

## ИМЕНА И ДАТЫ

УДК 621.311 (091)

Л. А. Кощев

### НИИПТ – НТЦ ЕЭС. К 80-летию со дня основания

В статье приведены краткое изложение истории развития и перечень наиболее существенных достижений НИИПТ – НТЦ ЕЭС в период 1945–2025 гг.

*Ключевые слова:* НИИПТ, НТЦ ЕЭС, электроэнергетическая система, дальние электропередачи постоянным и переменным током, техника высоких напряжений, преобразовательная техника.

#### 1. Этапы развития и основные направления деятельности

В конце 1920-х – начале 1930-х годов в СССР, в основном в ЭНИНе, проводились исследования и велись проектные разработки по созданию крупных региональных энергообъединений и, в конечном счете, Единой энергосистемы (ЕЭС СССР). При этом, в качестве связующих элементов рассматривались и преобразовательные устройства выпрямитель – инвертор с линией или без линии между ними (ППТ и ВПТ), что обеспечивало надежный обмен мощностью между отдельными частями энергообъединения и исключало распространение аварийных процессов за пределы одной из его частей. Кроме того, предлагалось использовать ППТ для транспорта большой мощности из восточных регионов в центральную часть страны. В настоящее время в странах с большой территорией (США, Китай, Индия, Бразилия) и для международных связей (Западноевропейское энергообъединение – Nordel, СССР – Финляндия, Россия – Китай и др.) ППТ и ВПТ используются для транспорта электроэнергии и секционирования энергосистемы. На постоянном токе осуществляется связь с островами, между энергосистемами с частотой 50 и 60 Гц (Япония, Южная Америка) и с разными условиями регулирования частоты и мощности.

Во время второй мировой войны в немецких изданиях обсуждались предложения о создании мощных ППТ для транспорта электроэнергии от ГЭС на Волге в Германию. Под эту идею создавалась опытно-промышленная ППТ Эльба – Берлин.

После окончания войны в СССР вернулись к идеи использования ППТ, прежде всего для транспорта электроэнергии из восточных регионов. Эта целеустановка и была принята при создании по инициативе Министра электростанций СССР Д. Г. Жимерина специального института, первым директором которого был назначен заместитель Министра И. И. Угорец.

Днем основания НИИПТ считается 18 октября 1945 г., хотя некоторые будущие сотрудники НИИПТ до этого приняли участие в демонтаже ППТ Эльба – Берлин и перебазировании оборудования этой передачи в Подмосковье. Институт предназначался для создания мощных протяженных линий электропередачи постоянным током, чему соответствовало и официальное название института – НИИ по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Историю института можно условно разбить на четыре этапа:

- 1940-е до середины 1950-х,
- 1950-е – 1980-е,

- 1990-е до середины «нулевых»,
- с середины «нулевых» до настоящего времени.

На первом этапе основное внимание было уделено созданию первых экспериментальных и испытательных установок для испытаний и первоначальной отладки оборудования, полученного по ремонту после демонтажа ППТ Эльба – Берлин. Был определен перечень и объем недостающего оборудования и устройств системы управления для создания на базе этого оборудования новой электропередачи. Разработан проект, разработано и реализовано недостающее оборудование и устройства системы управления, регулирования, автоматики и защиты (СУРЗА), проведены строительные и монтажные работы, наконец введена в эксплуатацию первая в мире ППТ Кашира – Москва.

Для исследования взаимного влияния ППТ и энергосистемы в конце этапа началось сооружение электродинамической модели (ЭДМ). В ноябре 1953 г. на базе сооружаемой ЭДМ была создана лаборатория электрических систем (ЛЭС).

Начало второго этапа развития НИИПТ совпадает с началом бурного развития электроэнергетики – вводятся крупнейшие электростанции, создаются региональные энергосистемы, готовятся условия для создания ЕЭС СССР. Для НИИПТ появляются новые задачи: дальние электропередачи не только постоянного, но и переменного тока. Обеспечение устойчивости и надежности в процессе развития ЕЭС и входящих в нее энергосистем. В НИИПТ определяются три явно выраженные направления исследований и практических разработок: постоянный ток и преобразовательная техника, техника высоких напряжений и электрические системы. Крупные проекты ППТ выполняются силами всех трех направлений или, по крайней мере, двух. Но большая часть объема работ лабораторий ТВН (ЛТВН) и электрических систем (ЛЭС) уже не связаны с проблемой передачи электроэнергии постоянным током.

По линии ТВН проводятся комплексные работы, обосновывающие переход к каждому новому классу напряжения электрической сети.

Электродинамическая модель ЛЭС становится основным инструментом для исследования режимов и устойчивости при проектировании развития энергосистем, разработки и испытаний средств обеспечения устойчивости и надежности сложных энергосистем.

Проблематика ППТ сосредоточена прежде всего на разработке проекта ППТ Экибастуз – Центр. В последние годы данного этапа была введена в эксплуатацию вставка постоянного тока (ВПТ) на связи СССР – Финляндия – крупнейший в мире объект такого рода. Значительную часть объема работ института на данном этапе составляли работы по специальной тематике.

Третий этап в жизни НИИПТ был самым тяжелым. В условиях изменения экономических отношений и форм собственности в стране, НИИПТ стал акционерным обществом, акции которого перешли в управление РАО ЕЭС. Изменились условия планирования (формирования портфеля заказов) НИР и ответственности за их выполнение. Из-за отсутствия финансирования полностью прекратились работы по специальной тематике и ликвидированы соответствующие подразделения института. Главной задачей оказалась борьба за выживание – сохранение коллектива и экспериментальной базы. Вместо регулярных планов – выполнение случайных работ, финансируемых из различных, в том числе зарубежных источников. Наиболее

крупной в финансовом отношении была работа по исследованию устойчивости энергосистемы Китая.

На границе перехода от третьего к четвертому этапу существования НИИПТ – НТЦ ЕЭС был разработан проект воздушно-кабельной ППТ ЛАЭС – Выборг с оригинальной трехсторонней вставкой постоянного тока.

На четвертом этапе НИИПТ перешел под управление ЦДУ (СО) ЕЭС. Институт превратился в научно-технический центр Единой энергосистемы, как правопреемник государственного предприятия и акционерного общества НИИПТ. Отделы постоянного тока и техники высоких напряжений, тематика которых не соответствовала тематике головной организации, были выведены из состава НТЦ. На базе этих отделов под брендом НИИПТ создана самостоятельная организация, которая в последующем перешла под управление ПАО «Россети». Из трех направлений осталось одно – системное, которое определяется как развитие и управление энергосистемой.

Получают новое развитие разработки и исследования технических средств и систем управления, направленных на повышение уровня устойчивости и надежности энергосистем и отдельных энергообъектов (ЦСПА, СМЗУ и др.). Во все большей мере тематика работ НТЦ ЕЭС развивается в части разработки проектов развития ЕЭС и входящих в нее энергосистем.

## 2. Основные подразделения

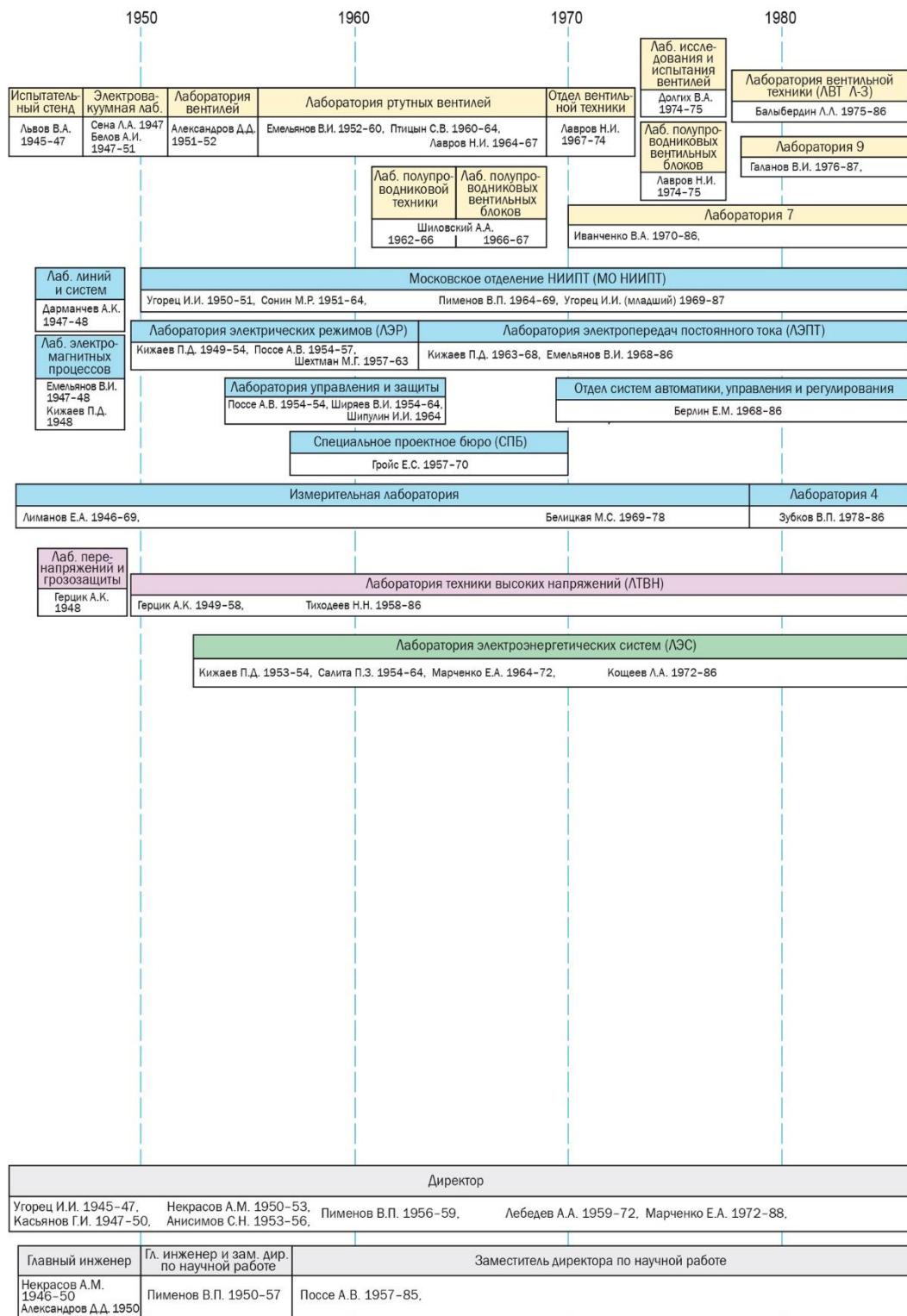
Изменения структуры института в части основных научных подразделений представлены на рис. 1.

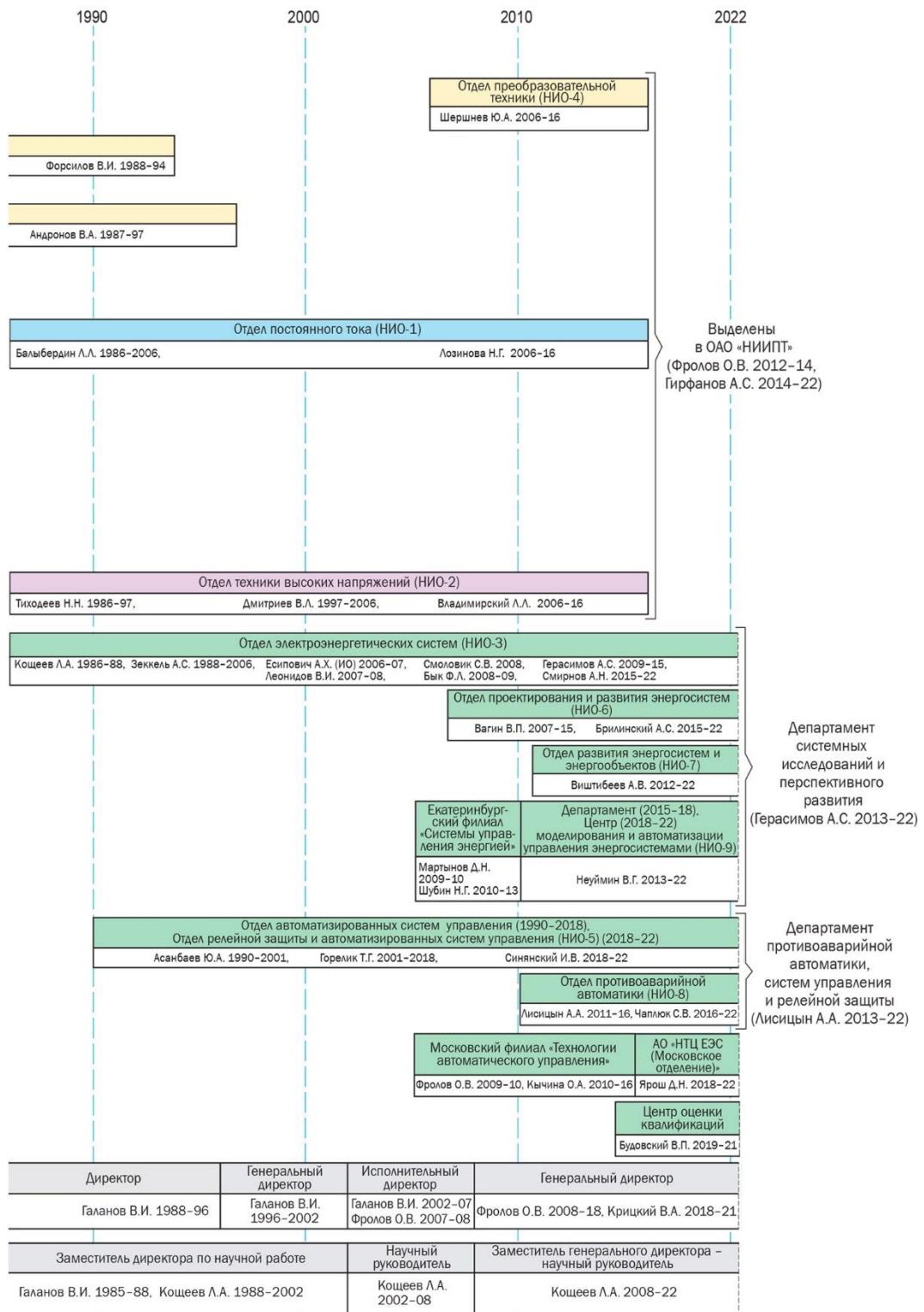
В течение первых десяти лет создавались и развивались подразделения, занятые решением научных и технических проблем ППТ, в том числе и лаборатория техники высоких напряжений (ЛТВН). Наряду с научными лабораториями была создана Центральная опытная мастерская (ЦОМ), а также производственные подразделения в МО НИИПТ. К концу этого периода появилась лаборатория электрических систем (ЛЭС). К началу 1970-х ЛТВН и ЛЭС оказались крупнейшими в институте. В это же время в составе НИИПТ появились лаборатории № 7 и № 9, а затем и сектор в ЛЭС, выполняющие работы по специальной тематике. В течение 1980-х НИИПТ достиг максимальной численности сотрудников научных подразделений. В конце 1980-х – начале 90-х произошло существенное сокращение числа подразделений и численности института. Решением Правительства Московское отделение НИИПТ было выведено из состава НИИПТ и передано в управление ВНИИЭ, были ликвидированы лаборатории № 7 и № 9, подразделения по тематике ППТ слились со значительным сокращением численности в один отдел постоянного тока.

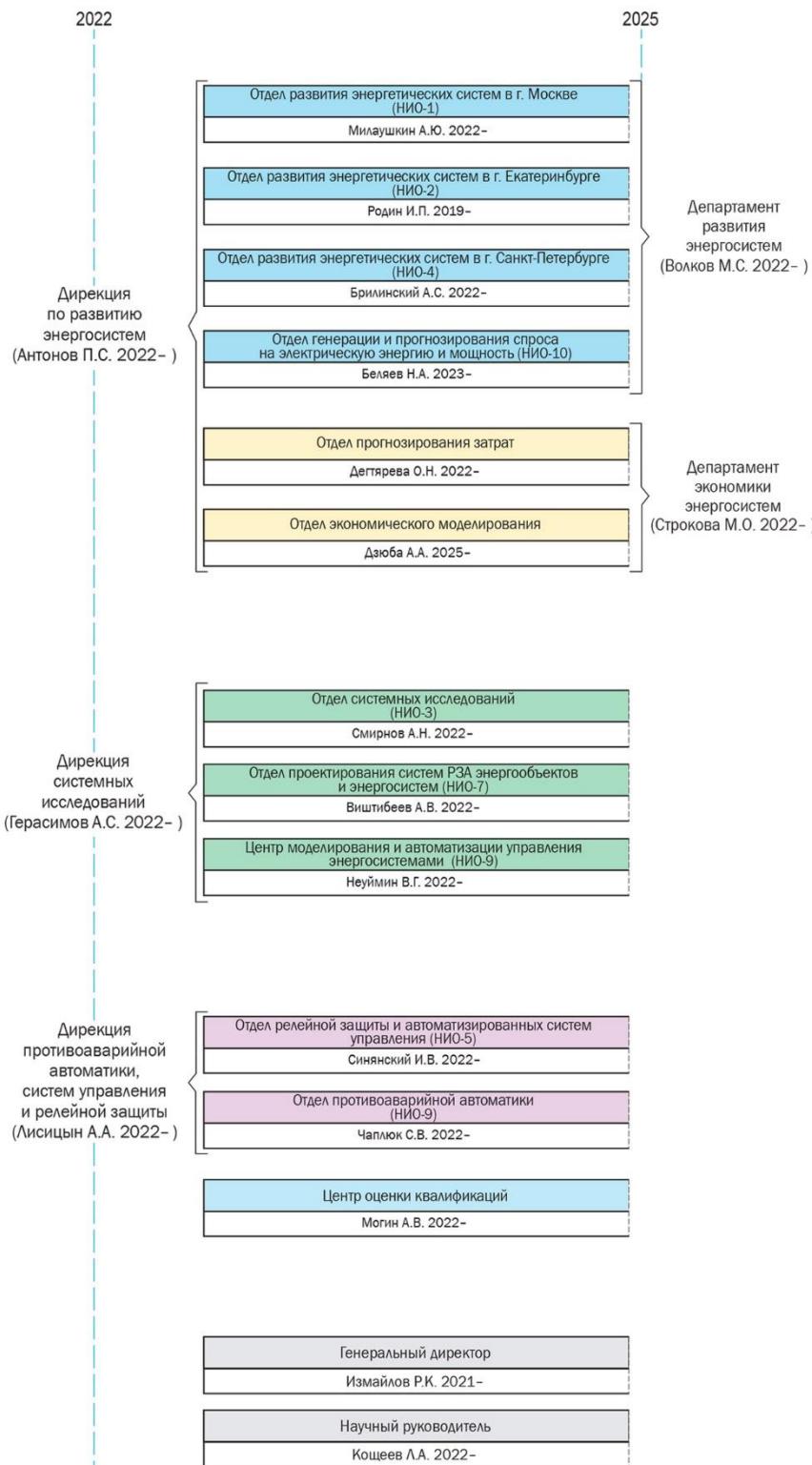
Сократилась и численность ЛТВН и ЛЭС, которые в 1986 г. были переименованы в отделы. Все эти сокращения проводились постепенно при снижении финансирования. Персонал лабораторий № 7 и № 9 частично был переориентирован на работы по основной тематике.

Следующее знаковое изменение структуры НИИПТ произошло через несколько лет после перехода НИИПТ под управление ЦДУ (СО) ЕЭС. При этом сохранились только подразделения, созданные при разделении отдела электрических систем.

Последующие изменения структуры связаны с изменением требований и запросов в общем комплексе задач развития и управления энергосистемами. Появились подразделения в Екатеринбурге и Новосибирске, выросла и получила новый импульс развития Московская часть института.







**Рис. 1 – Изменения структуры НИИПТ – НТЦ ЕЭС с 10.1945 по 06.2025 г.**

После перехода под управление ЦДУ (СО) ЕЭС и последующего разделения НТЦ ЕЭС и НИИПТ в НТЦ ЕЭС остались подразделения, соответствующие целям и задачам ЦДУ (СО) ЕЭС. Эти подразделения увеличивали свою численность за счет приема молодых специалистов и бывших сотрудников других энергетических организаций – ЭНИН, Энергосетьпроект и др. По суммарной численности научных подразделений НТЦ ЕЭС уступает НИИПТ в период его максимального развития (1980-е годы), но превосходит лабораторию (отдел) электрических систем НИИПТ.

Научное направление, связанное с проблемами развития и управления энергосистемами, появилось позднее других направлений деятельности НИИПТ. С ноября 1953 г. и в течение следующих пятидесяти лет, это направление было представлено лабораторией (отделом) электрических систем. В дальнейшем от отдела стали отпочковываться подразделения, занятые вопросами развития энергосистем, противоаварийной автоматикой, разработкой программных комплексов расчета режимов и переходных процессов в энергосистемах и др. К настоящему времени в составе НТЦ ЕЭС функционируют 11 отделов распределенных между тремя дирекциями (см. рис. 1).

### 3. Экспериментальная база

С сооружения первых временных установок для испытания вентилей и аппаратуры управления демонтированной ППТ Эльба – Берлин, экспериментальная база постоянно находилась в центре внимания института и Министерства. ППТ Кашира – Москва была определена как опытно-промышленная и надолго стала основной экспериментальной установкой для отработки и испытаний элементов преобразовательной техники и устройств управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА). Московское отделение НИИПТ (МО НИИПТ), выросшее на базе ППТ Кашира – Москва, до передачи его под управление ВНИИЭ оставалось главным экспериментальным центром по тематике ППТ – ПТ. По мере ввода в эксплуатацию ППТ Волгоград – Донбасс преобразовательные подстанции и воздушная линия этой электропередачи использовались в качестве экспериментальной базы разработки и совершенствования преобразовательной техники и СУРЗА будущих ППТ. В процессе проектирования и разработки оборудования ППТ Экибастуз – Центр во все большей мере использовались испытательные стенды предприятий электротехнической промышленности, а затем и специально созданные стенды соответствующих классов напряжения и тока.

Основу высоковольтной экспериментальной базы НИИПТ составила переданная НИИПТу решением Правительства высоковольтная испытательная установка Ленинградского Политехнического института (ЛПИ). Возможно это решение, а также расположение поблизости здание бывшего музыкального училища, определили целесообразность перевода НИИПТ из Подмосковья в Ленинград.

Экспериментальная установка ЛТВН постепенно приращивалась новыми элементами. Путем пристройки существенно расширено здание корпуса ТВН. В течение длительного времени в этом здании размещались также некоторые испытательные установки лаборатории ртутных вентилей, а затем лабораторий специальной тематики.

В 1970-е был задуман и в начале 1980-х создан новый испытательный и исследовательский комплекс ТВН, который стал крупнейшим в стране высоковольтным

комплексом с наиболее современными по тому времени испытательными установками и пролетом линии с изменяющимися параметрами. В своем развитии высоковольтная база НИИПТ опережала появление каждого нового класса напряжения. С его использованием выполнены базовые работы по освоению классов напряжения 330, 500, 750, 1150 кВ, проведены испытания элементов оборудования ППТ Экибастуз – Центр.

Экспериментальная база для исследования режимов и устойчивости создавалась на основе физического моделирования электроэнергетической системы. Стимулом к созданию в составе НИИПТ электродинамической (физической) модели явилась необходимость исследования особенностей поведения мощных ППТ в энергосистеме, и эти задачи сохраняли свою значимость в течение всего времени существования НИИПТ.

Электродинамическая модель энергосистемы (ЭДМ) была создана в 1950-е годы и в процессе последующего развития стала крупнейшей в мире установкой такого рода. В 1950-е – 1970-е ЭДМ была основным средством исследования режимов и устойчивости сложных энергосистем, а также полигоном для испытаний и разработки новых устройств регулирования и автоматики. В середине 1960-х была проведена коренная модернизация ЭДМ, обеспечившая многократное повышение ее эффективности. В 1980-е – 1990-е она оставалась средством исследования режимов наряду с вычислительной техникой, а в последующем (до настоящего времени) продолжает использоваться при испытаниях и разработке различных автоматических систем. ЭДМ насыщалась современной электронной аппаратурой, введена автоматизированная система управления. В результате ЭДМ превратилась в цифро-аналого-физический комплекс (ЦАФК), сохранив свою востребованность при испытаниях и разработке различных автоматических систем регулирования и противоаварийной автоматики.

В конце 1960-х в составе лаборатории электрических систем в дополнение к ЭДМ был создан вычислительный центр на базе ЭВМ «Минск-14». Со временем этот центр стал общеинститутским и использовался с предельной загрузкой вплоть до появления и распространения персональных компьютеров. Следующим шагом в использовании вычислительных средств было появление специализированного комплекса (RTDS), постепенное его наращивание и совершенствование.

Создание и развитие во многом уникальной экспериментальной базы определило положение НИИПТ как одного из крупнейших многопрофильных исследовательских центров.

#### **4. Основные достижения**

Уже к середине 1950-х деятельность НИИПТ в области техники высоких напряжений и режимов энергосистем приобретает самостоятельное значение. Лаборатории (ЛТВН и ЛЭС), связанные с этими направлениями, развиваются быстрее остальных подразделений института. Тематические планы работ этих лабораторий рассматриваются и утверждаются Главным техническим управлением Минэнерго. Все это обуславливает целесообразность представления основных достижений отдельно по каждому из трех направлений. При этом, однако, следует отметить, что во всех проектах ППТ в той или иной мере принимали участие ЛТВН и ЛЭС.

#### **4.1. Основные достижения в области передачи электроэнергии постоянным током и преобразовательной техники**

В первые годы существования НИИПТ проведены исследования и разработка схемных решений и вопросов СУРЗА преобразовательных подстанций при использовании ртутных вентилей. Введена в эксплуатацию первая в мире (одновременно с ППТ на остров Готланд) опытно-промышленная ППТ Кашира – Москва напряжением  $\pm 100$  кВ. В 1961 г. введена в эксплуатацию самая мощная на тот момент ППТ Волгоград – Донбасс напряжением  $\pm 400$  кВ. Разработана и введена в эксплуатацию вставка постоянного тока на связи СССР – Финляндия. За эту работу была присуждена Государственная премия СССР. Разработан проект, создано и испытано оборудование и аппаратура, наполовину сооружена линия и одна из преобразовательных подстанций ППТ Экибастуз – Центр  $\pm 750$  кВ, протяженностью 2400 км мощностью 6000 МВт. Разработан проект ППТ ЛАЭС – Выборг с уникальным трехсторонним преобразователем. Реализация этого проекта позволила бы повысить пропускную способность связи и одновременно обеспечить повышение уровня надежности электроснабжения г. Санкт-Петербурга.

Сотрудники НИИПТ приняли участие в международных проектах: квадрополярной многоподстанционной ППТ Россия – Белоруссия – Польша – Германия в варианте с заходом в Прибалтику, электропередачи Сахалин – Япония с самой протяженной и мощной кабельной линией постоянного тока, ППТ Братск – Пекин и др. Выполнен оригинальный исследовательский проект «Шины постоянного тока» в виде двух ППТ  $\pm 750$  кВ от Братска до Тихookeанского побережья с присоединением к трем перспективным ГЭС и Тугурской приливной электростанции.

Все линейное и подстанционное оборудование, а также аппаратура СУРЗА ППТ Волгоград – Донбасс, Экибастуз – Центр и ВПТ в составе связи СССР – Финляндия были изготовлены на отечественных предприятиях, подчас специально для этого созданных. При вводе в эксплуатацию первой очереди ВПТ единственным элементом иностранного производства был счетчик электроэнергии. Это было предметом законной гордости отечественной научной и инженерной мысли. Но все эти «самые» и «первые» плохо согласовывались с экономической целесообразностью. Кроме того, следует иметь в виду, что ППТ Экибастуз – Центр задумывалась в период беспрецедентного развития отечественной энергетики, причем предполагалось, что за головным проектом последуют столь же мощные ППТ из Сибири. Однако к моменту реализации проекта ситуация существенно изменилась и ППТ Экибастуз – Центр на длительный срок могла оказаться единственным элементом такой мощности, что затрудняло решение общей проблемы обеспечения надежности функционирования ЕЭС. Интерес к дальним электропередачам начал снижаться в связи со все большим использованием природного газа при производстве электроэнергии и развитием атомной энергетики. Эти соображения не стимулировали скорейшее завершение сооружения ППТ Экибастуз-Центр, а развал СССР довершил печальную историю ее создания. В то же время десятилетиями безупречно функционировала ВПТ в составе связи СССР (Россия) – Финляндия. Результаты разработок в области преобразовательной техники использовались при создании и внедрении устройств плавки гололеда на проводах воздушной линии, решении задач специальной тематики, при создании системы автоматизированного управления, устройства «веерной разгрузки» и др. Одна из работ по специальной тематике отмечена Государственной премией СССР.

Выполненные на мировом уровне разработки в области мощных транспортных линий электропередачи постоянным и переменным током сверхвысокого напряжения еще будут востребованы, учитывая протяженность и особое положение нашей страны на евразийском континенте.

#### **4.2. Достижения в области техники высоких напряжений**

Начав с необходимых высоковольтных исследований при создании первых ППТ, лаборатория (отдел) ТВН стала ведущим в стране научным центром в этой области. При этом, используя результаты своих специфических исследований в области высоковольтных вопросов постоянного тока, лаборатория (отдел) участвовала во всех проектах ППТ. Однако значимость работ этого подразделения НИИПТ вышла далеко за пределы, определяемые развитием техники передачи энергии постоянным током.

Практически, с первых лет существования ЛТВН подключилась к исследованиям в обоснование новых классов напряжения 330, 500, 750 кВ.

Для каждой новой ступени напряжения проводился комплекс высоковольтных исследований и испытаний с использованием Высоковольтного комплекса, результаты которых, наряду с исследованиями других организаций, служили обоснованием проектных и технологических решений, обосновывающих ввод каждого нового класса напряжения электрической сети СССР. Участие в разработке обосновывающих материалов класса напряжения 750 кВ и создании на их основе связи с энергосистемами Восточноевропейских стран (создание энергосистемы «Мир») было отмечено Государственной премией СССР, НИИПТ был награжден орденом «Знак почета», ордена и медали получили ведущие сотрудники ЛТВН и ЛЭС.

В связи с проектированием линий электропередачи 1150 кВ переменного и  $\pm 750$  кВ постоянного тока проведен комплекс исследований и последующие испытания элементов оборудования и линейной изоляции, в результате которых сформулированы основные требования к линиям и оборудованию ультравысокого напряжения.

Проектирование этих линий электропередачи проводилось впервые в мировой практике, впервые был проведен и целенаправленный комплекс высоковольтных исследований, включающий экологические и иные сопутствующие проблемы. Некоторые из результатов, полученных с использованием высоковольтного комплекса НИИПТ, в последующем были переданы в Китай, где использовались при сооружении испытательного комплекса и линий электропередачи постоянного и переменного тока ультравысокого напряжения.

Одним из первых практических результатов исследований ЛТВН было предложение о проведении комплекса мероприятий, реализация которых позволила перевести класс напряжения электропередачи Куйбышев – Москва с 400 на 500 кВ, отказавшись от ряда искусственных мер по повышению пропускной способности этой линии. В дальнейшем, класс напряжения 500 кВ стал основным для системообразующей сети центральной и восточной частей ЕЭС.

Результаты научной деятельности высококвалифицированного коллектива лаборатории (отдела) ТВН отражены в научных статьях и книгах.

Результаты методических наработок и экспериментальных исследований лаборатории ТВН были представлены в соответствующих разделах руководящих указаний

по выбору и координации изоляции, выбору проводов воздушных линий, в государственных и отраслевых стандартах по методам испытаний, по защите энергоустановок от грозовых и коммутационных перенапряжений и т. д. Речь идет прежде всего о проблемах координации изоляции, ограничении коммутационных перенапряжений, защите воздушных и кабельных линий, старении внутренней изоляции, короне и радиопомехах, электрической прочности гирлянд воздушных изоляторов в том числе при разряженном воздухе, снижении стойкости загрязненной изоляции, экологических требований по условиям воздействия воздушных линий переменного и постоянного тока высокого и ультравысокого напряжения.

Объем и качество методических разработок, подтвержденных экспериментальными данными, полученными с использованием Высоковольтного комплекса НИИПТ, ставили лабораторию в ряд мировых исследовательских центров в области ТВН.

В трудах лаборатории (отдела) выдвинуты и разработаны некоторые новые направления в области ТВН: воздушные линии повышенной пропускной способности, линии электропередачи в трубах, ресурсные требования к изоляции и др.

В частности, разработан новый принцип определения требований к внешней и внутренней изоляции высоковольтных объектов, базирующийся на исследованиях и испытаниях ресурсных возможностей изоляции наряду с оценкой предельно допустимого уровня напряжения по условию перекрытия изоляции при коммутационных и грозовых перенапряжениях. Разработана методика проведения ресурсных испытаний оборудования и линий электропередачи.

Предложенный принцип нашел применение и в энергосистемах других стран.

Разработана и нашла широкое применение методика составления территориальных карт, определяющих требования к уровню изоляции проектируемых воздушных линий электропередачи на данной территории. При составлении карт учитываются как природные особенности, так и воздействие от результатов человеческой деятельности на данной территории. Последнее требует периодического пересмотра карт.

В последние годы существования отдела ТВН появилось еще одно направление, которое можно представить как управление электрическим полем.

Был выполнен ряд работ с использованием теоретических положений, относящихся к теории электрического поля. Разработаны методические рекомендации по организации заземления оборудования и линий электропередачи, в том числе ППТ, по защите подземных сооружений, находящихся в зоне влияния энергетических объектов. Разработан ряд предложений по использованию электрического поля при решении некоторых технических проблем, в том числе:

- вытеснение остатков нефти из скважин вместо закачивания в них воды;
- специальная сушка изделий из дерева;
- сушка и дробление сыпучих материалов при транспортировке;
- специальный метод повива сталеалюминиевых проводов, обеспечивающий минимизацию потерь в проводах линии передачи и др.

В целом, деятельность НИИПТ в области ТВН оставила глубокий след как в части научных, так и практических результатов повышения надежности, пропускной способности и экономичности электрической сети, а также технологии дальних линий электропередачи постоянного и переменного тока всех классов напряжения до 750 кВ

включительно. Линия 1150 кВ была построена частично (не на всю проектную длину). Однако пока она не может быть использована в соответствии с проектным потенциалом в значительной степени по тем же причинам, о которых речь шла применительно к ППТ  $\pm 750$  кВ. Но это не отменяет значимости результатов комплексных исследований ультравысокого напряжения для проектов будущих мощных линий электропередачи протяженностью, соответствующей территории нашей страны и ее расположению на евразийском континенте.

#### 4.3. Развитие и управление энергосистемами

Исходная, поставленная перед ЛЭС задача – исследование режимов ППТ в составе сложной энергосистемы, всегда оставалась в тематическом плане работ лаборатории. В ЛЭС разработана наиболее совершенная на тот момент цифровая модель ППТ в составе энергосистемы. Эта модель использовалась при определении требований по условиям устойчивости, баланса реактивных мощностей, подавления гармоник в примыкающих сетях, а также при разработке и совершенствовании устройств СУРЗА преобразовательных подстанций ППТ и системы управления мощностью ППТ в аварийных ситуациях. Однако уже к концу 1950-х основной объем работ ЛЭС определяется решением более общих системных задач – дальние передачи переменного тока, сильное регулирование возбуждения генераторов, противоаварийная автоматика и т. д. При этом главная особенность работ ЛЭС заключалась в исследовании максимально сложных энергосистем. Возможность выполнения таких исследований в 1950-е и 1960-е годы обеспечивалась наличием в составе ЛЭС большой электродинамической модели, единственного в то время инструмента для воспроизведения процессов в сложных энергосистемах. На базе этих работ была создана научная школа исследования режимов и устойчивости энергосистем любой конфигурации и сложности. Для упрощения использования результатов исследований при проектировании энергосистем было предложено представление результатов в виде областей устойчивости в области двух-трех перетоков мощности от энергоузла с избытком генерирующей мощности, введено понятие «опасного сечения» для энергосистем с кольцевой и многоконтурной схемой системообразующей сети, предложен специальный метод декомпозиции сложной энергосистемы в текущем режиме, обеспечивающий не только экспресс-оценку устойчивости, но и определяющий выбор точки приложения и дозировку управляющих воздействий и др.

В 1960-е – первой половине 1970-х проведены комплексные исследования и разработаны методические подходы к оценке надежности функционирования энергосистемы. В последующем эти методические предложения были развиты в работах многих организаций и нашли практические применения при определении и сравнительной оценке устойчивости и надежности энергосистем.

Предложена формульная оценка пропускной способности слабых связей в зависимости от мощностей объединяемых частей энергосистемы и условий регулирования частоты и мощности.

Первой общелабораторной не связанной с ППТ темой была дальняя электропередача с подпорными, в том числе компенсированными синхронными компенсаторами. При этом предложено формульное определение условий возникновения самовозбуждения синхронных генераторов. Одним из наиболее важных элементов этой

темы было сильное регулирование возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов. Вскоре тема АРВ сильного действия (АРВ-СД) приобрела самостоятельное значение на многие годы. В том или ином виде эта тематика присутствует в работах НТЦ ЕЭС и в настоящее время.

В результате исследований на ЭДМ и при анализе материалов, полученных при участии в расследовании аварий, имевших место в 1960-е и 1970-е годы, была выявлена недостаточная эффективность действия АРВ-СД в различных аварийных ситуациях и в некоторых специфических режимах. Для компенсации этих недостатков были предложены мероприятия, корректирующие действия АРВ-СД в зависимости от внешних условий – нелинейная коррекция параметров каналов блока стабилизации, автоматическое управление уровнем напряжения в ходе аварийного процесса и др. Часть этих предложений в виде дополнительных элементов к АРВ-СД была внедрена на нескольких крупных электростанциях в ОЭС Сибири и Средней Азии. В последующем в той или иной форме эти предложения были реализованы практически во всех АРВ-СД.

С использованием некоторых из этих разработок была решена проблема обеспечения устойчивой передачи требуемой мощности от энергоблока Киришской ГРЭС в Финляндию по временной схеме передачи, что исключало неустойку в связи с задержкой ввода в эксплуатацию первого преобразовательного блока вставки постоянного тока в составе связи СССР – Финляндия.

Параллельно с работами по АРВ-СД в ЛЭС разворачивались работы по созданию, совершенствованию и испытаниям средств противоаварийной автоматики – импульсная разгрузка и ограничение, а также форсировка мощности турбины, электрическое торможение генераторов, управление режимами устройств компенсации реактивной мощности, управление мощностью ППТ и др.

Исследования локальных средств ПА приводили к мысли о создании системы противоаварийного управления для энергосистемы в целом. Эта идея «пробовалась на зуб» вне тематического плана еще в 1960-е (идея считалась нереализуемой). Затем удалось включить в тематический план поисковую НИР сначала применительно к ОЭС Северо-Запада, а затем ОЭС Урала.

В 1987 г. в ОЭС Урала была включена в эксплуатацию первая централизованная система противоаварийной автоматики (ЦСПА) – принципиально новая система противоаварийного управления, алгоритм которой базировался на специальной методике декомпозиции схемы энергосистемы в текущем режиме при заданных расчетных аварийных возмущениях, формульной оценке статической устойчивости и других методических решений, разработанных с использованием опыта исследований различных энергосистем. В первый год эксплуатации ЦСПА зафиксировано снижение на порядок мощности нагрузки, отключаемой действием противоаварийной автоматики в аварийных ситуациях. За разработку и результат, достигнутый при внедрении ЦСПА, группе разработчиков была присуждена Государственная премия СССР.

Спустя 20 лет после внедрения первой ЦСПА началась разработка новой версии, в которой при сохранении основной идеи исключались вынужденные упрощения и не имеющие строгого обоснования решения. Расширились и функции ЦСПА, в частности, алгоритм дополнен определением управляющих воздействий по условиям динамической устойчивости. Все это повысило универсальность ЦСПА и возможность

успешно использовать ее в энергосистемах с различной конфигурацией системообразующей сети. К настоящему времени ЦСПА внедрена в большинстве ОЭС и является основой в организации системы автоматического противоаварийного управления в ЕЭС России.

Применительно к изолированным энергосистемам разработан вариант централизованной противоаварийной автоматики с алгоритмом, учитывающим существенные отклонения частоты в ходе аварийного процесса. Эта автоматика рекомендуется к внедрению в энергосистемах, не имеющих синхронной связи с ЕЭС, или в случаях низкой надежности таких связей. Имеются в виду прежде всего энергосистемы в северных и восточных регионах России.

Идея использования методических решений ЦСПА в системе диспетчерского управления в той или иной мере была реализована применительно и к первой ЦСПА. В 2010-е эта идея была реализована с большей степенью определенности и целенаправленности. В результате было разработано самостоятельное устройство,вшедшее практическое применение во многих энергосистемах – Система мониторинга запаса устойчивости (СМЗУ), которая позволяет осуществить контроль в текущем режиме запаса устойчивости в определенных опасных сечениях энергосистемы и дает возможность оценки резерва пропускной способности, в том числе с учетом действия системы противоаварийного управления. Все это повышает экономическую эффективность управления режимами энергосистемы.

Одной из системных проблем, наряду с предотвращением нарушения устойчивости, является проблема предотвращения и максимальной локализации асинхронного хода. В качестве технического средства решения этой задачи было разработано специальное устройство автоматической ликвидации асинхронного режима (АЛАР-Ц).

Основным преимуществом разработанного в НИИПТ цифрового устройства была высокая точность в оценке реально приближающегося асинхронного режима.

В качестве автономного устройства локальной (вне ЦСПА) автоматики АЛАР-Ц было внедрено во многих энергосистемах. В последующем алгоритм АЛАР-Ц был модернизирован и включен в общий комплекс средств локальной противоаварийной автоматики и является одной из наиболее существенных частей этого комплекса.

В международных проектах, выполнявшихся в 1990-е и последующие годы системные вопросы имели существенное, а чаще – основное значение. В частности, проведена НИР по определению необходимого объема средств обеспечения устойчивости и надежности энергосистемы Китая на этапе ввода в эксплуатацию крупнейшей в мире ГЭС «Три ущелья». На этом этапе развития энергосистемы предполагался ввод в эксплуатацию нескольких линий электропередачи 1000 кВ переменного и  $\pm 750$  кВ постоянного тока.

Работа выполнялась в основном на ЭДМ, причем это был единственный случай использования практически всего оборудования ЭДМ в одной схеме.

В результате работы были не только определены причины возможных тяжелых аварийных ситуаций и предложен перечень мероприятий по их предотвращению, но и проведено обучение группы сотрудников, в том числе работающих на электродинамической модели, ранее спроектированной и скомплектованной НИИПТ для исследовательского центра CEPRI.

Начиная с 1990-х, в составе ЕЭС появляются энергоблоки иностранного производства, ветро- и солнечные электростанции. В НИИПТ–НТЦ ЕЭС выполнен ряд работ по адаптации оборудования этих электростанций и их систем регулирования и автоматики к условиям ЕЭС.

В этих работах затронуты самые важные аспекты включая регулирование частоты и мощности, резервирования и накопления энергии, режимных ограничений и др.

Приоритет научно-технических разработок в 21 веке во многих случаях определяется регистрацией сопутствующих вычислительных программ. Но программы могут являться и собственно целью НИР. К разработкам такого рода относятся программные комплексы расчета токов короткого замыкания и выбора настроек защит (АРУ РЗА) и комплекс расчетов переходных процессов и исследования динамической устойчивости энергосистем (*RuStab*). Первый из этих комплексов нашел широкое применение во многих организациях электроэнергетического комплекса. Второй используется во многих проектах и исследовательских работах НТЦ ЕЭС.

В последние годы в тематических планах НТЦ ЕЭС во все большей мере происходит сдвиг в сторону задач по развитию энергосистем.

Начиная с 2000-х, разработан ряд проектов на различных ступенях развития отдельных энергосистем и ОЭС Северо-Запада. Эти проекты включали определение требований к комплексу средств обеспечения устойчивости и надежности. После образования в составе НТЦ ЕЭС специального проектного подразделения, выполнен ряд проектных работ по развитию ЕЭС и входящих в нее энергосистем. В настоящее время работы такого рода составляют важнейшее направление деятельности НТЦ ЕЭС. Для обоснования отдельных проектных решений используются методические разработки по технико-экономической оптимизации системообразующей сети и распределению генерирующих объектов разного типа.

Деятельность института не ограничивалась исследованиями и внедрением результатов этих исследований в проектах и на действующих объектах. Сотрудники ЛЭС неоднократно включались в состав комиссий по расследованию системных аварий. По заданию Сетевой комиссии Минэнерго готовился ежегодный доклад по ранжированию проектов крупных объектов из условия их влияния на уровень надежности ЕЭС. В силу практической направленности своей деятельности, НИИПТ (НТЦ ЕЭС) поддерживал постоянную связь не только с проектными, но и с эксплуатационными организациями, а также с предприятиями электротехнической промышленности. Результаты НИР лаборатории (отдела) электрических систем внедрялись в энергосистемах и на отдельных энергообъектах. Большое количество новых предложений по системной тематике появлялось в результате участия сотрудников лаборатории (отдела) электрических систем при расследовании системных аварий, а также в системных экспериментах, программы которых в той или иной степени инициировались НИИПТ (НТЦ ЕЭС). К числу выявившихся проблемных задач относились в частности: недостаточная эффективность АРВСД в некоторых ситуациях, отрицательное влияние на уровень устойчивости регулирования энергоблоков «до себя», низкий уровень устойчивости некоторых видов синхронных двигателей, недостаточное использование автоматики отключения нагрузки по условиям устойчивости и др. По результатам системных испытаний была подтверждена эффективность предложений системы автоматического управления уровнем напряжения на мощных электростанциях,

коррекция АРВ выделенного для передачи энергии в Финляндию генератора Киришской ГРЭС, отказ от регулирования «до себя», необходимость САОН, подтверждена возможность «волны частоты» в ЕЭС и др. Воспроизведение режимов в ходе аварий и системных экспериментах на ЭДМ и расчетах на ЭВМ способствовало повышению качества моделирования и исследования режимов устойчивости сложных энергосистем.

По инициативе НИИПТ под эгидой Всесоюзного общества энергетиков и работников электротехнической промышленности и Главного технического управления Минэнерго СССР в 1960-е – 1980-е годы раз в 4 года проводилось Всесоюзное совещание по устойчивости и надежности энергосистем.

В совещании участвовали представители практически всех основных организаций (НИИ, академические и проектные организации, ВУЗы, эксплуатирующие организации), занимавшиеся соответствующими вопросами. По итогам Совещаний готовилось решение, в котором отмечались изменения и определялись задачи в обеспечении устойчивости и надежности энергосистем. До начала Совещания издавался сборник докладов. Совещания проводились в разных городах страны (Ленинград, Новосибирск, Алма-Ата, Ташкент, Тбилиси, Душанбе). Председателем оргкомитета Совещания был представитель НИИПТ. На НИИПТ возлагались и задачи по подготовке регламента и проекта решения совещания, подготовке к изданию сборника докладов, включая отбор и редактирование, и другие организационные вопросы.

### **Заключение**

НИИПТ – НТЦ ЕЭС на всех этапах своего существования участвовал в решении проблем, определяющих развитие отечественной электроэнергетики. В том числе проведены комплексные исследования и технические разработки в обосновании новых классов напряжения системообразующей сети – 330, 500, 750, 1150 кВ, а также линий электропередачи постоянным током – ±100, ±400, ±750 кВ; выполнены комплексные исследования и предложены мероприятия по повышению устойчивости и надежности на разных этапах развития ЕЭС СССР (России) и входящих в нее энергосистем; предложены решения важных технических задач с использованием преобразовательной техники.

В настоящее время НТЦ ЕЭС является ведущим центром научного обоснования проектных решений по развитию энергосистем и управления ими в стационарных режимах и аварийных ситуациях.

*Кощеев Лев Ананьевич, д-р техн. наук, профессор, научный руководитель Научно-технического центра Единой энергетической системы (АО «НТЦ ЕЭС»). E-mail: ntc@ntcees.ru*