

Посвящается памяти профессора Э.А. Азизова

УДК 621.039.6

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Э.А. Азизов, Р.П. Васильев, А.А. Гостев, И.Г. Стрижова

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, г. Троицк, Россия

В статье приводятся результаты работ по созданию источника импульсного питания (ИИП) комплекса термоядерной установки ТСП. Приводится состав энергетического оборудования ИИП и его технические характеристики. Отражена история создания энергокомплекса от постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР в 1978 г., процесса проектирования, разработки оборудования до монтажа и ввода в рабочий режим в 1990 г. Показана роль Э.А. Азизова в процессе руководства коллективом сотрудников ФИАЭ им. И.В. Курчатова по созданию энергокомплекса. Исходя из анализа состояния оборудования и его характеристик, видно, что энергокомплекс Отделения физики токамаков-реакторов (ОФТР) позволяет выполнять широкий спектр задач по синтетическим испытаниям электрофизического оборудования и коммутационной аппаратуры в диапазоне десятков киловольт и сотен килоампер, по созданию локального источника энергии до 100 МВА для компенсации реактивной мощности, для электропитания электрофизических установок типа токамак ТСП, Т-11М и др., класса Ангара—Байкал.

Ключевые слова: синхронный генератор, реактивная мощность, динамическая нагрузка, коммутатор, энергокомплекс, электропитание.

Dedicated to the memory of professor E.A. Azizov

POWER SYSTEM FOR ENERGY SUPPLY OF ELECTROPHYSICAL FACILITIES

E.A. Azizov, R.P. Vasiliev, A.A. Gostev, I.G. Strizhova

JSC «SSC RF TRINITY», Moscow, Troitsk, Russia

The paper presents the results of the work on creation of the pulsed power supply system (PPSS) for the thermonuclear facility TSP. The composition of the PPSS and technical characteristics of its power equipment are given. The history of the power system creation beginning from the decision of the CC of the CPSU and the USSR Council of Ministers in 1978, including the facility designing, equipment development and assembling and, installation commissioning in 1990 is described. The leadership of E.A. Azizov in the guidance of the I.V. Kurchatov FIAE team aimed at creating the power system is stressed. The analysis of the current status of the equipment and its characteristics show that the power system of the Tokamak-Reactor Physics Department of TRINITY allows to use it for a wide range of tasks: synthetic testing of electrophysical and switching equipment in the range of tens kV and hundreds kA; the creation of a local energy source up to 100 MVA for reactive power compensation and for the electrical power supply of electrophysical facilities (tokamaks TSP and T-11M, installations of Angara-Baikal class).

Key words: synchrotron generator, reactive power, pulsed load, commutator, complex power system electrical power supply.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-4-38-54

ВВЕДЕНИЕ

В 1978—1985 гг. в Филиале Института атомной энергии им. И.В. Курчатова был создан источник электропитания для исследований по термоядерному синтезу на термоядерной установке «Токамак с сильным магнитным полем (ТСП)», вошедший в перечень уникальных стендов и установок (УСУ) России. Этот перечень приведён на портале «Современная исследовательская инфраструктура Российской Федерации» (www.ckp-rf.ru/usu/73562/).

Работа проводилась по инициативе и под руководством Института атомной энергии им. И.В. Курчатова и филиала этого института в г. Троицке.

У истоков этой работы находился один из её инициаторов доктор физико-математических наук Энглен Атакузиевич Азизов. Под его руководством большим коллективом физиков, инженеров, техников и рабочих успешно проведены определённые директивными органами СССР разработка и сооружение одной из крупнейших установок типа токамак ТСП по программе управляемого термоядерного синтеза.

В 1991 г. за участие в цикле работ «Физика излучающих разрядов» Э.А. Азизов удостоен Государственной премии СССР. В 2009 г. он был удостоен Премии Правительства Российской Федерации в области нау-

ки и техники за работу «Комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по сооружению уникальной сферической термоядерной установки Глобус-М и создание в России научной и технологической базы для разработки токамаков с предельно высоким относительным давлением плазмы».

Проектирование, разработка оборудования и строительство комплекса ТСП были выполнены в союзных проектных и научно-исследовательских организациях бывшего СССР: Государственном специализированном проектно-институте (ГСПИ), Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова), Всесоюзном научно-исследовательском институте электромашиностроения (ВНИИЭлектромаш), Украинском государственном проектно-институте «Теплоэлектропроект» (УГПИ), Украинском государственном проектно-институте (Укргипроэнергопром), Ленинградском отделении института «Теплоэлектропроект» (ЛОТЭП), институтах Гидропроект, Энергосетьпроект, Московском энергетическом институте (МЭИ) и др.

Серийное изготовление и испытания оборудования осуществлялись крупнейшими предприятиями страны: Ленинградским производственным объединением «Электросила» (ЛПО «Электросила»), Харьковским электромеханическим заводом (ХЭМЗ), Таллинским электротехническим заводом (ТЭЗ), Уралэлектротяжмашем, Центральным котлотурбинным институтом (ЦКТИ) и др. [1]. Для размещения основного энергетического оборудования и электрофизических установок был построен комплекс зданий и сооружений, которые показаны на рис. 1, 2.



Рис. 1. Здание установки ТСП



Рис. 2. Энергокорпусы

В настоящее время этот энергокомплекс функционирует в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (г. Москва, г. Троицк) в составе ОФТР.

СОСТАВ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Энергокомплекс ОФТР представляет собой распределённую структуру, включающую в себя распределительные устройства 6 и 10 кВ промышленной частоты, кабельные и воздушные сети, электромашинные и тиристорные преобразователи, ёмкостные и индуктивные накопители. Такая структура позволяет достаточно оперативно создавать гибридные источники электропитания различного назначения. На рис. 3 представлена в виде блок-схемы упрощённая структура объекта.

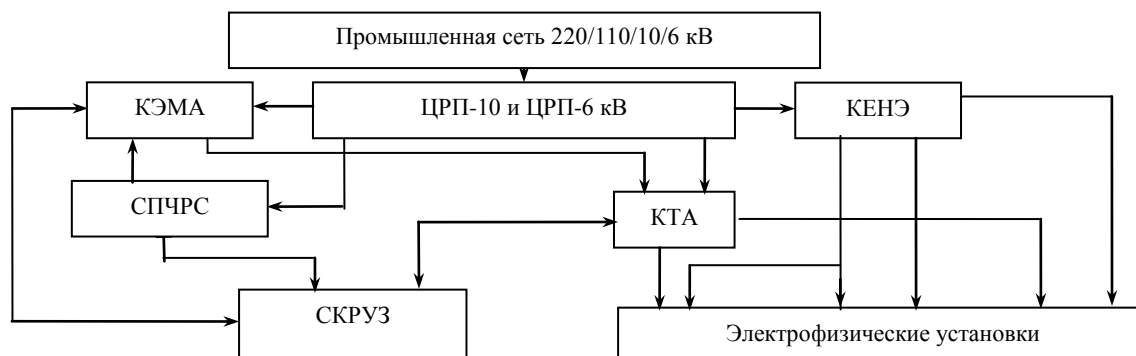


Рис. 3. Структурная схема энергокомплекса: промышленная сеть; центральные распределительные пункты ЦРП-10 и ЦРП-6 кВ; комплекс электромашинных агрегатов КЭМА; статические преобразователи частоты СПЧРС; комплекс ёмкостных накопителей энергии КЕНЭ; комплекс тиристорных агрегатов КТА; система контроля, регистрации, управления и защиты СКРУЗ

Энергокомплекс установки ТСП был сооружён в зоне энергетического узла 220 и 110 кВ высоковольтных воздушных сетей Мосэнерго в Подольском районе Московской области. По данным Мосэнерго и МЭИ система удобна для подключения к ней импульсной и стационарной нагрузки, так как сама система концентрированная и её эквивалентное сопротивление относительно подстанции (п/ст) Троицкая составляет 2,3 Ом, что позволяет равномерно распределить импульсные нагрузки между потребителями.

Промышленная сеть. П/ст Троицкая, в настоящее время п/ст № 377 «Лесная» 220/110/10/6 кВ (промышленная сеть) имеет в своём составе [moesk.ru]:

- открытое распределительное устройство ОРУ 220 кВ;
- открытое распределительное устройство 110 кВ;
- два силовых трансформатора (АТ1, АТ2) по 125 МВА;
- закрытое распределительное устройство ЗРУ 10 кВ для питания спокойных нагрузок ЦРПС—10 кВ установки ТСП;
- закрытое распределительное устройство ЗРУ 10 кВ для питания импульсных нагрузок ЦРПи—10 кВ установки ТСП;
- закрытое распределительное устройство ЗРУ 6 кВ для питания импульсных нагрузок ЦРПи—6 кВ установки ТСП.

П/ст № 377 «Лесная» входит в состав филиала «Южные электрические сети» ОАО «МОЭСК». Построена в 1988—1993 гг. Проектом предусматривались [http://empro.by/content/ps-no377-lesnaya]:

- полная реконструкция ОРУ-220 кВ по схеме «две рабочие и обходная системы шин»;
- полная реконструкция ОРУ-110 кВ по схеме «две рабочие и обходная системы шин», замена двух автотрансформаторов АТ-1, АТ-2 мощностью 125 МВА на автотрансформаторы мощностью 200 МВА;
- установка двух новых регулировочных трансформаторов по 40 МВА каждый с включением в работу двух существующих регулировочных трансформаторов мощностью по 40 МВА каждый;
- реконструкция КРУ-10 кВ по схеме «четыре одиночные, секционированные выключателями, системы шин» с сооружением пристройки к зданию ЗРУ-10 кВ;
- замена четырёх комплектов токоограничивающих реакторов 10 кВ;
- реконструкция систем СОПТ, собственных нужд и щита управления.

П/ст № 377 связана по ЛЭП 220 кВ и ЛЭП 110 кВ с п/ст Московского энергетического узла в единую мощную энергетическую сеть с возможностью надежного резервирования.

Центральные распределительные устройства ЦРП-10 и ЦРП-6 кВ. Центральные распределительные пункты АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» 10 и 6 кВ, принципиальная электрическая схема которых представлена на рис. 4, связаны кабельными линиями с ЗРУ 10 и 6 кВ п/ст № 377 «Лесная».

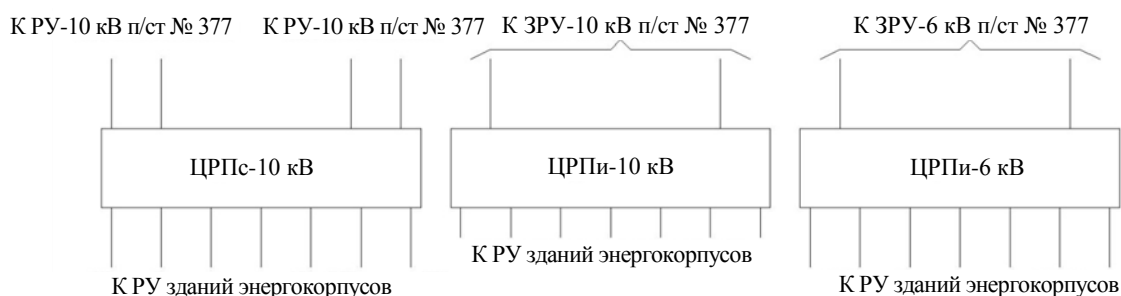


Рис. 4. Центральные распределительные устройства ЦРП-10 и ЦРП-6 кВ

ЦРП 215-10 и ЦРП 215-6 кВ — центральные распределительные пункты 10 и 6 кВ расположены в пристройке к энергокорпусу и подразделяются на ЦРП спокойных и импульсных нагрузок. ЦРПС-10 кВ рассчитано на мощность 55 МВА; ЦРПи-10 кВ — на 55 МВА; ЦРПи-6 кВ — на 35 МВА.

Комплекс электромашинных агрегатов (КЭМА). КЭМА предназначен для импульсного энергообеспечения обмоток тороидального поля (ТП), индуктора и др. установки ТСП без создания импульсных нагрузок на внешние сети электроснабжения Мосэнерго. Комплекс электромашинных агрегатов является ядром энергокомплекса и прошел сложный и противоречивый путь проектирования и создания. Первый вариант предложений ВНИИэлектромаш (директор академик И.А. Глебов) состоял из трёхмашинного агрегата с разгонным асинхронным двигателем с фазным ротором ФАЗМ-4000/6000 мощностью 4000 кВА с пускорегулирующей аппаратурой, маховика М60/3000 весом 80 т и синхронного генератора мощностью

200 МВА. Этот агрегат был спроектирован для работы на металлическом фундаменте. Как показали первые пробные пуски в 1985 г., такой агрегат по ряду характеристик имел высокий уровень вибраций, невозможность стабильного всплытия валопровода и др., испытаний не выдержал и был реконструирован, о чём более подробно будет сказано в разделе «История создания энергокомплекса». Поэтому коллективом отдела импульсной энергетики (ОИЭ ФИАЭ) (начальник отдела Э.А. Азизов, начальник лаборатории Р.П. Васильев) была предложена схема двухмашинного агрегата с пуском от преобразователя частоты.

Номинальная мощность КЭМА ~800 МВт, запасаемая энергия ~4000 МДж. Спроектированы четыре агрегата (ЭМА). Испытаны три агрегата, фотографии двух из них показаны на рис. 5, 6.



Рис. 5. Электромашинный агрегат ТКД-200 и пультовая установка Т-11М ТКД-200 в энергокорпусе

Каждый электромашинный агрегат ТКД-200 представляет собой электромашинный накопитель энергии (ЭМНЭ) и состоит из синхронного генератора переменного тока типа ТКД-200-2УЗ с независимой системой тиристорного возбуждения

СТН-1250-1600-4-УХЛ, маховика М60/3000 УЗ. Для привода может быть использован асинхронный двигатель с фазным ротором ФАЗМ-4000/6000 с пускорегулирующей аппаратурой. Для надёжного и быстрого пуска с большей потребляемой мощностью в процессе строительства ТСП по инициативе коллектива ОИЭ создан привод на основе статического преобразователя частоты. Агрегат снабжён системами охлаждения, управления и защиты, маслородохохозяйством, энергохозяйством (генераторное РУ, КРУ-6 кВ, КРУ-10 кВ, КТП, аккумуляторная, компрессорная). Однолинейная схема питания электромашинных агрегатов показана на рис. 7.

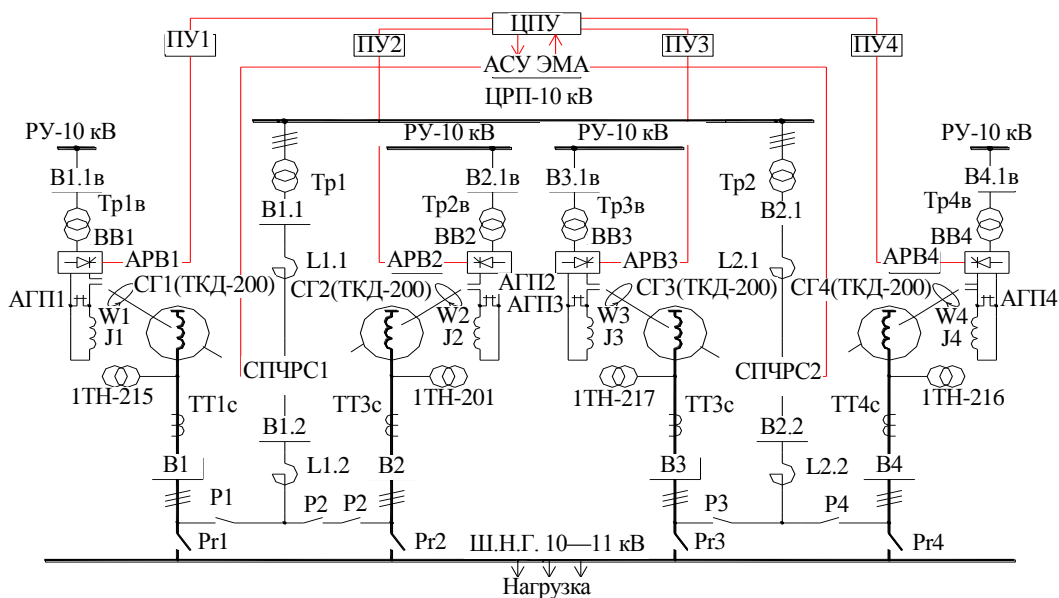


Рис. 7. Однолинейная схема комплекса электромашинных агрегатов: СГ1—СГ4 — электромашинные агрегаты типа ТКД-200; СПЧРС1, СПЧРС2 — преобразователи частоты; ВВ1—ВВ4 — выпрямители в цепи возбуждения; Тр1в—Тр4в — согласующие трансформаторы в цепи возбуждения; Тр1, Тр2 — трансформаторы питания преобразователей частоты; АРВ1—АРВ4 — автоматические регуляторы возбуждения; АГП1—АГП4 — автоматы гашения поля; РУ-10 кВ — распределительное устройство 10 кВ; ЦРП-10 кВ — центральное распределительное устройство 10 кВ; Ш.Н.Г. 10—11 кВ — сборные шины генераторного распределительного устройства 10—11 кВ; В1—В4 — генераторные воздушные выключатели; В1.1в—В4.1в — масляные выключатели в цепи возбуждения; 1ТН-201—1ТН-217 — трансформаторы тока в генераторной цепи; L1.1—L2.2 — токоограничивающие реакторы; АСУ ЭМА — система управления пуском агрегата; ПУ1—ПУ4 — пульты (местные) управления агрегатами; ЦПУ — центральный пульт управления

На рис. 8 показана фотография комплектного распределительного устройства для питания электромашиного агрегата ТКД-200.



Рис. 8. Комплектное распределительное устройство для питания электромашиного агрегата ТКД-200

Как уже было показано, КЭМА и источник импульсного питания (ИИП) в целом имеют сложную архитектуру своих основных силовых элементов. Составной частью этой архитектуры является подсистема так называемых «собственных нужд». По аналогии с собственными нуждами промышленных (например, тепловых) электростанций следует назвать подсистемы охлаждения (воздушное и водяное) генераторов, маховиков, тиристорных агрегатов и др. (теплообменники, насосы и др.), подсистему смазки подшипников электромашиных агрегатов, подсистему приготовления и снабжения ИИП сжатым воздухом до 20 атм. (компрессоры, ресиверы и др.). Все эти подсистемы собственных нужд могут занимать в энергоресурсах до 10%.

На рис. 9 показана система маслоснабжения оборудования КЭМА.

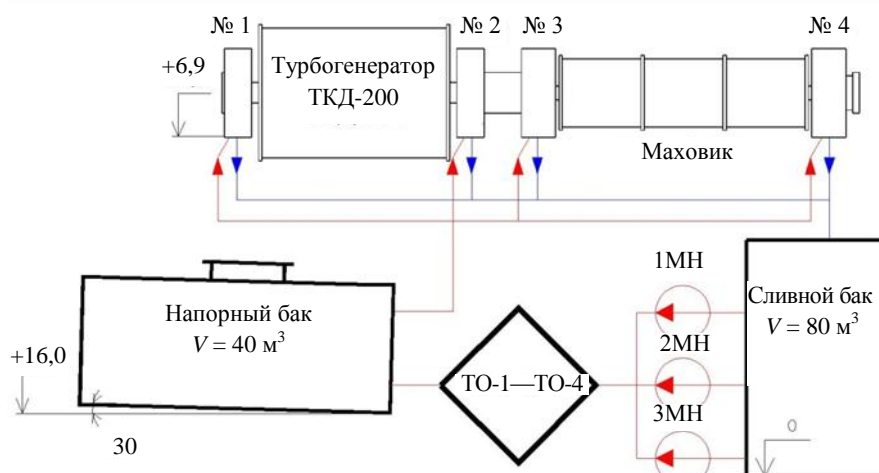


Рис. 9. Схема маслоснабжения оборудования КЭМА: — — напорный трубопровод масла; — — сливной трубопровод масла; 1МН—3МН — маслонасосы; ТО-1—ТО-4 — теплообменники

Технические характеристики КЭМА. Генератор. Генератор ТКД-200-2УЗ [2] разработан на основе трёхфазного синхронного турбогенератора и предназначен для выработки электроэнергии в импульсном режиме. Номинальное напряжение обмотки статора 10,5 кВ, номинальная частота вращения 3000 мин⁻¹. При зарядке индуктивного накопителя генератор допускает работу со следующими параметрами в конце импульса: активная мощность 215 МВт, полная мощность 239 МВА, ток статора 11,6 кА,

напряжение статора 10,5 кВ, коэффициент мощности 0,9, частота вращения 2100 мин⁻¹. Продолжительность набора нагрузки 5 с, снятия нагрузки не более 0,4 с. Частота повторения таких импульсов 1 раз в 4 ч. Габаритные размеры турбогенератора 6570×4450×4450 (здесь и далее размеры указаны в миллиметрах). Транспортная масса статора с газоохладителями и щитами 134 000 кг, масса ротора 31 800 кг.

Маховик. Маховик М-60/3000 УЗ [3] выполнен в виде специального устройства с использованием в качестве механического накопителя энергии ротора турбогенератора 800 МВт и имеет следующие параметры: номинальная частота вращения 3000 мин⁻¹, расчётный динамический момент инерции 16,25 т·м², расчётный маховой момент 65 т·м², температура входящей охлаждающей воды в воздухоохладителе не более 33 °С при расходе 200 м³/ч. Маховик рассчитан на импульсные нагрузки согласно техническим условиям на генератор типа ТКД-200-2УЗ, при этом вибрации подшипников маховика при номинальной частоте вращения не должны превышать 30 мкм. Маховик допускает превышение частоты вращения на 20% сверх номинальной в течение 2 мин. Средний срок службы 25 лет. Средняя наработка на отказ не менее 3000 импульсов нагрузки. Габаритные размеры маховика 8650×2080×2120. Масса вала маховика 80 750 кг.

Система возбуждения. Система статическая тиристорная независимого возбуждения ТСН-250-1600-4УХЛ4 [4] предназначена для обеспечения возбуждения турбогенератора ТКД-200-2УЗ. При работе в повторно-кратковременных режимах по заданной программе она обеспечивает следующие режимы работы турбогенератора:

- пуск, начальное возбуждение и включение генераторов на холостом ходу способом самосинхронизации, возможна работа системы возбуждения в режиме пуска генератора от преобразователя частоты;
- режим холостого хода при напряжении статора генератора от 0 до 1,1 от номинального;
- регулировки тока возбуждения по отклонению производной напряжения генератора, по отклонению производной частоты генератора, по производной тока ротора;
- режимы различной скважности импульсов нагрузки в течение заданного времени;
- режимы формирования возбуждения по напряжению и развозбуждения с заданной кратностью и длительностью;
- гашение поля генератора при действии защит переводом преобразователя в инверторный режим;
- гашение поля в аварийных режимах автоматом гашения поля;
- автоматическое ограничение максимального тока ротора в режимах форсирования;
- регулирование тока возбуждения и напряжения возбуждения таким образом, чтобы ток и напряжение на выходе генератора не превышали соответственно значений 16 000 А и 11 600 В;
- поддержание предельного значения напряжения на статоре генератора с линейной зависимостью этого напряжения от частоты генератора в режимах от 10 500 В при 50 Гц до 8600 В при 35 Гц, от 10 500 В при 50 Гц до 9300 В при 47,5 Гц;
- деление тока нагрузки между параллельно работающими генераторами в режиме параллельной работы четырёх или двух генераторов в среднем за время режима обеспечивается с точностью 5%.

Система имеет следующие электрические параметры:

- номинальное выпрямленное напряжение 250 В;
- выпрямленное напряжение возбуждения, соответствующее 110% номинального напряжения генератора на холостом ходу 90 В;
- номинальный выпрямленный ток 1600 А;
- выпрямленный ток возбуждения, соответствующий 110% номинального напряжения генератора на холостом ходу 740 А;
- номинальная мощность 400 кВт;
- кратность форсировки по напряжению и току по отношению к номинальным значениям 4 о.е.;
- форсировочная мощность 6400 кВт;
- максимальная длительность форсировки 20 с;
- выпрямленный ток в импульсном режиме в течение 5 с составляет 4550 А;
- частота повторения импульсов один раз в 4 ч;
- время достижения 95% предельного напряжения от момента установленного изменения напряжения на входе АРВ менее 0,07 с.

В состав системы возбуждения входят преобразователь типа КУВ 320×8/22×2×6 АМ, габаритные размеры 4030×9000×2660, масса 2450 кг, теплообменник типа ТВКШФ-80-УХЛ4, габаритные размеры 200×800×3200, масса 1235 кг, трансформатор системы возбуждения типа ТСЗП-2500/15, габаритные размеры 2010×1225×2760, масса 7100 кг, панель ПСВ-31АУ4, сопротивление к разряднику ротора СН-28УЗ, автоматический регулятор возбуждения типа АРВ-СП2.

Система управления и защиты КЭМА. КЭМА оборудован системой управления и системой защит, действующих на отключение выключателей генераторов, двигателей и систем возбуждения с соответствующей сигнализацией об аварии. Далее приведём перечень защит одного электромашинного агрегата и их технические данные.

От внутренних коротких замыканий статорной обмотки генератора предусмотрены продольная и поперечная дифференциальная защиты. В первом случае датчик — трансформатор тока ТШЛ 20Б-111, расчётный ток срабатывания защиты $I_{сз} = 500$ А, ток срабатывания реле $I_{ср} = 0,139$ А, коэффициент чувствительности защиты $K_{ч} = 2,7$. Во втором случае датчик — трансформатор тока ТШЛ 20Б-1, $I_{сз} = 250$ А, $I_{ср} = 0,125$ А. Максимальная токовая защита статора настраивается всякий раз перед проведением эксперимента в зависимости от вида испытания. Применяется трансформатор тока ТШЛ 20Б-Ш, расчётный ток 16 200 А. Защита от двойного замыкания на землю обмотки ротора осуществляется комплектом КЗР-2. Для реализации фильтровой токовой защиты устанавливаются трансформатор РТФ-1М и реле тока отрицательной последовательности, $I_n = 5$ А, $U_B = 220$ В.

Ограничение размеров аварии и предотвращение выгорания обмотки и стали ротора при коротком замыкании достигаются отключением генератора выключателем ВВГ-20УЗ от внешней сети и гашением магнитного поля возбуждения, что приводит к уменьшению ЭДС генератора и гашению дуги. Необходимые переключения в цепи возбуждения осуществляются автоматом гашения поля АГП-30-32. Трансформатор ТСЭП-2500/15ВУЗ для тиристорного возбудителя ударного генератора имеет следующие защиты:

- токовая отсечка с трансформатором тока ТВЛМ 10/100/5, $I_{сз} = 1390$ А, $K_{ч} = 6,2$;
- максимальная токовая отсечка с трансформатором тока ТВЛМ 10/100/5, $I_{сз} = 600$ А, $K_{ч} = 1,55$;
- защита от замыкания на землю с трансформатором ТЗЛМ с реле РТ-40/6, $I_{уст} = 4$ А.

В системе возбуждения предусмотрен комплект защитных устройств в соответствии с ПУЭ, включая разрядники РА-21-2 с добавочными сопротивлениями. Тиристоры системы возбуждения защищены быстродействующими предохранителями ПП 57.

Преобразователь частоты. В энергокомплекс входят два агрегата СПЧРС мощностью по 10 МВА каждый при напряжении 10 кВ и регулируемой частоте 0,05—50 Гц. Преобразователь частоты СПЧРС-15750/630 УХЛ [5] предназначен для питания ТКД-200 в режиме синхронного двигателя. Он обеспечивает главный пуск и синхронизацию параллельно работающих агрегатов, рекуперативное торможение синхронных генераторов. Основные технические данные:

- номинальная выходная мощность 17 160 кВА;
- номинальный выходной ток 630 А, номинальное выходное напряжение 15 750 В;
- частота питающей сети 50 Гц;
- напряжение питающей сети до 15 750 В;
- потребляемая из сети мощность в номинальном режиме не более 17 400 кВА;
- номинальный диапазон изменения выходной частоты 0,1—50 Гц;
- величина отношения выходного напряжения (действующее значение основной гармоники) к входному в диапазоне регулирования выходной частоты поддерживается постоянной;
- точность поддержания выходной частоты в диапазоне регулирования при длительных отклонениях напряжения сети 5%, частоты сети 2,5%, нагрузки 15% составляет 1,5 Гц;
- коэффициент мощности на входе преобразователя в номинальном режиме 0,85;
- коэффициент полезного действия не менее 97%;
- перегрузки по току в течение 5 с 1260 А, в течение 10 с 880 А, в течение 5 мин 760 А;
- охлаждение преобразователя воздушное, принудительное, общая масса шкафов преобразователя не более 12 380 кг, 90%-ный срок службы 10 лет. Кроме того, в состав преобразователя входят коммутирующая аппаратура на входе и выходе в составе выключателей ВКЭУ10, токоограничивающие реакторы в сети переменного тока РБ-1000-0,56, четыре сглаживающих реактора ТРОС-5000 в звене постоянного тока общей индуктивностью $4,25 \times 10^{-3}$ Гн.

На рис. 10, 11 показаны фотографии основного силового оборудования СПЧРС.

Комплекс тиристорных агрегатов. КТА позволяет в гибких перестраиваемых режимах осуществлять согласование параметров КЭМА с активно-индуктивной нагрузкой и может работать в выпрямительных и инверторных режимах [6]. Общая мощность агрегатов 900 МВА. Диапазон коммутируемых токов до 160 кА при напряжении до 4 кВ.

Назначение. Тиристорные агрегаты предназначены для питания активно-индуктивной нагрузки при следующих условиях эксплуатации:

- исполнение УХЛ категории 4 при температуре окружающей среды от +1 до +40 °С, относительная влажность не более 80% при температуре +25 °С, высота над уровнем моря до 1000 м;
- место размещения и допустимые вибрации должны соответствовать группе условий эксплуатации М6;
- по содержанию коррозионно-активных агентов допускается работа в атмосфере типа II, содержание нетокопроводящей пыли в помещении не более 0,7 мг/м³;
- уровень проникающей радиации должен быть не выше естественного фона.



Рис. 10. Разделительный трансформатор 10 МВА



Рис. 11. Силовые полупроводниковые выпрямители с использованием тиристоров с воздушным охлаждением

Технические данные. Состав тиристорных агрегатов и их исполнение по току и напряжению приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. **Технические данные**

Тип агрегата	Выпрямленный ток, А	Выпрямленное напряжение, В	Время импульса, с	Время паузы, мин
ТЕ-9-И-160000/4800 УХЛ4	160 000	4800	5	240
	7000	4800	2	10
ТЕ-9-И-150000/1000 УХЛ4	150 000	1000	4	240
ТЕ-9-И-35000/1200 УХЛ4	35 000	1200	1	10
ТЕ-9-И-16000/800 УХЛ4	16 000	800	1	10
ТЕ-9-И-10000/600 УХЛ4	10 000	600	1	10
ТЕ-9-И-40000/1050 УХЛ4	40 000	1050	5	240
ТЕ-9-И-60000/1000 УХЛ4	60 000	1000	2	10

Примечание: условные обозначения типа агрегата: 4 — категория размещения; УХЛ — климатическое исполнение; 4800 — выпрямленное напряжение в вольтах; 16000 — выпрямленный ток в амперах; И — импульсный режим; 9 — класс перегрузок; Е — естественное охлаждение; Т — тиристорный агрегат. Агрегаты выполняются по шестипульсовой схеме выпрямления.

Питание агрегатов осуществляется от турбогенераторов типа ТКД-200 с маховиками. Номинальное напряжение генератора 10,5 кВ. За время рабочего импульса частота генератора изменяется от 49 до 34,5 Гц. Агрегаты обеспечивают работу как в выпрямительном, так и в инверторном режиме. Охлаждение агрегатов воздушное. Питание собственных нужд агрегатов от трёхфазной сети 380 В, частота 50 Гц с изменением напряжения от плюс 10% до минус 15% от номинального значения $U_{ном}$. Регулирование выпрямленного напряжения плавное от 0 до $1,0 U_{ном}$.

Система фазового управления обеспечивает полный диапазон регулирования при изменении сигнала управления от 0 до ± 5 В и токе до 1 мА. При отсутствии сигнала управления агрегат может находиться в инверторном режиме с углом управления 120 ± 2 электрических градусов. Допустимая асимметрия управляющих импульсов не должна превышать ± 3 электрических градусов во всём диапазоне регулирования.

Система фазового управления должна обеспечивать работоспособность при колебаниях напряжения собственных нужд от $0,85$ до $1,1 \cdot U_{ном}$, при искажении формы опорного напряжения коммутационными провалами площадью 100% на электрический градус, при изменении частоты опорного напряжения от 50 до 34 Гц. Система управления обеспечивает возможность снятия и подачи управляющих импульсов за время не более 100 мкс.

Агрегаты имеют два вида сигнализации: внешнюю и внутреннюю. Внешняя сигнализация должна выдавать следующие сигналы:

- о готовности агрегата к работе при сборке блокировок;
- предупреждающий о выходе из строя одного предохранителя в любом из плеч силовой схемы;

- аварийный о выходе из строя двух или более предохранителей в любом из плеч силовой схемы;
- об аварийном состоянии агрегата.

Выходные сигналы системы внешней сигнализации выводятся на клеммники тиристорного агрегата. Система внутренней сигнализации включает в себя сигналы о:

- состоянии коммутационных аппаратов;
- наличии силового, оперативного и опорного напряжений;
- готовности агрегата к работе;
- наличии управляющих импульсов;
- неисправности системы фазового управления;
- неисправности узла усиления управляющих импульсов вентильной секции;
- сгорании силовых предохранителей и предохранителей узла защиты от перенапряжений;
- аварийном переводе агрегата в инверторный режим.

Агрегаты допускают завершение рабочего цикла без дальнейшего развития аварии в случае отказа одной из параллельных ветвей в каждой вентильной секции.

Состав изделий. В состав тиристорных агрегатов входят вентильные секции, состоящие из трёх тиристорных шкафов и шкафа ввода силовой ошиновки постоянного тока, шкафы управления, содержащие блоки системы управления, защиты и сигнализации, коммутационную и вспомогательную аппаратуру, силовые трансформаторы.

На рис. 12—14 показаны фотографии основного силового оборудования тиристорных агрегатов.



Рис. 12. Трансформатор мощностью 80 МВА для питания двух тиристорных агрегатов



Рис. 13. Шкафы тиристорных агрегатов питания обмотки тороидального поля



Рис. 14. Разъединитель 10 кВ, 5000 А и измерительный трансформатор тока

Комплекс ёмкостных накопителей энергии. КЕНЭ — комплекс ёмкостных накопителей энергии общей энергоёмкостью 25 МДж включает в себя шесть батарей конденсаторов, технические данные которых приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Технические данные комплекса ёмкостных накопителей энергии

Установка	Обозначение	Ёмкость, Ф	Номинальное напряжение, кВ	Запасаемая энергия, МДж
ТСП	ЕНЭ1 ор	0,9	2,9	3,78
	ЕНЭ2 ои	0,15	10	7,50
	ЕНЭ3 осж	0,3	5	3,75
Т-11М	ЕНЭ4 отп	0,5	5	6,25
	ЕНЭ5 ои	0,15	5	1,88
	ЕНЭ6 ор	0,15	5	1,88

Система контроля, регистрации, управления и защиты. В последнее время в ОФТР разрабатывается система контроля, регистрации, управления и защиты (СКРУЗ) для электромашинных агрегатов ТКД-200. В состав СКРУЗ в качестве подсистемы входит система мониторинга предаварийного состояния оборудования агрегата (СМПС), построенная на аппаратных и программных средствах фирмы L-CARD. СМПС осуществляет непрерывный контроль за параметрами агрегата — температурами, электрическими охлаждающих сред (вода, масло) и другими, вышедшими за допустимые пределы, и состоянием коммутационной аппаратуры с фиксацией времени событий и числа оборотов, выдачу сигнала типа «сухой контакт» для использования в системе защиты автоматически и (или) по решению руководителя пусков.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА

Как указывалось во Введении, энергокомплекс был создан по постановлению ЦК КПСС и Совета Министров СССР о сооружении комплекса ТСП-Токамак от 11 октября 1978 г. Выходу этого постановления предшествовала в течение трёх лет (1976—1978 гг.) напряжённая работа по подготовке исходных данных сотрудниками ИАЭ им. И.В. Курчатова, ФИАЭ им. И.В. Курчатова (г. Троицк) и др.

В 1979 г. была выпущена основная документация по электромашинному агрегату по схеме, предложенной ВНИИЭлектромаш, в составе двигатель—маховик—генератор: технические условия, паспорта и др., и в этом же году заключён договор с ЛПО «Электросила» об изготовлении (договор № 348/80).

В течение 1980 г. было разработано и утверждено задание на разработку технико-экономического обоснования (ТЭО) комплекса установки ТСП.

С 1980 г. начались работы по определению состава электромашинного агрегата, разработка механических и электрических схем соединений узлов и определение предприятий-изготовителей оборудования. Генпроектировщиком был определён ГСПИ (Государственный специализированный проектный институт), подобраны проектные организации по отдельным системам и узлам и начата разработка проектной документации.

В 1981 г. были изготовлены электромашинные агрегаты ТКД-200 (генератор + маховик + двигатель) № 1 и 2 комплектно по договору № 354/80 от 15 декабря 1979 г. и № 354/81 от 27 июня 1980 г. предприятием ЛПО «Электросила». Указанное оборудование было оставлено на ответственное хранение на предприятии-изготовителе.

В 1982 г. было разработано и утверждено «Задание на разработку проекта и рабочей документации комплекса установки ТСП (Т-14)». В нём для ускоренного функционирования основных систем установки ТСП в соответствии с техническим решением, утверждённым Министром среднего машиностроения СССР от 12 января 1978 г. исх. № 57, были разработаны пусковые комплексы с разбивкой в 1984, 1986, 1988 гг.

В 1983 г. закончен монтаж металлического фундамента по проекту «Энергосетьпроект» и было обращение руководителя предприятия В.Д. Письменного к заместителю руководителя предприятия ЛПО «Электросила» В.И. Анемподистову согласовать чертежи металлического фундамента и выпустить чертежи фундаментных плит для металлического фундамента.

В 1982, 1983 гг. произведены поставка и монтаж электромашинного агрегата на металлическом фундаменте. В 1984 г. монтаж агрегата был завершён и подписаны акты о монтаже агрегатов № 1 от 15 июня и № 2 от 21 мая 1984 г.

Перед разработкой программы пробных пусков электромашинного агрегата ТКД-200 был направлен запрос в ГСПИ и ГрузНИИГС о выдаче заключения о статических и динамических характеристиках фундамента в соответствии с «Техническими требованиями на проектирование фундамента турбоагрегата мощностью 135 тыс. кВт и более при числе оборотов 3000 в мин.», утверждёнными Министром энергетического машиностроения СССР В.В. Кротовым и Министром энергетики и электрификации СССР П.С. Непорожним 04 мая 1976 г.

21 мая 1984 г. составлен «Формуляр монтажных работ», а к 25 декабря 1984 г. в ФИАЭ им. И.В. Курчатова была разработана программа включения систем электромашинного агрегата и согласована с предприятиями — разработчиками оборудования.

В начале 1985 г. проводились пробные пуски электромашинного агрегата. В процессе пробных пусков и испытаний фундамента отмечен высокий уровень вибрации подшипников и других элементов агрегата (выше максимально допустимых). Как уже было сказано, создание энергокомплекса и его наиболее энергоёмкой части — комплекса электромашинных агрегатов (КЭМА) потребовало значительных изменений и доработок первоначального проекта.

В нём не были учтены многие важные аспекты работы многомашинного агрегата с длинным недостаточно жёстким валопроводом: высокий уровень вибраций, ненадёжное состояние при разгоне критических частот узлов (генератора и маховика), неравномерное всплытие валов в подшипниках агрегата, ненадёжная система смазки вкладышей подшипников агрегата и др. Для оперативного решения этих вопросов потребовалась напряжённая и творческая работа коллектива ОИЭ и энергофизической лаборатории.

В результате предпринятых действий была привлечена к работе по исследованиям комплекса электромашинных агрегатов ведущая в стране (СССР) организация по разработке и созданию тяжёлого энергетического оборудования для отечественных и зарубежных электростанций — Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (НПО ЦКТИ). При тесном сотрудничестве с коллективом ОИЭ ФИАЭ в течение 1985—1987 гг. НПО ЦКТИ провело цикл экспериментально-расчётных исследований системы трёхмашинный агрегат с генератором ТКД-200—фундамент—основание.

История создания КЭМА такова.

Первоначально агрегат был смонтирован в одном из помещений электрофизической установки на стальном фундаменте, разработанном специалистами ГрузНИИГС и Энергосетьпроектом. Неоднократные попытки вывести головной агрегат на холостой ход с частотой вращения валопровода 50 с^{-1} не увенчались успехом из-за недопустимо высокой вибрации системы агрегат—фундамент на пусковых режимах.

Из-за невозможности эксплуатации агрегата ФИАЭ в июне 1985 г. обратился к НПО ЦКТИ с просьбой провести исследования системы трёхмашинный агрегат с генератором ТКД-200—стальной фундамент—основание и разработать рекомендации по обеспечению вибрационной надёжности системы на пусковых режимах. Экспериментальная проверка динамической надёжности трёхмашинного агрегата осуществлялась поэтапно.

На первом этапе определялись динамические податливости опор валопровода, необходимые для оценки качества опор (значения динамических податливостей не должны превосходить установленных величин), разработки, в случае необходимости, мероприятий по повышению динамической жёсткости опор, выполнения уточнённых расчётов вынужденных колебаний системы валопровод—смазочный слой—опоры.

На втором этапе определялись вибрационные характеристики агрегата на пусковых режимах. Однако при пуске 27 августа 1987 г. трёхмашинного агрегата, собранного по технической документации ЛПО «Электросила» и завода «Сибэлектротяжмаш», из-за интенсивной вибрации подшипниковых опор двигателя, задеваний ротора двигателя за статор в районе масляных и воздушных уплотнений, обрыва двух болтов, крепящих крышку подшипника № 6 к корпусу, скорость вращения поднять выше 1780 мин^{-1} не удалось. При выбеге вибрация всех подшипников агрегата была выше, чем при пуске, что указывает на разбалансировку валопровода.

При пусках агрегата в период с 16 по 21 октября 1987 г. перейти через резонансную зону при частотах более 1400 мин^{-1} не удалось из-за недопустимо высокой вибрации корпусов подшипников двигателя.

Установлено, что динамическая податливость опор роторов генератора и маховика агрегата, смонтированного на стальном фундаменте, в 5—20 раз превышала величины, рекомендуемые на основе многолетнего опыта проектирования и испытаний стационарных энергетических турбоагрегатов для ГРЭС и АЭС. Вследствие высокой динамической податливости опор (до 80 мкм/тс роторов генератора и маховика и 300 мкм/тс ротора двигателя) надёжная эксплуатация агрегата на стальном фундаменте оказалась невозможной.

Было рекомендовано реконструировать фундамент. По результатам испытаний в ФИАЭ было принято решение о замене стального фундамента железобетонным. С этой целью была привлечена проектная организация Ленинградское отделение «Теплоэлектропроект» (ЛОТЭП). Как показали результаты контрольных испытаний, замена стального фундамента железобетонным позволила достичь значений динамических податливостей опор роторов генератора и маховика, удовлетворяющих рекомендациям РТМ 108.021.01-82 Минтяжмаша. Расчётами собственных и вынужденных колебаний валопровода трёхмашинного агрегата на опорах с подшипниками скольжения определено влияние динамических характеристик опор № 1—6 и способа опирания ротора двигателя на положение собственных и резонансных частот и интенсивность резонансов при обычно имеющей место неуравновешенности роторов.

В связи с указанными обстоятельствами сотрудниками ОИЭ ФИАЭ было предложено изменить схему пуска электромашинного агрегата ТКД-200. Взамен пуска и разгона от асинхронного двигателя начальником отдела Э.А. Азизовым и начальником лаборатории Р.П. Васильевым была предложена схема пуска от синхронного преобразователя частоты и привлечён ряд организаций для разработки, монтажа и наладки этой схемы пуска. На Таллинском электротехническом заводе был изготовлен преобразователь

частоты СПЧРС-17500, характеристики которого необходимо было согласовать с параметрами генератора ТКД-200 и режимами работы установки разгон—наброс нагрузки (активно-индуктивной)—торможение—снова разгон до 3000 мин⁻¹. Все эти режимы было решено отработать на физической модели, которая была разработана и установлена в одном из энергокорпусов (см. рис. 2). В 1988 г. в ФИАЭ были разработаны условия пуска и программа по включению ТКД-200 тиристорным преобразователем частоты СПЧРС-17500, найдены специалисты и привлечена организация по разработке системы управления ВНИИэлектропривод.

Физическая модель для испытаний преобразователя СПЧРС-15750/630 и исследования процессов пуска агрегата ТКД-200 установки ТСП предназначена для отработки следующих режимов работы частотного электропривода агрегата: пуск синхронной машины в режиме начального разворота до частоты вращения 5—10% от номинальной, частотный пуск до 50—60 Гц при ручном или автоматическом регулировании темпа разгона, торможение синхронной машины в режиме рекуперации из режима регулирования частоты вращения или выбега, отключение преобразователя и синхронной машины по срабатыванию технологических и электрических защит как электромашинного агрегата, так и самого преобразователя частоты, отработку всех перечисленных режимов при управлении с дистанционного пульта.

Физическая модель включает в себя синхронную машину ЕСС5-81 мощностью 25 кВА, 400 В, преобразователь частоты СПЧРС-15750/630 с реакторным оборудованием по штатной схеме, согласующие трансформаторы напряжения и тока и управляемые контакторы. Питание преобразователя частоты осуществляется напряжением 380 В. Вместе с тем модель полностью эквивалентна для системы управления преобразователем с напряжением питания 10 кВ. Проведение работ при низком напряжении существенно упрощает наладку, испытания и снижает вероятность возникновения аварийной ситуации.

При работе преобразователя в составе физической модели диапазон регулирования частоты вращения генератора ЕСС-5-81-4У2 составил 0,05—60 Гц, выходное напряжение изменялось в диапазоне 0—260 В, максимальный ток на входе и выходе преобразователя 20 А. При этом были отработаны следующие режимы работы: пуск двигателя в заданном направлении вращения с прерыванием тока статора двигателя до выхода на режим естественной коммутации, переход на режим естественной коммутации инвертором тока статора двигателя его ЭДС, частотный разгон двигателя с заданным или максимально возможным по току преобразователя темпом до частоты вращения 50—60 Гц, стабилизация частоты вращения двигателя на любой частоте в диапазоне от 2—3 до 60 Гц, рекуперативное торможение двигателя до его полной остановки с любой частоты вращения в диапазоне 0,05—60 Гц.

Кроме того, при работе преобразователя в составе физической модели отработаны режимы безаварийного отключения преобразователя по сигналам следующих защит:

- посадка напряжения питания собственных нужд преобразователя (380 В, 50 Гц) ниже уровня 0,8 номинального напряжения;
- посадка напряжения силового питания преобразователя (для физической модели 380 В, 50 Гц) ниже уровня 0,8 номинального напряжения;
- двойная перегрузка по току — релейная и быстродействующая;
- перегрузка по току на 20% в течение 5 мин, 50% в течение 40 с и 90% в течение 5 с.

Физическая модель, кроме отработки перечисленных режимов, позволила разработать и внедрить технические решения по повышению надёжности и помехоустойчивости работы систем автоматики и управления привода. Дополнительно выполнены разработка и изготовление блока для контроля состояния тиристорных в высоковольтных блоках с возможностью выявления одного или двух пробитых тиристорных в любом из блоков до подачи силового напряжения на преобразователь (по включению только напряжения питания собственных нужд). В процессе отработки указанных режимов работы проведено около 500 включений преобразователя в составе физической модели. Проект и рабочую документацию схемы пуска совместно разработали Харьковское отделение ГПИТЭП и Укрگیпроэлектро (протоколы Л-896-20(ЧП)-215 с участием НПО ЦКТИ).

К 1989 г. фундаменты в трёх зданиях энергокорпусов были переделаны и НПО ЦКТИ провело их испытания. В соответствии с этим в ТРИНИТИ (ФИАЭ) было принято решение о проведении приёмочных виброиспытаний вводимых в эксплуатацию электромашинных агрегатов, и НПО ЦКТИ в течение 1991, 1992 гг. провело все эти испытания для двухмашинного агрегата в составе генератора ТКД-200 и маховика М-60.

Были решены проблемы, связанные с повышенными осевыми колебаниями валопроводов, особенно в третьем здании энергокорпусов. Были также доработаны вкладыши подшипника № 4 с увеличением эллиптичности расточки, сделан двухсторонний подвод масла. В результате виброскорости корпусов подшипников не превосходили 4 мм/с, что ниже допустимых по ГОСТу 533-85 5,5 мм/с. Следующим сложным этапом работ по созданию энергокомплекса была разработка программы пуска двух и трёх агрегатов одновременно при условии их работы от преобразователя частоты СПЧРС-15700. Было проведено математическое исследование режимов разгона и наброса нагрузки. В исследованиях участвовали специалисты МЭИ. Затем был проведён успешный синхронный пуск двух электромашинных агрегатов ТКД-200 с питанием от одного СПЧРС-1750, установленного в здании энергокорпуса (см. рис. 2.) Среднее время разгона 14 мин от 0 до 3000 мин⁻¹, работа происходила синхронно и стабильно.

16 июня и 11 и июля 1990 г. были проведены работы по испытаниям всего комплекса оборудования источника питания энергокомплекса (два ТКД-200 + четыре тиристорных агрегата). В нагрузке — обмотка тороидального поля ТСП — был достигнут ток до 80 кА.

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Мощные технические средства энергокомплекса в процессе своего создания и функционирования в режимах питания установки ТСП прошли значительный путь обновления и перестройки. Был проведён большой объём расчётно-теоретических работ по оценке переходных процессов, нестандартных режимов, разработана методика по определению токов в активно-индуктивной нагрузке и токов короткого замыкания (к.з.) [7—9]. На рис. 15 показана эквивалентная схема замещения для расчётов тока нагрузки и к.з. для системы питания обмоток создания магнитных полей установки ТСП, представленной на рис. 16 [9].

В ОФТР разрабатывается гибридная схема источника питания и начаты её испытания с использованием силового оборудования установки ТСП для ряда установок и стендов: тороидального поля установки Т-11М, схемы гибридных испытаний (СГИ), стенда испытательной коммутационной аппаратуры. Разработанная электрическая схема питания и контроля от сгруппированного в два блока оборудования энергокомплекса (ИЭК) позволяет в гибких перестраиваемых режимах запитывать три электрофизические установки: Т-11М, СГИ и СИК [10]. Анализ технических характеристик энергокомплекса ОФТР позволяет наметить область его возможного применения по следующим направлениям:

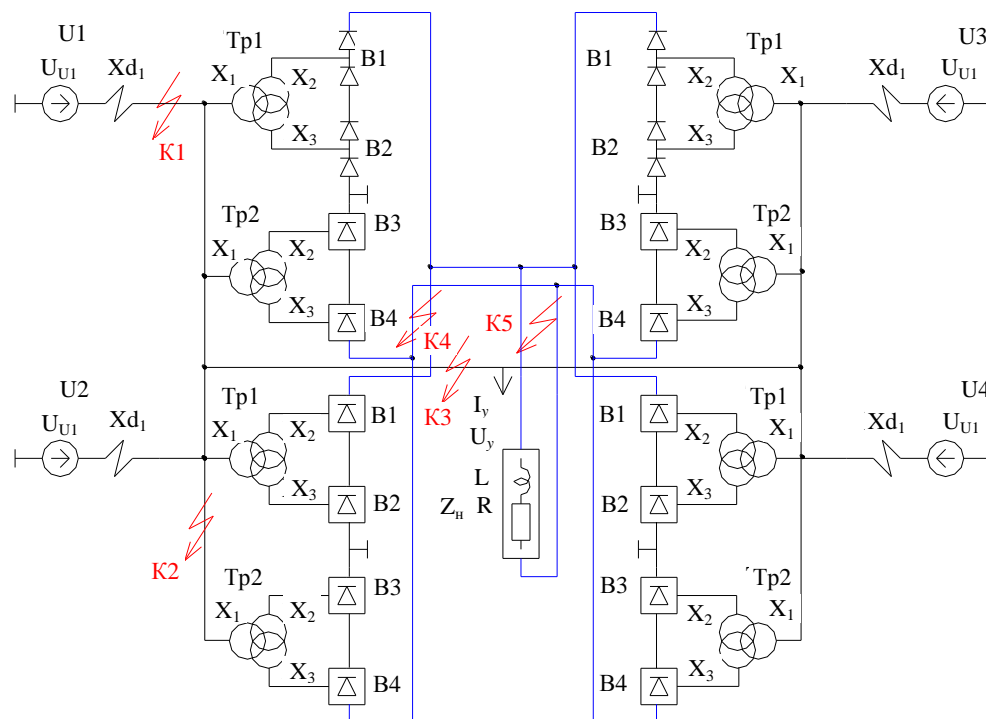


Рис. 15. Эквивалентная схема замещения: X_{d1} — реактивное сопротивление генераторов по продольной оси; $X_1—X_3$ — реактивное сопротивление трансформаторов, входящих в расчётную схему замещения; $Z_{н}$, R , L — параметры нагрузки; $K_1—K_3$ — точки к.з. в цепях переменного тока; K_4, K_5 — точки к.з. в цепях постоянного тока

— применение энергокомплекса для питания электрофизических установок: установок типа токамак ТСП, Т-11М и др., установок класса Ангара—Байкал [11] с использованием индуктивных накопителей (многокаскадных), мощных лазеров, ускорителей макротел (рельсотронов);

— получение сильных магнитных полей и др.;

— испытания мощной коммутирующей аппаратуры и выключателей;

— использование СПЧРС энергокомплекса для испытаний синхронных двигателей, для вибрационных испытаний мощных электрических машин;

— стратегическое направление использования энергокомплекса — подпитка Подольского района Мосэнерго реактивной мощностью.

Предлагается провести работу поэтапно.

Этап 1. Запитка стенда от существующего источника питания обмотки тороидального поля (ИПОТП) установки Т-11М с токами до 12 кА, напряжением до 0,9 кВ в импульсе до 4 с. Этот этап в настоящее время находится на стадии наладочных работ.

Этап 2. Запитка стенда СИК от конденсаторной батареи обмотки равновесия ТСП.

Этап 3. Запитка стенда СИК от модернизированного источника (ИПОТП) с токами до 60 кА, напряжением 90 В в импульсе до 4 с.

Этап 4. Запитка стенда СИК от ЦРПи-6 кВ путём подключения его по кабельным линиям мощностью 35—40 МВА к РУ-10 в здании установки ТСП (см. рис. 1) с использованием системы тиристорных агрегатов обмотки тороидального поля на токи до 70 кА, напряжением до 0,8 кВ в импульсе до 4 с.

Поэтапное проектирование и создание стенда позволят более аргументированно подойти к решению основной задачи — проведению ресурсных испытаний оборудования.

В настоящее время закончено создание испытательного стенда коммутационной аппаратуры (СИК) для проведения испытаний коммутирующих устройств установки ИТЭР. В 2014 г. были проведены испытания макета коммутатора для ИТЭР, разработанного НИИЭФА.

Состав стендов и характеристики оборудования позволят провести исследования и испытания коммутационной аппаратуры в соответствии с требованиями ГОСТа, ISO и МЭК (IEC60694 и др.): испытание до 35 кВ выключателей, размыкателей и тиристорных ключей до 35 кВ для физических установок, испытание коммутационной аппаратуры для промышленных энергосистем, вакуумных и элегазовых выключателей, полупроводниковых ключей, разрядников искровых и др.

Объём испытаний определяется ГОСТом и включает в себя испытания изоляции на электрическую прочность, испытания на коммутационную способность в рабочих режимах и при сквозных токах короткого замыкания, испытания на механическую износоустойчивость, определение электродинамической и термической устойчивости, синтетические испытания для разных типов выключателя.

По состоянию оперативных возможностей оборудование условно можно разбить на следующие группы:

группа 1 — источники электропитания. Эта группа оборудования находится в полной оперативной готовности для работы;

группа 2 — требует оперативной подготовки: сервисных операций, регламентных работ и ревизии оборудования;

группа 3 — требует для выполнения задач по испытаниям силового и другого оборудования схемных переключений кабельных, шинных трасс и коммутационных аппаратов;

группа 4 — требует разработки документации (электрических схем и др.) и дополнительных монтажных работ для выполнения задач под конкретные программы.

В настоящее время к первой группе относится источник питания стенда испытаний тиристорного ключа со следующими техническими характеристиками: мощность в импульсе до 20 МВА, напряжение переменного тока 900 В, напряжение постоянного тока 1000 В, ток в односекундном импульсе до 12 кА.

К второй группе относится источник питания с электромашинным агрегатом ТКД-200 и комплектом четырёх тиристорных агрегатов мощностью до 200 МВА, напряжением 1,0/4,0 кВ и током до 100 кА в импульсе 5 с. Кроме того, сюда следует включить оборудование усилителя тока на основе трансформаторного индуктивного накопителя ЦИНТ-80.

В третью группу оборудования входят комплекс электромашинных агрегатов (три), комплекс тиристорных агрегатов на максимальную мощность до 500 МВА и СПЧРС-15750.

Четвёртую группу составляет оборудование, которое определяется специальными программами и комплектуется источниками питания на основе электромашинных накопителей ТКД-200, тиристорных агрегатов и энергетических узлов с многосекционными трансформаторными индуктивными накопителями: ИН-90, ЦИНТ-80/110 и ТИНТ-900.

Параметры накопителей: индуктивность 0,5—10 мГн, активное сопротивление 0,25—5 мОм, длительность импульса в режиме выпрямителя 4 с, длительность работы в режиме инвертора 1 с, максимальные ток выпрямителя на этапе 1 ~12 кА.

Трансформаторный индуктивный накопитель типа ЦИНТ имеет коэффициент передачи по току $k \sim 4$, что позволит в последующем получать токи на испытуемом оборудовании до 250 кА.

Переключающие устройства источника питания, согласующие его характеристики с параметрами шинпровода на 12 кА (этап 1) и в перспективе до 70 кА (этап 4), пульт управления СИК разрабатываются в рамках работ по источнику питания ОТП установки Т-11М.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из анализа состояния оборудования и его характеристик, видно, что энергокомплекс ОФТР позволяет выполнять широкомасштабные задачи по синтетическим испытаниям электрофизического оборудования и коммутационной аппаратуры в диапазоне десятков киловольт и сотен килоампер, по созданию локального источника энергии до 100 МВАр для компенсации реактивной мощности.

Все перечисленные возможности требуют для своей реализации соответствующего финансирования, подготовки и обучения квалифицированного персонала, ревизии и доработки оборудования, создания быстродействующей и гибкой системы управления и контроля на базе современной автоматики и средств вычислительной техники.

REFERENCES

1. **Velikhov E.P., Glebov I.A., Glukhikh V.A.** Some electrotechnical problems of controlled nuclear fusion. — *Elektrotehnika* (Electrical engineering), 1981, № 1 (in Russian).
2. **Generator** of TKD-200-2U3 type. Technical conditions TU 16-513511-81. LPO «Elektrosila», Leningrad, 1981 (in Russian).
3. **Flywheel** of F-60/3000-U3 type. Technical conditions TU OVS.539.036, 1979 (in Russian).
4. **Excitation system** of STI-250-1600-4UKhL4 type. Technical conditions TU OBP.519.073-80, 1980 (in Russian).
5. **Frequency converter** of SPChRS-15750/630-UKhL4 type. Tallinn, 1984 (in Russian).
6. **Vasil'ev R.P., Kasharskiy E.G., Novikova T.N.** Charging of the inductive storage from rotating converter with the flywheel at a non-zero initial conditions. — *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energetika i transport* (Energetics and transport), 1986, № 2 (in Russian).
7. **Venikov V.A., Dzhunkuev T.A. et al.** The study of the operation modes of the electric machines complex on inductive storage. — In coll.: Abstracts of All-Union conference «Pulsed power sources for physical and thermonuclear research». Moscow, 1983 (in Russian).
8. **Azizzov E.A., Vasil'ev R.P., Murachev M.M. et al.** Pulsed power source based on electric machine with 250 MW flywheel. Report. — In coll.: Materials of V symposium «Electrical engineering 2010». Moscow, SSC V.I.Lenin All-Russia Electrotechnical Institute, 1999 (in Russian).
9. **Vasil'ev R.P., Murachev M.M., Strizhova I.G.** Optimized macromodels in the power supply calculation of the inductive storage from electric machines with flywheels. Report. — In coll.: Materials of V symposium «Electrical engineering 2010». Moscow, SSC V.I.Lenin All-Russia Electrotechnical Institute, 1999 (in Russian).

10. **Aref'ev Yu.P., Vasil'ev R.P., Murachev M.M. et al.** The problem of obtaining of currents powerful impulses with a low level of pulsations. Theoretical and experimental investigations, carried out in 2001. — In coll. : Proceedings of SRC of RF Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research. — Troitsk, 2001, issue. 1, pp. 131—136 (in Russian).
11. **Portal** «Modern research infrastructure of the Russian Federation. Pulsed thermonuclear facility Angara -5-1; <http://ckp-rf.ru/usu/73566/> (in Russian).

AUTHORS

Azizov E.A. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Vasiliev R.P. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Gostev A.A. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Strizhova I.G. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Received 29 June 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 4, pp. 38—54.