал условиям работы вентилей в ППТ, и на следующем этапе была использована схема с двумя мостами, работающая в кольцевом режиме.

Основная и высшие гармоники тока, генерируемые кольцевой схемой испытаний, а также при работе мостов в режиме ВПТ составляют $v = 6k \pm 1$ и имеют соответственно в $\sqrt{2} + \sqrt{3}$ раз большие значения.



Рис. 3. КРУЭ на напряжение 1150 кВ (ячейка КРУЭ 1150 кВ)

Компенсация генерируемых преобразовательными мостами M1, M2 гармоник тока осуществляется узкополосными фильтрами 4, 5, 7, 11 и 13-й гармоник и широкополосным фильтром, входящими в состав ФКУ1, ФКУ2. Кроме того, использование ФКУ1, ФКУ2 позволило проводить полномасштабные испытания оборудования в круговой и кольцевой схемах при широкой вариации амплитудно-частотных характеристик питающей сети, имитировать на стенде режим ВПТ, проводить широкий комплекс исследований по взаимодействию стенда и энергосистемы при различного рода нарушениях.

В период с 1973 до 1991 г. на МИС проведены натурные испытания нескольких поколений ВТВ, разработанных специалистами ВЭИ и изготовленные на СВПО «Трансформатор» (г. Тольятти). Эти вентили работали на ППТ «Кашира — Москва», ППТ «Волгоград — Донбасс» (± 400 кВ, 900 А), на Выборгской ВПТ, связывающей ОЭС Северо-Запада России и энергообъединение «Нордел» в Финляндии. К концу 1980-х гг. был разработан специалистами ВЭИ, успешно испытан на МИС и практически полностью изготовлен на СВПО «Трансформатор» комплекс электрооборудования для первой очереди электропередачи «Экибастуз — Центр» (± 750 кВ, 2000 А). К сожалению, после распада СССР строительство этой одной из самых мощных в мире линии электропередачи постоянного тока было прекращено. На стенде постоянного тока были проведены испытания советско-финского СТК на 10 кВ, 10 МВА, а также вентилей для СТК мощностью 180 МВА для металлургических комбинатов в Молдавии и на Дальнем Востоке.

Стенд переменного тока 1150 кВ состоял из двух автотрансформаторов мощностью 667 МВА

каждый (АОДЦТ 667000/1150/500), выключателей 1150 кВ (ВНВ-1150 и Во-1150), шунтирующего реактора мощностью 300 МВА (РОДЦ 300000/1150), продольной конденсаторной батареи, защитных и измерительных аппаратов, комплектного распределительного устройства. На стенде осуществлялись следующие режимы испытаний:

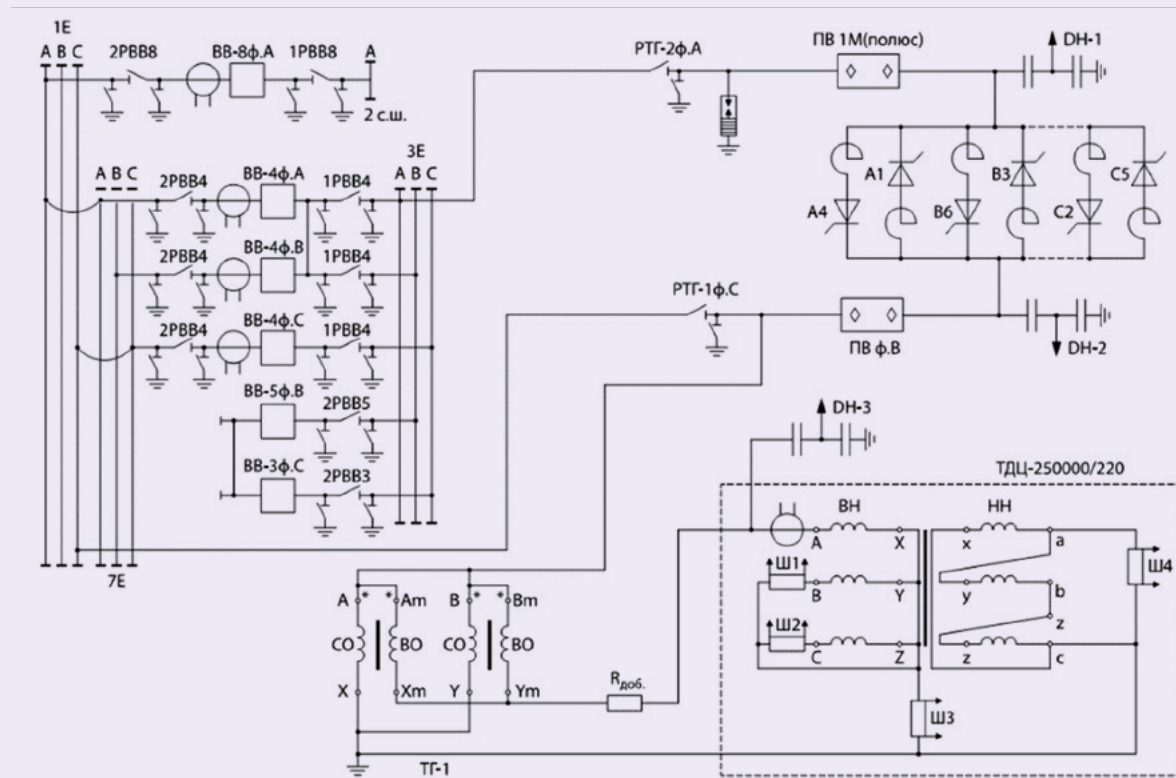
- плавный подъем напряжения и включение оборудования под напряжение «толчком»;

- режим холостого хода и нагрузочные испытания;
- испытания реакторов при рабочем и повышенном за счет включения конденсаторной батареи продольной компенсации напряжении;
- исследование и испытание оборудования с элегазовой изоляцией;
- искровое безынерционное подключение шунтирующего

реактора через выключатель — отключатель.

На стенде переменного тока был успешно испытан комплекс электрооборудования 1150 кВ с элегазовой изоляцией (ячейка КРУЭ) (рис. 3), разъединитель высоковольтный однополюсный типа РТЗ-1150/4000. Проведенные на стенде переменного тока испытания позволили уже в 1985 г. ввести в опытно-промышленную эксплуатацию участок линии напряжением 1150 кВ «Сибирь — Казахстан — Урал».

СХЕМА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА СТОЙКОСТЬ К ТКЗ ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА ТДЦ-250000/220 НА МИС ВЭИ



Обозначения: 1PBВ, 2PBВ — разъединители; ВВ — выключатели для подключения и отключения сети 500 кВ; ТГ-1 — промежуточные трансформаторные группы для создания необходимых величин сопротивлений и ограничения токов КЗ; А1-А4, В3-В6, С2-С5 — высоковольтные тиристорные вентили, которые собираются по схеме тиристорного ключа и являются коммутирующим аппаратом, пропускающим переменный ток в течение заданного времени; ДН-1, ДН-3 — емкостные делители напряжения; R_{доб} — ограничивающее сопротивление для ограничения ТКЗ в наладочных опытах; ТДЦ-250000/220 — испытуемый трансформатор с искусственно замкнутой фазой А обмотки НН; Ш1-Ш4 — малоиндуктивные токоизмерительные шунты.

Рис. 4

Трансформаторное оборудование МИС мощностью 175–667 МВА позволяло получать регулируемое напряжение для проведения испытаний на стойкость к токам короткого замыкания (ТКЗ) трансформаторов и реакторов классов напряжения до 1150 кВ и мощностью до 667 МВА. Коммутационное оборудование стенда (ВТВ) давало возможность осуществлять включение ТКЗ в нужный момент времени с точностью до 1 эл. град., а также проведение специальных испытаний трансформаторов многократными бросками тока. Мощный испытательный стенд располагал необходимыми помещениями и технологическим оборудованием для ревизии и монтажа трансформаторов напряжением до 1150 кВ, обработки трансформаторного масла, что позволяло проводить электродинамические испытания в полном соответствии с требованиями стандартов.

Система измерений и регистрации (на рис. 1 не показана) включала в себя парк измерительных трансформаторов на различные классы напряжения до 1150 кВ, трансформаторов тока, в том числе трансформаторов постоянного тока на номинальный ток 2100 А, делителей напряжения на 800 кВ постоянного тока и 1200 кВ переменного тока, регистрирующих осциллографов, аппаратуру управления, защиты и автоматики испытательного и испытываемого оборудования.

Для испытаний мощных трансформаторов от сети 500 кВ на МИС ВЭИ были разработаны схемы с использованием имевшегося оборудования. В период 1983–1994 гг. на этом стенде были проведены полномасштабные испытания в различных режимах около 30 ед. силовых трансформаторов и реакторов мощностью от 25 до 666 МВА с номинальными напряжениями от 110 до 750 кВ.

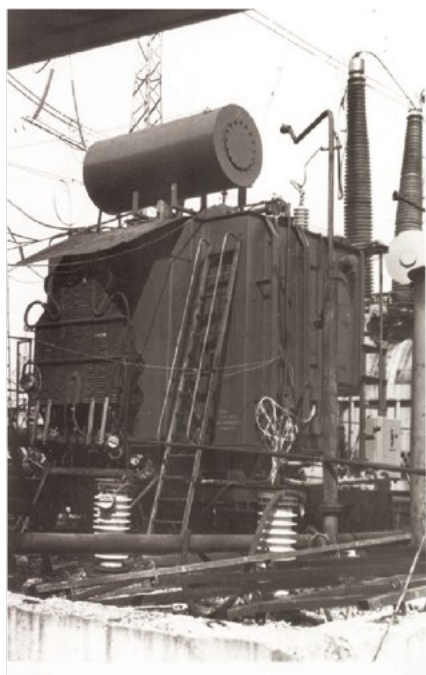


Рис. 5. Испытания трансформатора типа ЭТЦНКД-160000/110 для металлургического производства с имитацией толчков тока нагрузки в количестве 300 тыс. опытов

В рамках опытов, определявших стойкость к ТКЗ по ГОСТ 20243–88, были испытаны, например, блочные трансформаторы типа ТДЦ-400000/220, ОДЦ-333000/750, ТДЦ-250000/220, ТДЦ-80000/110, автотрансформатор типа АДТН-63000/220/110, сверхмощный трансформатор типа ТЦ-666000/500 для Рогунской ГЭС, трансформатор мощностью 320 МВА для ЛЭП постоянного тока, автотрансформаторы АДЦТН-125000/220/110 и АОД-ЦТНО-167000/500/220 для связи энергосистем 500 и 220 кВ и др.

Электрическая схема электродинамических испытаний на стойкость к ТКЗ трансформатора типа ТДЦ-250000/220 на МИС ВЭИ представлена на рис. 4.

В режимах многократных толчков тока, соответствующих рабочим нагрузкам, прошли испытания трансформато-

ры типа ЭТЦНКД-160000/110, ЭТЦНДТ-160000/35, ТРДЦНМ-100000/200000/220 производства московского «Электрозавода» для металлургического производства с имитацией толчков тока нагрузки в количестве 300 тыс. опытов. Испытания проводились от сети 500 кВ, трансформаторы на площадке МИС находились в баке с маслом (рис. 5).

Значимость МИС была обусловлена отсутствием подобных аналогов в мире, отладкой оборудования в условиях эксплуатации на реальном объекте, повышением надежности, подтверждением ресурсных испытаний. Проектирование и создание МИС осуществлялись силами ВЭИ под руководством В.П. Кулакова, А.Г. Викулина. В проведении испытаний активно участвовали сотрудники отдела высоковольтной преобразовательной техники (И.П. Таратута), отдела высокого напряжения (Е.Остапенко). На МИС сложился полноценный коллектив исполнителей — от А.В. Севрюгова, В.А. Червякова, В.Н. Карманова, В.П. Тараканова, А.А. Кувшинова, О.А. Шлегеля, А.Ю. Хренникова до директоров А.И. Краснова и А.Г. Долгополова. Ликвидация МИС к 2006 г. была связана с выживанием коллектива в условиях прекращения финансирования, дележом большого участка земли в Комсомольском районе города, необходимостью ликвидации загрязнений от трансформаторного масла и трихлордефила, содержавшегося в конденсаторах, вызванных разборкой и утилизацией трансформаторов и конденсаторных батарей.

Библиография МИС разрознена и растянута во времени примерно на половину XX в. и частично представлена в приведенном в этой статье списке литературы. Более полная библиография отражена в работах коллектива сотрудников

ВЭИ, опубликованных в «Трудах ВЭИ», журналах «Электричество», «Электротехника», «Энергетик», «Промышленная энергетика», «Электро» и др., докладах на международных конференциях. Тематика ВТВ отражена в работах И.П. Таратуты, Р.А. Лытаева, Х.Ф. Баракаева, вопросы проектирования и реализации КРУЭ — в работах И.М. Бортника, В.Б. Козлова, В.Н. Вариводова. Направление СТК связано с именами И.П. Таратуты и О.П. Нечаева. Вопросы испытаний трансформаторного оборудования отражены в работах А.Н. Панибратца, А.И. Лурье, А.К. Лоханина, О.А. Шлегеля, А.А. Кувшинова, А.Ю. Хренникова и др.

Кроме трансформаторов, на МИС были испытаны высокочастотные заградители ВЗ-2000/1,0 для ППТ напряжением 750 кВ, токоограничивающие реакторы РОСТ-700 для стенда динамических испытаний, реактор РОМ-35 для АЭС, фильтрокомпенсирующие реакторы РКOC-36000/33.

К сожалению, с начала 1990-х гг. в связи с распадом СССР полностью прекратилось централизованное финансирование, что привело к сворачиванию как текущих работ, так и дальнейшего развития МИС. К настоящему времени испытательное оборудование МИС демонтировано, но сохранились площадка ОРУ-500, испытательные корпуса, подъездные железнодорожные пути, линия 500 кВ, подстанция 110 кВ, которая обеспечивала собственные нужды МИС. Существует потенциальная возможность возрождения МИС для решения современных задач, предусмотренных стратегией развития электроэнергетики России на период до 2035 г., в частности, по созданию электрического моста Восток — Запад с помощью электропередач 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анненков В.З. Испытания электрооборудования 750–1150 кВ на промышленных линиях 750 кВ и на стенде 1150 кВ в Белом Расте. Кн. 2/В.З. Анненков, А.Н. Комаров, В.С. Рашкес и др.//Сб. ст. «Электропередачи 1150 кВ». Под ред. Г.А. Илларионова, В.С. Ляшенко. М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. Апакин А.В., Ашавин В.Т., Белов П.В. и др. Результаты испытаний трансформатора ТДТН-25000/110 на стойкость при коротком замыкании//Электротехника. 1987. № 4. С. 5–10.
3. Бортник И.М. Создание комплекса электрооборудования 1150 кВ и перспективы его совершенствования. Кн. 2. Сб. статей «Электропередачи 1150 кВ»/Под ред. Г.А. Илларионова, В.С. Ляшенко. М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Герцик К.А., Поссе А.В. Схемно-режимные решения в электропередаче постоянного тока Экибастуз — Центр 1500 кВ. В сб. науч. тр. «Преобразовательная техника в энергетике»/Под ред. Д.Е. Кадомского. Сборник научных трудов НИИПТ, 1986, с. 8–17.
5. Коваленко Ю.А., Панибратец А.Н., Шульга Р.Н. Опыт типовых и эксплуатационных испытаний оборудования 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока на МИС г. Тольятти//Электротехника. 2012. № 4. С. 2–5.
6. Левицкая Е.И., Лурье А.И., Панибратец А.Н. Проблема электродинамической стойкости трансформаторов при коротких замыканиях//Электротехника. 2001. № 9. С. 31–38.
7. Ракова Н.К., Ковшова Н.Л., Гузь Т.Н. Пусконаладочные испытания комплектного высоковольтного преобразовательного устройства на подстанции Выборгская//Труды ВЭИ. Электротехническое оборудование для вставки постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Смитс Р.П.П., Тэ Паске Л.Х. (КЕМА) Испытания силовых трансформаторов большой мощности на стойкость при КЗ (с коммент. В.Ю. Горшунова, А.И. Лурье и А.Н. Панибратца)//Энергоэксперт. 2009. № 4 (15). С. 104–114.
9. Хренников А.Ю. Возрождение испытательной базы для проверки силовых трансформаторов на электродинамическую стойкость//Вести в электроэнергетике. 2009. № 1. С. 28–36.
10. Хренников А.Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2019.
11. Хренников А.Ю., Дементьев Ю.А., Смекалов В.В., Шакарян Ю.Г., Кувшинов А.А. О создании Федерального испытательного центра. Электродинамические испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ.//Новости электротехники. 2014. № 1 (85), С. 32–37.
12. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А. Испытания силовых трансформаторов на электродинамическую стойкость к токам короткого замыкания//Библиотечка электротехника. 2016. Вып. 2 (206).
13. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А. Мощный испытательный стенд ВЭИ в г. Тольятти. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2016. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; вып. 1 (205)].
14. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в процессе эксплуатации//Промышленная энергетика. 2006. № 12. С. 12–14.
15. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях//Электричество. 2006. № 7. С. 17–24.
16. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А., Шкуропат И.А. и др. Обеспечение электромагнитной совместимости испытательного стенда с энергосистемой для электродинамических испытаний силовых трансформаторов//Энергетик. 2017. № 11. С. 3–7.
17. Хренников А.Ю., Таджибаев А.И. Анализ деформаций конструктивных элементов трансформаторно-реакторного оборудования//Библиотечка электротехника. 2016. Вып. 11 (215).
18. Хренников А.Ю., Шифрин Л.Н. Сверхмощный блочный трансформатор типа ТЦ-666000/500 — конструктивные решения, испытания на стойкость к токам короткого замыкания, расчеты токов КЗ//Электро. 2005. № 5. С. 36–41.
19. Хренников А.Ю. Электродинамическая стойкость силовых трансформаторов — условие безаварийной работы//Энергетик. 2009. № 5. С. 31–32.