

**ЦЕНТР КОМПЕТЕНЦИЙ НТИ
на базе НИУ «МЭИ»**

**НИУ «МЭИ»
Центр компетенций НТИ
«Технологии транспортировки
электроэнергии и распределенных
интеллектуальных энергосистем»**

Белая книга

Белая книга Центра компетенций НТИ МЭИ «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» дает всесторонний обзор результатов деятельности и продуктов, разработанных в Центре, ставшем с момента его создания одним из важнейших субъектов технологического развития российской энергетики.

Белая книга подводит итоги пятилетней деятельности Центра НТИ МЭИ, в ней описаны ключевые реализованные проекты и созданные уникальные технологические разработки в сфере релейной защиты и автоматизации, цифровых электрических сетей и управления распределенной энергетикой.

Белая книга отражает открытую политику Центра НТИ МЭИ к сетевому партнерству в развитии энергетических технологий, включая создание кадровой и инфраструктурной поддержки для отрасли. Книга предназначена для широкой аудитории, включая организации и специалистов, занимающихся разработкой и применением решений в области транспортировки электроэнергии и интеллектуальных энергосистем. Она также будет полезна всем тем, кто стремится к углубленному пониманию современных тенденций и технологического уровня, достигнутого в области современных цифровых электрических сетях.

Группа подготовки издания:

Центр компетенций НТИ «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем», АНО «Центр энергетический систем будущего «Энерджинет».

Содержание

Национальная технологическая инициатива – программа технологического прорыва	4
Центр компетенций по технологиям транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем	6
Команда Центра НТИ МЭИ	8
Вместе к общей цели	10
Достижение технологического суверенитета России	12
Технологическое будущее электросетевого комплекса	16
Ключевые технологии Центра НТИ МЭИ	18
Продукты Центра НТИ МЭИ	29
Комплекс синтеза структурно-функциональных схем релейной защиты и автоматики цифровых подстанций ng.Grace	30
Интеллектуальная система релейной защиты и автоматики ng.AIR	32
Цифровой двойник энергосистемы	36
Автоматизированная система проведения испытаний	40
Автоматизированная система расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистемах	42
Интеллектуальная система энергоснабжения	44

Национальная технологическая инициатива – программа технологического прорыва

Национальная технологическая инициатива (НТИ) – долгосрочная комплексная программа поддержки сообщества технологических предпринимателей, нацеленного на достижение лидерства российских компаний на новых высокотехнологичных рынках, которые будут определять структуру мировой экономики в ближайшие годы.

Разработка НТИ началась в соответствии с поручением Президента России В.В. Путина по реализации послания Федеральному Собранию от 4 декабря 2014 года.

«Однако мы обязаны думать и о том, как будем решать перспективные проблемы. В этой связи предлагаю реализовать Национальную технологическую инициативу. На основе долгосрочного прогнозирования необходимо понять, с какими задачами столкнется Россия через 10-15 лет, какие передовые решения потребуются для того, чтобы обеспечить национальную безопасность, высокое качество жизни людей, развитие отраслей нового технологического уклада».



Путин В.В. Послание Президента Федеральному Собранию.
Kremlin.ru (4 декабря 2014 года)

Управление НТИ возлагается на президиум Совета по модернизации экономики и инновационному развитию и Межведомственную рабочую группу. Председателем Совета является Председатель Правительства РФ М.В. Мишустин; НТИ курирует заместитель Председателя Правительства А.Р. Белоусов. Соруководители рабочей группы: министр высшего образования и науки (В.Н. Фальков) и министр экономического развития (М.Г. Решетников).

Центры компетенций НТИ представляют собой сеть из 24 консорциумов на базе российских университетов и научных организаций, которые занимаются развитием «сквозных» технологий НТИ. Инициатива по их созданию стартовала в 2017 году, и с тех пор центры успешно реализуют свои задачи. Совокупный объем запланированной государственной поддержки Центров компетенций НТИ до конца 2024 года составит более 14,64 млрд рублей.

К основным задачам Центров компетенций НТИ относятся:

- **трансляция результатов фундаментальной науки в технологии:** «переложение» фундаментальных научных результатов и идей через прикладные исследования и разработки в конкретные технологии;
- **технологический трансфер:** создание опытных образцов нового оборудования и систем для решения задач индустриальных партнеров;
- **подготовка лидеров разработки новых технологий:** разработка и реализация образовательных программ инженерного профиля по сквозным технологиям.

По итогам 2018–2022 годов Центры компетенций НТИ достигли значительных результатов. Более 53 тысяч специалистов прошли обучение по образовательным программам Центров в области сквозных технологий. При непосредственном участии Центров было заключено более 2700 лицензионных соглашений на результаты интеллектуальной деятельности, созданные Центрами НТИ и (или) находящиеся под управлением Центров НТИ. Доходы Центров НТИ составили 23,44 млрд рублей.



В 2022 году 17 из 21 центров компетенций принимали участие в разработке новых стандартов или иных технологических документов, что отражает возрастающую роль центров НТИ как центров компетенций в области сквозных технологий.

Центры Национальной технологической инициативы являются важным инструментом для развития инновационной экономики в России. Они способствуют созданию новых технологий и продуктов, обучению специалистов и развитию инфраструктуры, что, в свою очередь, вносит вклад в повышение уровня жизни граждан, а также укрепление национальной безопасности и технологического суверенитета.

Центр компетенций по технологиям транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем

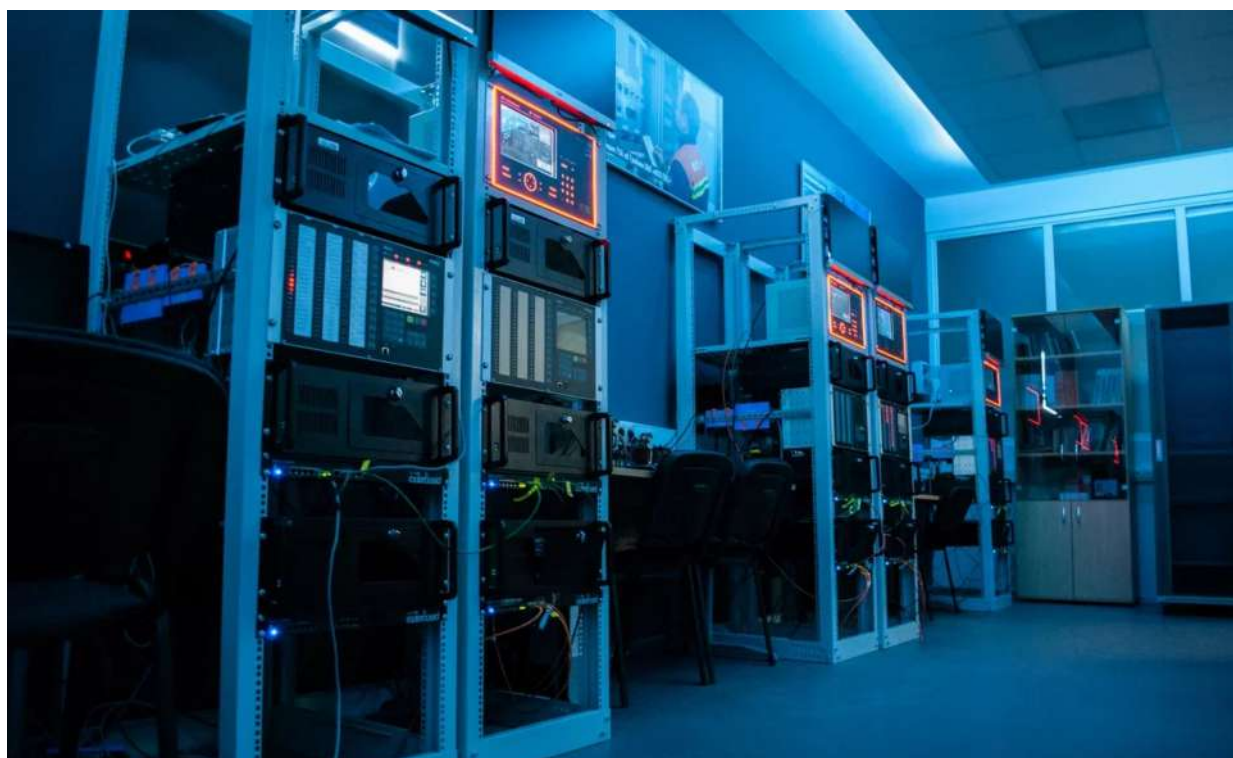
Центр компетенций НТИ по направлению «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (далее – Центр НТИ МЭИ) является одним из ключевых центров развития инновационных технологий в области энергетики и энергосбережения. Центр был создан в декабре 2018 года на базе кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем НИУ «МЭИ». Его деятельность была организована в рамках пятилетней программы.



nti.mpei.ru

Целью программы Центра НТИ МЭИ является развитие сквозных технологий, включая кадровое и инфраструктурное обеспечение, разработка технологических решений и продуктов в области технологий транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем посредством выполнения комплексных проектов НИОКР, а также реализация образовательных программ подготовки научных и инженерных кадров в интересах рынков Национальной технологической инициативы, прежде всего рынка НТИ Энерджинет.

Центр компетенций НТИ МЭИ работает в соответствии с сетевыми принципами: его задачи реализует распределенный коллектив, включая партнеров по коммерциализации технологий, объединившихся в консорциум под лидерством ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». В число участников консорциума Центра НТИ входит 24 организации, в т. ч. 8 вузов и 16 коммерческих компаний.



Научные и образовательные учреждения:

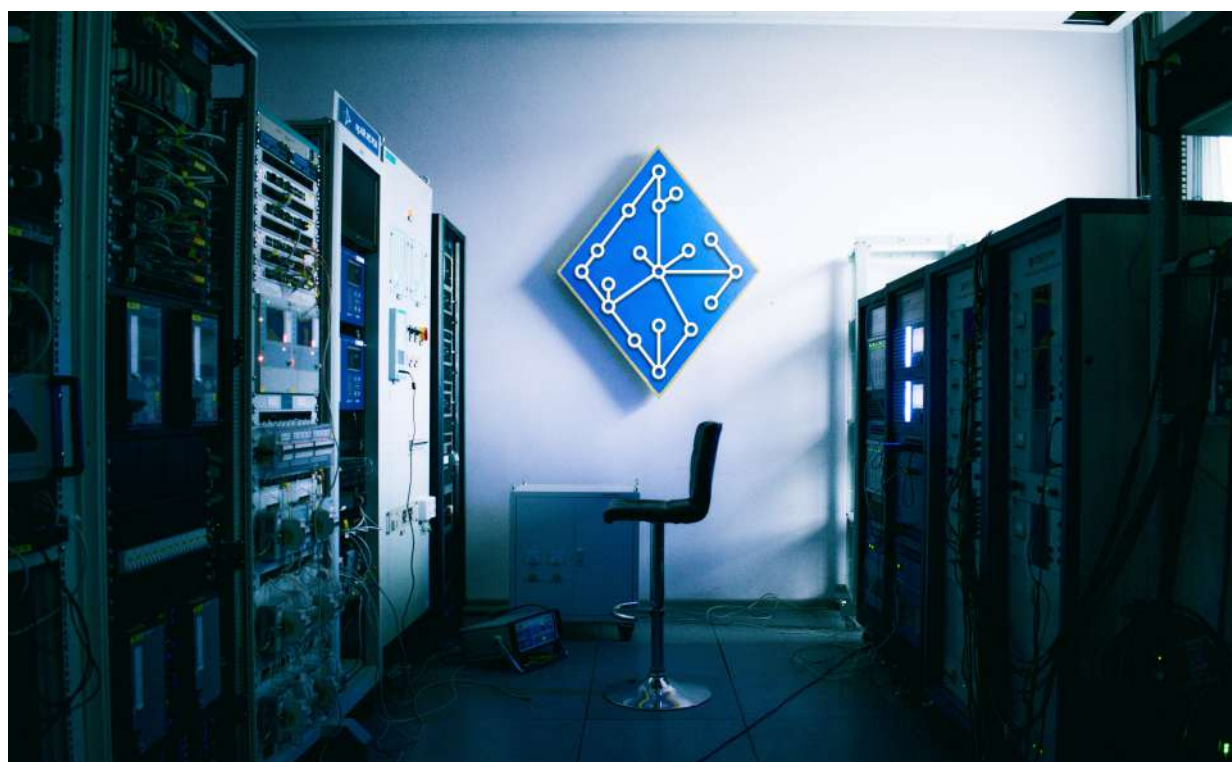
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», ФГАОУ ВО «НИУ «МИЭТ», АНО ВО «Сколковский институт науки и технологий», ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ФГАОУ ВО «УРФУ имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», ЧОУ ДПО «Центр работ под напряжением».

Партнеры из индустрии:

ООО «ИНБРЭС», АО «Гидроэлектромонтаж», ООО «ПиЭлСи Технолоджи», АО «РАДИУС Автоматика», ООО «Научно-технический центр комплексных проблем механотроники», ООО «Фирма ОРГРЭС», ООО «Тольяттинский Трансформатор», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», ООО «Прософт-Системы», ООО «СГК», АО «ЭлеСи», ООО «Группа компаний «ЭКСАРА», ООО «ЦПИ ЦОТЭ», ООО ИЦ «ЭнергоРазвитие», ООО «Цифровые энергосистемы», ООО «МЭЩ», ООО «Луч».

В рамках своей деятельности Центр НТИ МЭИ решает следующие задачи:

- разработка и внедрение технологий по направлению НТИ Энерджинет «Надежные и гибкие электросети», включая цифровые подстанции, интеллектуальные коммутационные аппараты, цифровые измерители электрических величин, универсальные измерительные контроллеры, программное обеспечение для управления сетями;
- разработка и внедрение технологий по направлению НТИ Энерджинет «Интеллектуальная распределенная энергетика», включая технологии интеграции в электросетевые комплексы объектов распределенной энергетики (в т. ч. на базе ВИЭ), накопителей электроэнергии, электрочрезвычайной инфраструктуры, а также технологии создания автономных самобалансирующихся микроэнергосистем;
- создание новых профилей подготовки в бакалавриате и магистратуре, потребность в которых обусловлена внедрением новых технологий в электроэнергетике, и курсов повышения квалификации по разработанным совместно с участниками консорциума программам;
- создание испытательного полигона технологий транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем, а также создание демонстрационного полигона интеллектуальных систем управления микроэнергосистемами.



Команда Центра НТИ МЭИ



Волошин Александр Александрович

директор Центра компетенций НТИ «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем»,

заведующий кафедрой РЗиАЭ НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент, почетный доктор электротехники, чл.-корр. АЭН РФ

voloshinaa@mpei.ru



Лебедев Андрей Анатольевич

начальник отдела по работе с иностранными заказчиками, доцент кафедры РЗиАЭ НИУ «МЭИ», к.т.н.

lebedevanda@mpei.ru



Волошин Евгений Александрович

начальник отдела научных исследований

voloshinya@mpei.ru



Сафронов Борис Андреевич

начальник отдела подготовки кадров,
заместитель заведующего кафедрой РЗиАЭ НИУ «МЭИ»
по учебной работе
safronovba@mpei.ru



Серов Дмитрий Михайлович

начальник Центра коллективного пользования
serovdm@mpei.ru



Леднев Александр Николаевич

начальник отдела выполнения инжиниринговых работ
lednevan@mpei.ru



Центр компетенций НТИ на базе НИУ «МЭИ»

111250, Москва, Российская Федерация, ул. Красноказарменная д. 17

+7 (495) 362-74-77

nti@mpei.ru

Вместе к общей цели

Основные итоги деятельности Центра НТИ МЭИ

«За пять лет работы Центр НТИ МЭИ выполнил все целевые показатели и попал в топ-5 лидеров по результативности реализации программы среди всех центров компетенций НТИ. Прежде всего необходимо отметить такие результаты, как разработка самовосстанавливающейся интеллектуальной системы защиты и автоматики цифровых подстанций на мультиагентном принципе взаимодействия, разработка цифрового моделирующего комплекса режимов работы энергосистем в реальном времени, создание современной испытательной инфраструктуры и запуск обучения по программам высшего образования для подготовки специалистов энергетического комплекса нового поколения, сочетающих знания в области электроэнергетики и информационных технологий.»



Центру также удалось преодолеть изначальную «заточенность» на один рынок - НТИ Энерджинет, - выйти за пределы классической энергетики и показать свою востребованность в Технете, Аэронете и Сейфнете. Разработки МЭИ находят себя как в крупных городах, так и в удаленных от центральной инфраструктуры поселках и помогают жителям в различных регионах. Наверное, этот полезный практический результат - самое важное в нашей работе».

В.В. Медведев – Генеральный директор Фонда поддержки проектов Национальной технологической инициативы

За время работы Центра НТИ МЭИ достигнуты следующие основные показатели:

- обеспечена подготовка 620 специалистов по основным образовательным программам высшего образования и дополнительным образовательным программам;
- заключено 43 лицензионное соглашение на продукты Центра НТИ МЭИ;
- от коммерческой деятельности Центра НТИ МЭИ получен доход порядка 600 млн рублей;
- получено 35 охраняемых результатов интеллектуальной деятельности.

Центром НТИ МЭИ разработаны решения, обеспечивающие преодоление технологических барьеров по следующим направлениям:

- коллективное планирование функционирования и развития инфраструктур на основе цифровых моделей реального времени;
- средства и инструменты порождающего проектирования систем управления;
- решения на основе динамически самоорганизующихся мультиагентных систем управления;
- комплексные решения для цифровых подстанций и цифровых сетей среднего и низкого напряжения, микросетей и энергетической инфраструктуры зданий;

- совмещенное управление оперативным функционированием и изменением технических параметров оборудования и активов энергетических систем и рисков их выхода из строя в режиме реального времени для оптимизации стоимости владения на жизненном цикле;
- управление виртуальными агрегированными объектами генерации, хранения и потребления энергии (мощность генерации >5 МВт);
- прогнозирование потребления энергии на основе пользовательских данных в режиме реального времени;
- открытые платформы для технологических и коммерческих сервисов;
- развитие отечественных инструментов для моделирования работы энергосистем в режиме реального времени.



Среди образовательных программ высшего образования, разработанных Центром НТИ МЭИ, наиболее востребованными у студентов являются следующие:

- **«Интеллектуальные системы защиты, автоматики и управления энергосистемами»** по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (магистратура). За три года прошло обучение более 50 человек.
- **«Цифровые технологии в электроэнергетике»** по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат), разработана совместно с ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (участник консорциума) и реализуется в сетевой форме. За 4 года на обучение поступило суммарно более 70 человек, а первый выпуск состоится в 2024 году.

Кроме того, Центром НТИ МЭИ разработана 21 программа ДПО в формате курсов повышения квалификации, раскрывающих различные аспекты применения современных цифровых технологий в электрических сетях.

После окончания государственного финансирования Центр НТИ МЭИ планирует сохранить действующую организационную структуру, эффективность которой была подтверждена за период реализации программы. В течение 2023–2025 гг. Центр НТИ МЭИ сфокусирует свои усилия в области коммерциализации полученных в рамках программы РИД по следующим двум ключевым направлениям.

- Интеллектуальные системы защиты и автоматики для объектов электроэнергетики на базе технологий «Цифровая подстанция».
- Платформа предоставления цифровых сервисов на основе ПАК «Цифровой двойник энергосистемы» (ЦДЭС).

Достижение технологического суверенитета России

«Правительство активно работает над формированием инновационного образа будущего энергетической отрасли. Для обеспечения технологического суверенитета разрабатываются решения, которые в дальнейшем будут применяться в ТЭК, – это интеллектуальные системы защиты и управления, цифровые двойники, различные решения на основе методов ИИ для прогнозирования состояния оборудования и режимов работы энергосистем. Значительное внимание уделяется обеспечению кибербезопасности.



Центр НТИ МЭИ занимает особое место в экосистеме отраслевых центров компетенций, так как работает не просто над импортозамещением, а преодолением технологических барьеров и созданием новых прорывных технологий, во многом опережающих лучшие мировые разработки. В частности, значимыми результатами являются интеллектуальные системы защиты и автоматизации энергосистем, интеллектуальная система проектирования на базе применения методов ИИ, а также моделирующий комплекс реального времени «Цифровой двойник Энергосистемы». Разработки Центра успешно прошли испытания в реальных условиях эксплуатации и подтвердили свою эффективность. Следующим важным этапом деятельности Центра НТИ МЭИ должен стать трансфер технологий, стандартизация и их практическое внедрение в виде готовых продуктов».

А.В. Новак – Заместитель Председателя Правительства Российской Федерации

Россия сталкивается с проблемой технологической зависимости от зарубежных компаний и стран, что препятствует развитию отечественных технологий и инноваций, а также представляет угрозу национальной безопасности. На конференции «Цифровая индустрия промышленной России» в 2022 г. Председатель Правительства Российской Федерации М.В. Мишустин призвал к созданию индустриальных центров компетенций для импортозамещения в ключевых отраслях экономики, а также объединить усилия заказчиков и разработчиков по созданию и внедрению новых цифровых продуктов. В феврале 2023 года Президент Российской Федерации В.В. Путин также отметил, что в течении короткого срока с целью обеспечения технологического суверенитета России предстоит создать и вывести на новый уровень собственные критически важные технологии в энергетике, микроэлектронике, информационных технологиях, промышленности, транспорте и медицине, чтобы обеспечить технологический суверенитет. Решать задачи технологического суверенитета принципиально важно посредством создания технологической основы для перехода к новому технико-экономическому укладу в противоположность логике «догоняющего развития». Энергетическая отрасль в связи с необходимостью решения климатических, геополитических и экономических проблем в настоящее время переживает фундаментальную трансформацию по всему миру.

За 5 лет деятельности Центра НТИ МЭИ было реализовано несколько ключевых проектов и получены значимые технологические результаты по целому ряду актуальных направлений цифровой трансформации электроэнергетики. Особое значение среди них имеет программно-аппаратный комплекс реального времени «Цифровой двойник энергосистемы». До сих пор для

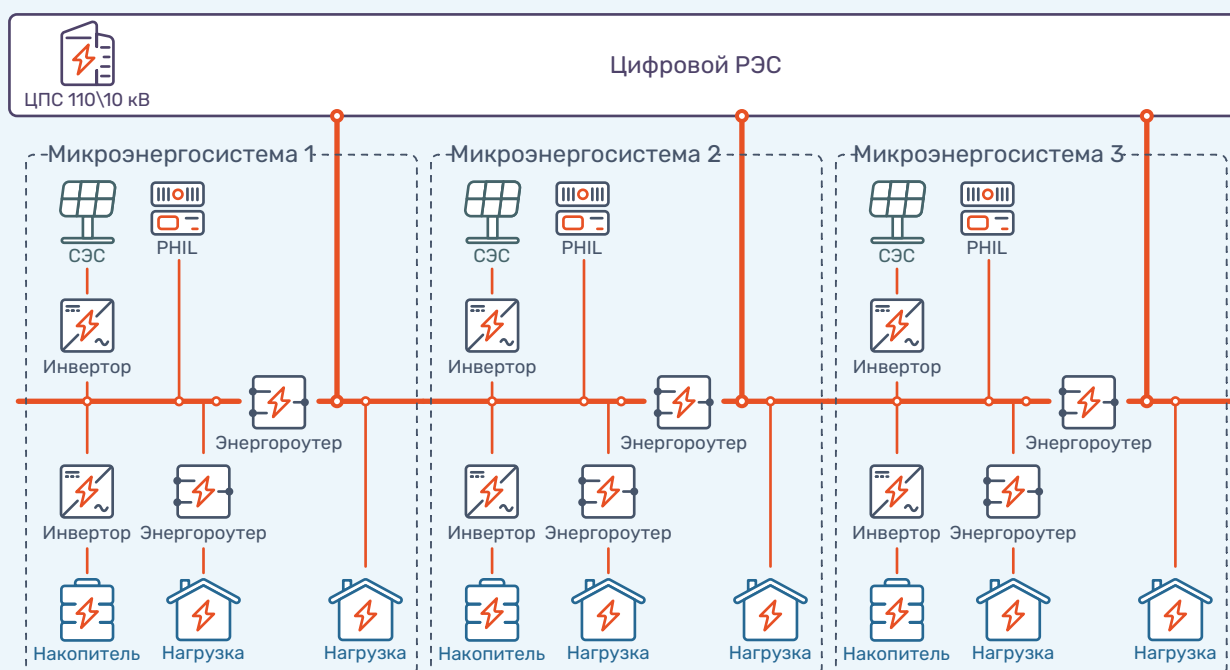
разработки и испытаний новых цифровых систем защиты и автоматики для электроэнергетических систем используется иностранный комплекс (Real Time Digital Simulator - RTDS). Он является «золотым стандартом» в отрасли и применяется всеми мировыми лидерами: Siemens, ABB, GE и др., ведущие иностранные ВУЗы, R&D центры.

В России в соответствии с нормативно-техническими требованиями ПАО «Россети» и АО «СО ЕЭС» регламентировано применение именно ПАК RTDS для проведения аттестационных и сертификационных испытаний цифровых систем защиты и автоматики энергосистем. Многие ведущие российские вузы, отраслевые институты, научные центры и производители цифрового оборудования используют ПАК RTDS в своей работе.

В 2022 г. компания RTDS Technologies прекратила деятельность на российском рынке и больше не выполняет поставку, техническое обслуживание и обновление уже поставленного оборудования и программного обеспечения. В настоящее время в России отсутствуют собственные разработки и какие-либо альтернативные комплексы цифрового моделирования энергосистем в реальном времени, обладающие требуемыми функциями и характеристиками. В связи с этим Центр НТИ МЭИ выполняет разработку российского моделирующего комплекса реального времени «Цифровой двойник энергосистемы» (ПАК «ЦДЭС»). Демонстрационная версия продукта, созданная в рамках Программы Центра НТИ МЭИ, была представлена уже в декабре 2022 г. В 2023 г. осуществляется первая коммерческая реализация для нужд Федерального Испытательного Центра (ПАО «Россети»). Внедрение ПАК «ЦДЭС» будет способствовать обеспечению технологического суверенитета в области разработки, испытаний и аттестации, проектирования, внедрения и эксплуатации цифровых устройств и систем защиты и автоматики энергосистем.

Инфраструктурная деятельность

В рамках инфраструктурного направления деятельности Центра НТИ МЭИ в 2018 году был запущен Центр коллективного пользования «Испытательный полигон технологий транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем». В структуре Испытательного полигона функционирует испытательная лаборатория «Цифровая подстанция». Для расширения функциональных возможностей испытательного полигона создается «Демонстрационный полигон интеллектуальных систем управления микрогрид». В состав данного полигона входят 3 микроэнергосистемы мощностью 75 кВА, включающие в себя энерго-роутеры, СЭС и накопители электроэнергии.



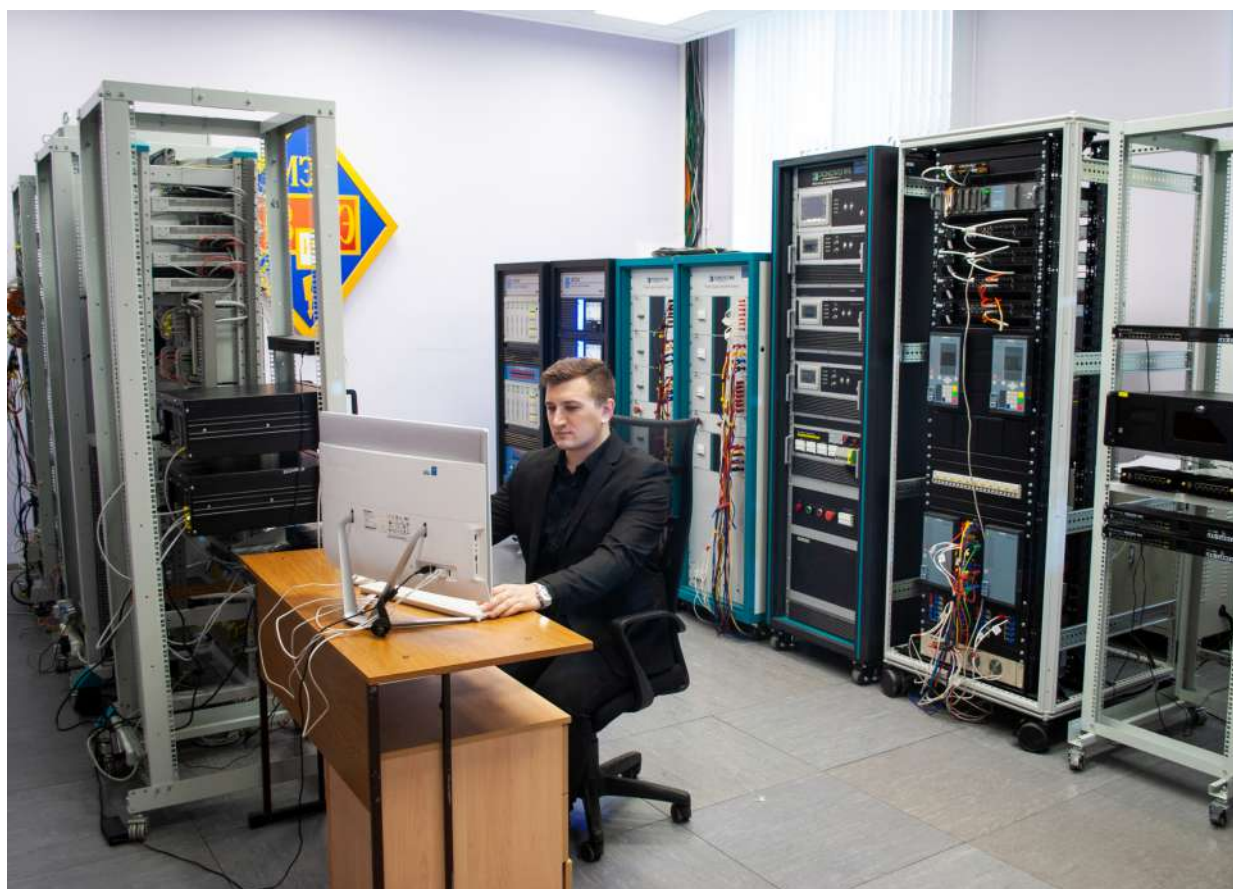
Архитектура демонстрационного полигона интеллектуальных систем управления микрогрид

Создание специализированного Испытательного полигона обеспечивает возможности:

- проведения исследований на большом количестве верифицированных моделей энергосистем в режиме реального времени;
- разработки и испытаний новых устройств и систем автоматического управления и защиты;
- разработки и испытаний новых типов силовых устройств с подключением их к киберфизическим моделям реального времени;
- проведения исследований функционирования микроэнергосистем с различной архитектурой.

Испытательный полигон Центра НТИ МЭИ с 2019 года включает в себя уникальный испытательный комплекс TestBed Энерджинет, созданный в рамках проекта «Архитектура IoEN» при поддержке Фонда НТИ. Физическая часть полигона TestBed Энерджинет представлена электродинамической моделью энергосистемы, включая установки ВИЭ, четырехкватратные усилители, а также цифровые системы защиты и автоматического управления. В декабре 2020 года в структуре Испытательного полигона Центра НТИ МЭИ был создан лабораторный комплекс кибербезопасности, предназначенный для проведения натурных испытаний в области безопасности информационной инфраструктуры электроэнергетических объектов. Основными задачами комплекса являются отражение угроз в энергетической отрасли, разработка новых методов защиты информации, а также обучение специалистов в области цифровой энергетики и информационной безопасности.

Объединение функционала испытательного комплекса TestBed Энерджинет и лабораторного комплекса кибербезопасности привело к созданию Киберполигона, что позволило расширить возможности проведения исследований в области кибербезопасности и разработки новых технологий. В 2021 году Киберполигон Центра НТИ МЭИ присоединился к Национальному киберполигону в рамках сотрудничества с ООО «РТК ИБ».



В 2022 году структура Испытательного полигона была расширена созданием учебно-демонстрационного комплекса по изучению работы локальных вычислительных сетей промышленных предприятий и цифровых подстанций для реализации программ повышения квалификации и переподготовки. Комплекс также предназначен для проведения испытаний устройств РЗА, что позволяет оценивать эффективность работы современных решений для высокоавтоматизированных объектов электроэнергетики.

Центр коллективного пользования Центра НТИ МЭИ позволяет участникам Консорциума и другим энергетическим организациям проводить цифровое и киберфизическое моделирование сложных электроэнергетических систем, а его возможности значительно превышают возможности многих других доступных лабораторий в России.

Образовательная деятельность

Специалистами Центра разработаны и запущены 4 новые образовательные программы, а также 21 программа ДПО. Выпускники новой программы магистратуры «Интеллектуальные системы защиты, автоматизации и управления энергосистемами», разработанной и реализуемой Центром НТИ МЭИ, являются призерами Всероссийского конкурса выпускных квалификационных работ технических вузов по электроэнергетической и электротехнической тематикам с 2020 года. Данная программа разработана специалистами Центра НТИ МЭИ при поддержке ПАО «ФСК ЕЭС» в рамках реализации плана Минэнерго России по цифровой трансформации электроэнергетики и реализована на базе «Национальный исследовательский университет «МЭИ». Студенты нового направления получают необходимые знания для преодоления технологических барьеров ДК Энерджинет.

По дополнительному образованию Центр предлагает программы профессиональной переподготовки, программы повышения квалификации с выдачей удостоверения, стажировки в научных и исследовательских лабораториях, а также семинары с выдачей сертификата.

Дополнительное образование реализуется по следующим направлениям: Цифровые комплексы АСУ ТП; Наладка и испытания МП устройств РЗА соответствующих МЭК 61850; Локальные вычислительные сети и протоколы передачи данных; Основы кибербезопасности в электроэнергетике. Обучение проводится в том числе с применением дистанционных образовательных технологий.

Международная деятельность

В рамках международной деятельности в 2022 году Центр НТИ МЭИ начал реализацию научного проекта «Analysis and Control Technologies of Smart Grid Based on Artificial Intelligence» в сотрудничестве с международными партнерами Southeast University и NARI International company (Китай), а также Federal University of Rio de Janeiro, State Grid Brazil Holding Company и Federal University of Itajubá (Бразилия). Этот проект был признан победителем 5-го конкурса многосторонних проектов Рамочной Программы БРИКС в сфере науки, технологий и инноваций. Основная цель проекта заключается в разработке интеллектуальных систем анализа режимов и управления электроснабжением распределенных электрических сетей с использованием ВИЭ и накопителей для повышения их гибкости и надежности. Для достижения этой цели в работе используются специальные методы искусственного интеллекта, такие как мультиагентные системы, онтологии, базы знаний и методы логического вывода, которые базируются на разработках Центра НТИ. Они позволяют выявлять и прогнозировать нарушения в режимах электро-снабжения распределительных электрических сетей.

Технологическое будущее электросетевого комплекса

Распределительные электрические сети сегодня стремятся найти свой будущий облик, отвечая на актуальные вызовы времени в быстро меняющемся технологическом контексте. Эти вызовы определяются, с одной стороны, растущим спросом на мощность, а значит – ростом нагрузки на электросетевую инфраструктуру, с другой стороны, ужесточением запросов потребителей к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии, а также расширением состава абонентов электрических сетей за счет активных потребителей, зарядной инфраструктуры электро-транспорта, просьюмеров, распределенной генерации и систем накопления электроэнергии.

Технологический ландшафт, в котором сегодня существуют электрические сети, также меняется за счет появления цифровых технологий, обеспечивающих возможность глубокой автоматизации и интеллектуализации работы сетей, а также позволяющих сетевым компаниям формировать новые бизнес-модели и находить источники нетарифной выручки.

Значимые достижения в развитии цифровых технологий, связанных с использованием баз знаний, машинного обучения и других элементов искусственного интеллекта, геоинформационных систем, цифровых двойников, решением задач оптимального управления и мультиагентных систем, сказываются на возможностях управления сетевым комплексом на всех стадиях жизненного цикла. Автоматизируются и ускоряются процессы проектирования и строительства, растет качество управления этими процессами, снижаются риски ошибок и нахождения неоптимальных решений. Повышается качество технического обслуживания и ремонтов, планирования замены и модернизации оборудования. За счет оптимизации и расширения возможностей оперативного автоматизированного и автоматического управления передачей электрической энергии повышается ее качество, растет надежность электроснабжения. Наконец, помимо снижения частоты и длительности аварийных режимов растет скорость восстановления электроснабжения в послеаварийных режимах вплоть до обретения сетями свойства самовосстанавливаемости. В конечном счете перечисленные технологические возможности позитивно влияют на экономику сетевого комплекса: в ближайшем будущем за счет передовых технологий надежность электроснабжения и качество электроэнергии будут расти без одновременного роста стоимости владения сетевыми активами.

Наиболее радикальное технологическое изменение в облике и работе сетевого комплекса происходит в настоящее время за счет развития кибер-физических технических решений на основе коммутационных аппаратов и силовой электроники, позволяющих управлять перетоками мощности в сети. Быстродействующее автоматическое коммутационное оборудование и устройства, управляющие перетоками мощности за счет силовой преобразовательной техники позволяют, во-первых, эффективно интегрировать в сеть новые типы абонентов – просьюмеров, распределенную электронную генерацию на основе ВИЭ, системы накопления электроэнергии. Во-вторых, такие технические решения дают возможность создавать распределительные сети с кольцевой и сложно-замкнутой топологиями. Это, в свою очередь, открывает принципиально новый подход к строительству сетей и управлению ими, снижает потребность в землеотводе, числе центров питания, существенно повышает надежность и, главное, позволяет новым типам абонентов активно участвовать в рынках электроэнергии, мощности и системных услуг, предоставлять энергосистеме свои источники энергетической гибкости, формировать для новых типов абонентов локальные рынки энергии и гибкости.

Таким образом, технологическое развитие сетевого комплекса создает сегодня предпосылки для формирования Интернета энергии – типа и состояния энергосистемы, в которой оптимальное управление осуществляется на основе транзакций между ее субъектами, включая просьюмеров, и потребителями, в том числе активными. Электрические сети – с новым технологическим пакетом, новыми топологиями и управлением перетоками мощности – выступят инфраструктурой такого Интернета энергии и будут обеспечивать физическое воплощение, реализацию энергетических транзакций между своими абонентами.

Технологическое будущее электрических сетей оказывается связано с возрастающей сложностью сети, разнообразием ее абонентов, возрастающей сложностью картины перетоков мощности и задачи обеспечения качества электроэнергии и надежности электроснабжения в этих условиях. Но переход к транспорту электроэнергии именно в такого рода сети – насущная задача ближайшего будущего, отвечающая запросам потребителей, а цифровые и кибер-физические технологические решения позволят найти ее эффективное решение.



Ключевые технологии Центра НТИ МЭИ

Современный электросетевой комплекс сталкивается с рядом вызовов, требующих качественного технологического изменения сетевой инфраструктуры, оказываемых услуг и рабочих процессов сетевых компаний. Эти вызовы связаны с нарастающим износом основных активов, ростом спроса на электроэнергию, появлением потребителей с более высокими требованиями к качеству электроэнергии и надежности энергоснабжения (так называемого «цифрового» спроса), а также распространением абонентов нового типа: распределенной генерации, владельцев систем накопления энергии, просьюмеров, зарядных станций для электротранспорта. Для ответа на эти вызовы в среднесрочной перспективе будут востребованы новые подходы к построению и работе электрических сетей, в целях воплощения которых необходимы новые технологии.

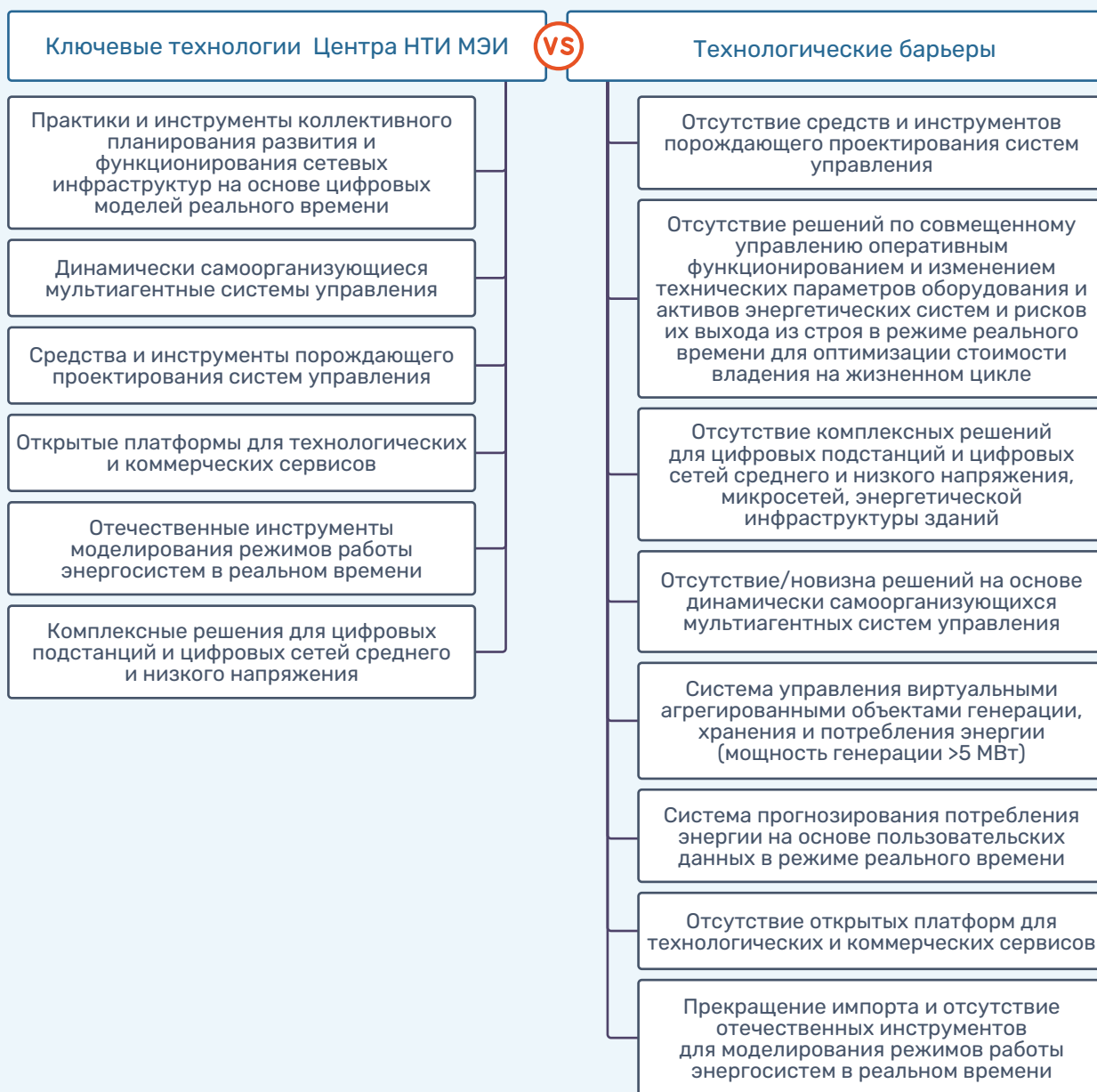
Программа деятельности Центра НТИ МЭИ нацелена на развитие перспективных технологий в области электрических сетей и распределенной энергетики. Эти технологии призваны придать электроэнергетической инфраструктуре новые свойства, среди которых ключевыми являются следующие.

- **Адаптивность.** Электрические сети должны обеспечивать надежный транспорт электроэнергии к потребителям и быть способными адаптироваться к появлению новых типов абонентов, а также оперативным изменениям в производстве и потреблении энергии, обеспечивая бесперебойность работы и качество электроэнергии в любых условиях.
- **Самовосстанавливаемость.** Электрические сети должны обладать способностью к быстрому восстановлению энергоснабжения при возникновении аварийных режимов без участия людей. Самовосстановление должно включать в себя автоматическое обнаружение и локализацию проблемных участков сети, переключение на резервные источники питания, быструю диагностику и устранение неисправностей и аварийных участков.
- **Интеллектуальность.** Электрические сети должны быть оснащены современными информационными технологиями и решениями, которые позволяют собирать, анализировать и использовать большие объемы данных для технологического управления. Интеллектуальные системы позволят оптимизировать управление потоками мощности, прогнозировать спрос на энергию и ее выработку, а также эффективно реагировать на изменения в режиме реального времени.
- **Клиентоориентированность.** Электрические сети должны быть способны поддерживать интеграцию новых типов абонентов, в том числе в работу сетевых сервисов, а также обеспечивать исполнение динамических сделок между производителями и потребителями электроэнергии.
- **Двунаправленная передача электроэнергии.** В распределительной сети и на стороне потребителей ожидается массовое появление распределенных источников электроэнергии и энергетической гибкости. Электрические сети должны эффективно обеспечивать двунаправленные потоки мощности, связанные с этими источниками.

Для перехода к электрическим сетям с представленными новыми свойствами требуется решение ряда принципиально важных технологических задач:

- переход к **быстрому и гибкому проектированию электрических сетей** и объектов электро-сетевого комплекса, основанному на порождающем моделировании, использовании баз знаний и максимальной автоматизации процессов проектирования;
- обеспечение возможности **децентрализованного оперативного управления** электрическими сетями, в частности, управления надежностью и восстановления электроснабжения в послеаварийном режиме;
- оптимизация практик управления производственными активами сетевой инфраструктуры, в частности, с использованием риск-ориентированного подхода;
- обеспечение поддержки **динамически изменяющихся** перетоков мощности в связи с интеграцией новых абонентов в сеть и управления ими.

Решение перечисленных задач связано с преодолением ряда технологических барьеров, вызванных **отсутствием** или **недостаточным уровнем разработки** в России ряда ключевых технологий и практик. Программа работы Центра НТИ МЭИ нацелена на преодоление этих барьеров и получение описанных далее практически значимых технологических результатов.



Практики и инструменты коллективного планирования развития и функционирования сетевых инфраструктур на основе цифровых моделей реального времени

Решения по коллективному планированию развития и функционирования сетевых инфраструктур в электроэнергетике помогают энергетическим компаниям оптимизировать работу электро-сетевого комплекса за счет большей эффективности. К основным инструментам этого подхода относятся системы прогнозирования и оптимизации. Анализируя исторические данные, они прогнозируют потребление энергии и техническое состояние энергетических объектов, что позволяет оптимизировать функционирование электрических сетей. Такие системы помогают энергетическим компаниям принимать обоснованные решения о расширении и модернизации инфраструктуры.

Ключевой проект

Разработка **системы автоматического планирования работ по техническому обслуживанию и ремонтам на основе риск-ориентированной модели для оптимизации операционных затрат и обеспечения операционной надежности микроэнергосистем (ПТК АПР)** позволяет преодолеть барьер по внедрению технологий перехода к риск-ориентированной модели проведения ремонтов и технического обслуживания энергооборудования. Полученные результаты планируется использовать для построения системы управления производственными активами для предприятий топливно-энергетического комплекса (СУПА ТЭК) посредством интеграции в виде цифрового сервиса в ПАК «ЦДЭС», выступающего единой базовой платформой интеллектуального управления энергообъектом.

Основная цель

Разработка программного комплекса планирования технического обслуживания и ремонтов (ТОиР), обеспечивающего более высокую надежность работы систем электроснабжения и снижение операционных затрат.

Уникальность

Разработанные алгоритмы позволяют перейти от планово-предупредительного ремонта (ППР) к ТОиР на основе фактического технического состояния. Вместо замены или обслуживания оборудования в соответствии с заранее запланированным графиком система позволяет определить **оптимальное время** для проведения ТОиР на основе реального и прогнозируемого состояний каждого элемента оборудования.

В рамках этой работы создан алгоритм планирования работ по техническому обслуживанию и ремонтам оборудования, который формирует планы исходя из величин экономических рисков. **Риск-ориентированная** модель основывается на минимизации ущерба и показателей надежности SAIDI и SAIFI, а также достижениях максимальных значений индексов технического состояния (ИТС) оборудования при заданных вложениях в ремонты оборудования.

Система **предиктивной аналитики** технического состояния оборудования основана на расчете ИТС оборудования. Используя данные с датчиков и из других источников, система вычисляет параметры работы оборудования и ИТС, который отражает текущее состояние каждого элемента оборудования. Для прогнозирования ИТС по измерениям, проведенным в течение нескольких лет, используется **рекуррентная нейронная сеть**. Вероятность отказа прогнозируется на основе статистических данных и базируется на полученных значениях ИТС.

Эффекты

Использование ПТК АПР позволяет снизить издержки и трудозатраты на проведение ремонтов и повысить экономическую эффективность эксплуатации основного и вспомогательного технологического оборудования энергообъектов.

Ключевой проект

Проект **внедрения накопителей электроэнергии и ВИЭ в электрических сетях** направлен на упрощение процесса интеграции возобновляемых источников электроэнергии и систем накопления электроэнергии в электрические сети и системы электроснабжения потребителей. Результаты работы легли в основу разработки ПТК управления накопителями электроэнергии.

Основная цель

Разработка основных технических решений по внедрению накопителей электроэнергии и ВИЭ в электрических сетях.

Уникальность

Разработанный алгоритм оптимального управления режимом работы накопителя электроэнергии maximизирует эффективность использования мощности ВИЭ, отличающихся от традиционных источников стохастическим характером генерации электроэнергии. Решение оптимизационной задачи выработки последовательности команд управления реализовано при помощи **метода штрафных функций**.

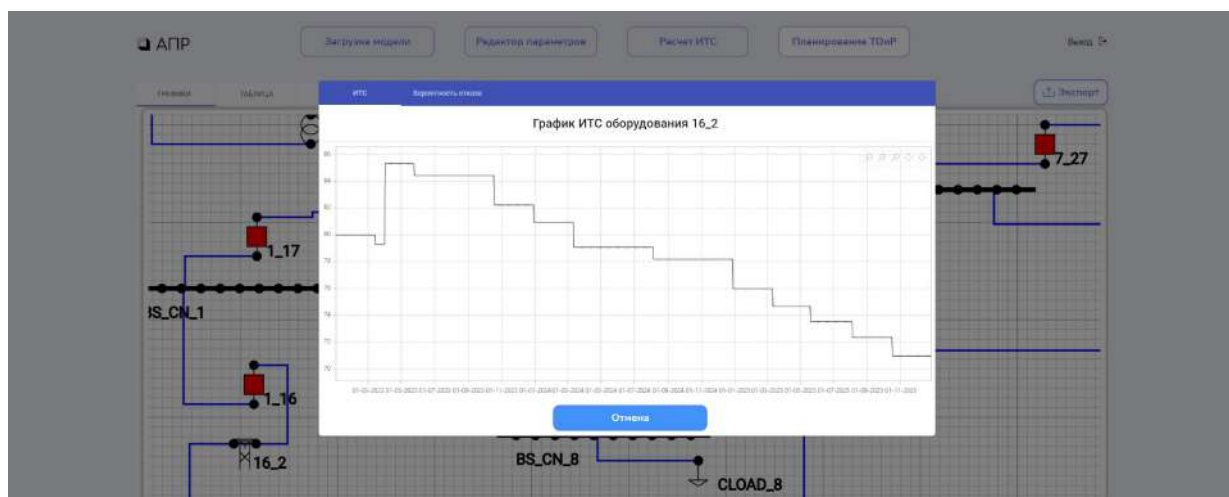
Метод штрафных функций основан на численном решении задач нелинейной оптимизации, а сам процесс решения состоит из нескольких итераций. На каждой итерации решается задача безусловной оптимизации, в которой целевая функция модифицируется добавлением штрафных слагаемых, учитывающих нарушение ограничений. После каждой итерации значения штрафных параметров увеличиваются, чтобы усилить влияние штрафных слагаемых на решение. Цель метода штрафных функций заключается в нахождении оптимума, при котором ограничения будут удовлетворены наилучшим образом.

Выбранный метод учитывает негативные последствия, вызванные перезарядом и переразрядом накопителя, наличие дисбаланса генерации и потребления электроэнергии на заданном интервале регулирования, потребление топлива резервным генератором и снижение его ресурса, а также штраф за отключение управляемой нагрузки потребителей и прочее.

Для определения дисбаланса электроэнергии в алгоритме используются две модели машинного обучения: **рекуррентная нейронная сеть со слоем долгой краткосрочной памяти** для прогнозирования потребления и ветрогенерации и **трехслойная MLP-модель** с 100 нейронами в скрытом слое для прогнозирования солнечной генерации.

Эффекты

Разработанное программное обеспечение по управлению накопителем электроэнергии позволяет обеспечить эффективное использование мощностей ВИЭ при ограниченном ресурсе накопителей.



Динамически самоорганизующиеся мультиагентные системы управления

Использование самоорганизующихся систем дает возможность распределенного управления электрическими сетями. Это позволяет более эффективно организовывать работу сложных, динамически изменяющихся сетей, обеспечивает высокую надежность энергоснабжения, а также обеспечивает интеграцию распределенных источников энергии.

Динамически самоорганизующиеся мультиагентные системы образованы несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами. В таких системах агенты – физические устройства или программные модули обладают автономией, интеллектуальными функциями и ограниченной зоной ответственности, что позволяет им обрабатывать информацию, принимать решения и выполнять действия в соответствии с локальными правилами и целями. При этом агенты также обмениваются информацией и координируют свои действия друг с другом для достижения глобальных целей системы.

Применение динамически самоорганизующихся мультиагентных систем управления в электросетевом комплексе предоставляет следующие преимущества.

- **Гибкость и адаптивность.** Агенты способны быстро адаптироваться к изменениям в сети и принимать решения на основе актуальной информации.
- **Децентрализованное управление.** Каждый агент функционирует автономно, что позволяет распределить управление сетью и повысить ее отказоустойчивость.
- **Сотрудничество и координация.** Агенты взаимодействуют и сотрудничают друг с другом, обмениваясь информацией и координируя свои действия для достижения общих целей.
- **Интеллектуальность и оптимизация.** Агенты применяют алгоритмы и методы искусственного интеллекта для анализа данных, оптимизации работы сети и повышения эффективности.

Ключевой проект

Распределенная интеллектуальная система управления режимами электроэнергетической системы по напряжению и реактивной мощности (ПТК РИСУ) позволяет провести комплексную оценку эффективности применения самоорганизующихся мультиагентных систем управления и тем самым снизить барьер, связанный с недостаточным развитием практики применения подобных систем.

Основная цель

Разработка технологии децентрализованного управления группами подстанций на основе мультиагентных систем с целью снижения технических потерь за счет управления средствами компенсации реактивной мощности.

Уникальность

За счет использования **мультиагентного подхода система** осуществляет распределённое управление и оптимизацию режимов передачи в условиях динамически меняющейся топологии сети.

При решении задачи управления режимами в сети производится разделение энергосистемы на отдельные ограниченные области (энергокластеры) с присвоением каждому собственного агента. Каждый отдельный агент решает задачу **локальной оптимизации** в рамках заданного энергокластера, а посредством взаимодействия агентов друг с другом производится **глобальная распределенная оптимизация** режима энергосистемы в целом.

Задача оптимизации заключается в минимизации потерь внутри энергокластера с поддержанием перетоков мощностей по ветвям и напряжений в узлах. Она решается каждым агентом с помощью **модифицированного метода градиентного спуска**.

Эффекты

Снижаются технические потери электроэнергии и затраты на транспортировку электроэнергии в магистральных сетях, увеличивается эффективность использования и продлевается ресурс средств компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения.

Ключевой проект

Распределенная интеллектуальная система управления микроэнергосистемами (ПТК РСУМ) позволяет оценить эффективность использования самоорганизующихся мультиагентных систем управления в электрических сетях с существенной долей распределенной генерации.

Основная цель

Разработка алгоритмов распределенного управления электрическими сетями (микроэнергосистемами) с ВИЭ с целью обеспечения баланса мощности, надежного энергоснабжения потребителей, а также быстрого автоматического восстановления энергоснабжения после аварий.

Уникальность

Использование **мультиагентного подхода** позволяет организовывать **локальные рынки электроэнергии** и, с помощью торгов между агентами, балансировать спрос и предложение, потребление и генерацию электроэнергии в полностью автоматическом режиме, а также распределить функции обеспечения надежности и противоаварийной автоматики.

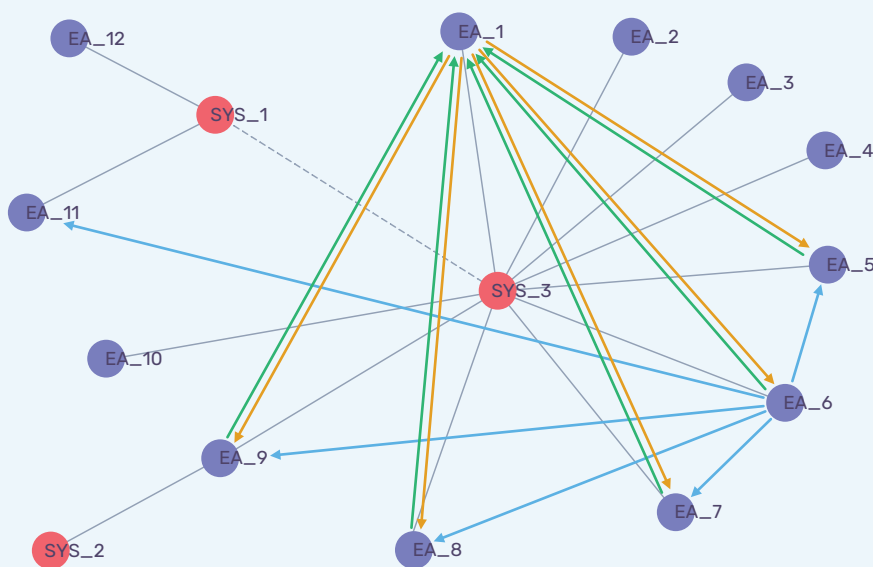
В этой системе каждый узел сети является **самостоятельным агентом**, работающим над достижением своих целей. Агенты потребителей стремятся обеспечить бесперебойное электроснабжение в соответствии с графиком нагрузки по наименьшей цене, агенты производители электроэнергии стремятся произвести и реализовать на локальном рынке как можно больше энергии по наибольшей цене.

В системе применяется **многоранговый и одноранговый английские (открытые) аукционы**, где входными данными для инициализации являются текущие измерения и прогноз потребления на час или сутки вперед. Помимо прогноза потребитель может задавать требуемый объем электрической энергии и максимальную мощность.

Для обеспечения баланса мощности алгоритм допускает отключение менее важных потребителей в качестве крайней меры для сохранения безопасности работы системы и поддержания требуемого качества электроэнергии для более категорийных потребителей.

Эффекты

Использование децентрализованного управления элементами сети приводит к сглаживанию пиков на графиках нагрузки и минимизации затрат потребителей за счет накопления электрической энергии во время низкого спроса, исключая ее переизбыток.



Средства и инструменты порождающего проектирования систем управления

Системы порождающего проектирования позволяют значительно быстрее и эффективнее решать задачи проектирования сложных технических систем, для которых существует большое количество ограничений и параметров оптимизации. В таких системах пользователь задает исходные данные и ограничения, определяет приоритетность параметров оптимизации, а система самостоятельно подбирает наиболее подходящий вариант решения задачи. Это позволяет значительно снизить порог входа для компаний-производителей оборудования и системных интеграторов при создании комплексов с новыми архитектурами построения, распределенной генерацией и накопителями электроэнергии.

Инструменты порождающего проектирования, базирующиеся на принципах искусственного интеллекта и поддержке автоматического принятия решений, позволяют достаточно точно моделировать процесс работы инженеров-проектировщиков, в большинстве случаев устраняя необходимость проведения длительных научно-исследовательских и проектно-испытательских работ.

База знаний является одним из методов искусственного интеллекта и представляет собой структурированную информационную модель, содержащую формальное описание понятий и их взаимосвязей в определенной предметной области. Информация в них представляется в форме семантической сети, что допускает осуществление логических выводов и осмысленную обработку информации. В силу этих особенностей базы знаний используются не только для хранения формализованной информации, но и для автоматизации процессов принятия решений и решения задач.

Ключевой проект

Разработка **программно-технического комплекса автоматизированного синтеза структурно-функциональных схем РЗА ЦПС, обеспечивающих требуемые показатели надежности и экономичности**, направлена на упрощение и ускорение процесса проектирования комплексов РЗА цифровых подстанций за счет его глубокой автоматизации. Результатом работы над проектом является комплекс [ng.Grace](#).

Основная цель

Разработка технологии порождающего проектирования систем и алгоритмов РЗА для ЦПС.

Уникальность

В созданном комплексе реализованы алгоритмы, опирающиеся на **базы знаний и механизмы логического вывода**, которые позволяют имитировать **процесс профессионального мышления** инженера и осуществлять автоматическое проектирование РЗА ЦПС. Условия, необходимые для автоматического распределения комплектов защит по оборудованию, формируются на основе **нормативной документации** путем структурирования и классификации заложенных в ней знаний, а также формализованного **опыта работы проектировщиков**.

Важным преимуществом такого подхода является возможность изменения базы знаний проекта **без необходимости изменения исходного кода** программы. Это означает, что при изменениях в НТД или специализированных требованиях можно вносить соответствующие изменения в базу знаний, и комплекс будет использовать обновленную информацию при проектировании РЗА. Это делает систему адаптивной к изменениям в стандартах и требованиях.

Эффекты

Достигается автоматизация и существенное сокращение времени проектирования комплексов РЗА в соответствии со стандартом МЭК 61850, что упрощает переход к цифровым подстанциям в электрических сетях.

Ключевой проект

Разработка **ПТК автоматизированного синтеза схем микроэнергосистем из заданного набора элементов, обеспечивающих минимизацию капитальных и операционных затрат при обеспечении заданных показателей надежности электроснабжения потребителей (ПТК СМГ)**, предназначена для проведения экспресс-проектирования микроэнергосистем на этапе разработки разделов ОТР и П проектной документации систем электроснабжения. Проект направлен на преодоление барьера, связанного с высокими трудозатратами и временем проектирования в условиях низкой развитости систем порождающего проектирования.

Основная цель

Разработка технологии порождающего проектирования схем микроэнергосистем для обеспечения эффективного развития электросетевого комплекса.

Уникальность

ПТК решает задачу синтеза электрических схем путем выбора оборудования, соответствующего установленным пользователем требованиям, из заданного набора элементов и выполняет подбор конфигурации сети.

В созданном комплексе реализуются алгоритмы автоматизированного проектирования схем микроэнергосистем, учитывающие показатели надежности и экономичности, а также разметку элементов в геоинформационной системе. Алгоритм построен на представлении сети в виде **математического графа** и решении многокритериальной оптимизационной задачи синтеза электрической схемы **методом главного критерия**.

Метод главного критерия позволяет сводить задачи многокритериальной оптимизации к однокритериальной путем выбора одного из рассматриваемых критериев в качестве главного в то время как остальные преобразуются в набор ограничений.

Все синтезированные варианты проходят автоматическую проверку на соответствие допустимым параметрам режимов и критериям надежности, после чего предоставляется полный отчет о показателях надежности и экономичности решений.

Эффекты

Использование ПТК СМГ ведет к снижению затрат и времени, необходимых на проектирование систем электроснабжения на основе микроэнергосистем.

The screenshot displays the PTK SMG software interface. The top navigation bar includes: ПТК СМГ, Проекты, Синтез МГ, Экономика, Надежность, Библиотека, and О программе. The main interface is divided into three sections:

- Left Panel:**
 - Project name: "UC1-2_MS_110_35_10"
 - Task: "Первая подзадача"
 - Strategy selection: "Выбор стратегии" with a dropdown set to "forwardSolution" and a "Запуск" button.
 - Mode selection: "Выбор режима для отображения" with two columns: "Схемы" (0, 1) and "Сценарии" (0-13).
- Center Panel:**
 - A map showing a power network with nodes and connecting lines.
 - Summary statistics: "2 варианта схем", "20 элементов синтезировано", "118 сгенерированных сценариев".
- Right Panel:**
 - Section: "Параметры узла"
 - Button: "Редактировать"
 - JSON-like data for a node:


```

          CMElement (15)
          - className : Substation
            name : UC 10.5/0.4
            projectID : UC1-2_MS_110_35_10
            schemaScenarioNumber : 0
            synthesizedSchemaNumber : 1
            westObjectSynthesized : true
          - capex (3)
            multiplier : k
            unit : RUB
            value : 1001.2119
            isHighSideAvailable : true
            isLowSideAvailable : true
            isOverloaded : false
            latitude : 50.697803
            longitude : 36.773267
            priceBase : 1001.2119
            type : transformerSubstation
            mrzID : 32d7fd3e-9750-46b8-b6d8-2fac354285b9
          
```

Открытые платформы для технологических и коммерческих сервисов

Распространение ВИЭ и систем накопления электроэнергии в распределительных сетях ведет к увеличению затрат на содержание систем автоматического управления такими сетями, что значительно усложняет масштабное внедрение новых технологий.

Создание открытых технологических платформ для автоматизации управления системами РЗА в распределительных сетях предоставит единый и универсальный инструмент для всех производителей оборудования РЗА. Это позволит снизить затраты на разработку и внедрение новых систем защиты и управления, упростить процессы интеграции различных устройств и обеспечить совместимость между ними.

Благодаря созданию подобных открытых платформ производители энергетического оборудования смогут предложить более эффективные и инновационные решения для автоматизации управления распределительными сетями, что позволит повысить надежность и безопасность работы электроэнергетической инфраструктуры, оптимизировать процессы и обеспечить более гибкое реагирование на изменения в сети.

Ключевой проект

Разработка **автоматизированной системы расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистеме в режиме онлайн** привела к снятию барьера, связанного с необходимостью создания базовой части платформы технологических сервисов для производителей комплексов РЗА. Результатом проекта является один из ключевых продуктов Центра – **ПК «АРПС»**.

Основная цель

Разработка технологии автоматического расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистеме в онлайн-режиме, позволяющая увеличить степень автоматизации расчета уставок в электрических сетях с быстро меняющимися режимами.

Уникальность

В рамках проекта была разработана технология автоматического расчета параметров срабатывания РЗА, позволяющая автоматизировать процесс расчета уставок при наличии в электрических сетях большого количества распределенных генерирующих установок.

Моделирование режимов работы распределительных сетей производится на основе **эквивалентирования** прилегающих сетей по данным **синхронизированных векторных измерений**, что существенно сокращает размерность математической модели и позволяет повысить скорость расчетов. Для решения задачи **скоординированного изменения параметров** срабатывания РЗА был разработан алгоритм кластеризации сети, опирающийся на **базу знаний** требований к защите первичного оборудования. По результатам кластеризации определяется последовательность расчета защит и подготавливаются данные для проведения автоматического расчета параметров их срабатывания.

Эффекты

Достигнута возможность адаптации систем защиты и автоматики распределительных сетей без необходимости проведения большого числа расчетов проектным и эксплуатирующим персоналом в условиях внедрения распределенной генерации и накопителей.

Отечественные инструменты моделирования режимов работы энергосистем в реальном времени

Применение симуляторов режимов работы энергосистем в реальном времени является «стандартом де-факто» при разработке новых технических решений для интеллектуальных распределенных электроэнергетических систем, цифровых систем защиты и автоматического управления, а также обеспечения информационной безопасности.

Симуляторы реального времени предоставляют возможность имитировать работу энергосистем в различных сценариях, анализировать переходные процессы, прогнозировать проблемы, а также тестировать новые технические решения перед их внедрением. Это существенно снижает риск возможных аварийных ситуаций и повышает эффективность функционирования энергетических систем. Разработка и применение отечественных симуляторов обеспечивает следующие преимущества для российских разработчиков:

- снижение зависимости от импортных решений;
- обеспечение собственной базы для проведения исследований и разработки новых технических решений;
- развитие национальной научно-технической базы и экспертизы в области энергетики;
- упрощение обучения и подготовки квалифицированных специалистов в области энергетики.

Ключевой проект

Разработка **программно-аппаратного комплекса моделирования работы энергосистем в реальном времени** направлена на обеспечение технологического суверенитета в области разработки, проектирования, внедрения и эксплуатации цифровых систем защиты и автоматики энергосистем. Результатом работы является **ПАК «ЦДЭС»**.

Основная цель

Создание комплекса реального времени для проведения научно-исследовательских работ, связанных с анализом работы оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики в различных режимах работы энергосистемы, а также изучения вопросов работы электроэнергетических систем при возникновении различных возмущающих воздействий.

Уникальность

Проект представляет собой не только моделирующий комплекс реального времени, но и **централизованную платформу** для других сервисов экосистемы Центра НТИ МЭИ. Это позволяет значительно расширить функциональные характеристики комплекса по сравнению с иностранными аналогами. Платформенный подход для цифровых сервисов комплекса предоставляет возможность проведения исследований и интеграции цифрового двойника энергосистемы в существующие системы управления без необходимости развертывания дорогостоящей инфраструктуры с использованием инструментов удаленного доступа.

Решение задачи расчета режима электроэнергетической сети с нелинейными элементами в разрабатываемом комплексе основывается на **методе Доммеля**, а именно на применении **численного интегрирования** и **аппроксимации дифференциальных уравнений** разностными уравнениями.

Эффекты

Укрепление и развитие национальной научно-технической базы в области электроэнергетики за счет снижения зависимости от импорта комплексов реального времени и наращивания их функциональности в сравнении с зарубежными аналогами.

Комплексные решения для цифровых подстанций и цифровых сетей среднего и низкого напряжения

Разработка и внедрение комплексных решений для цифровых сетей является важным шагом в развитии современной энергетики и ее инфраструктуры. Такие решения способствуют переходу к более надежному и эффективному электросетевому комплексу, а также открывают новые возможности для создания и внедрения инновационных технологий и сервисов.

Цифровые комплексы РЗА ЦПС и технические решения на их основе должны быть лишены каких-либо искусственных ограничений и должны обеспечивать необходимую для построения ЦПС гибкость в реализации технологических функций, предоставляемую стандартом МЭК 61850. Умелое применение современных возможностей в области информационных технологий и микропроцессорной техники при выборе и разработке оптимальной архитектуры комплексов РЗА ЦПС с функциональностью независимой от аппаратной платформы, учитывая требования к надежности и готовности цифровых комплексов РЗА, обеспечивает сокращение:

- капитальных затрат за счет разделения расходов на аппаратную и программные составляющие цифровых комплексов РЗА и возможности их независимого приобретения у более широкого круга разработчиков;
- эксплуатационных затрат за счет переноса прикладных программных функций с одной аппаратной платформы на другую в течение всего жизненного цикла энергообъекта.

Ключевой проект

Проект по разработке **опытных образцов комплексов РЗА ЦПС с различными архитектурами (централизованная, децентрализованная, гибридная)** направлен на преодоление барьера, связанного с отсутствием комплексных решений по защите и автоматике ЦПС. Результаты работы проекта легли в основу продукта **«Интеллектуальная система релейной защиты и автоматики ng.AIR»**.

Основная цель

Проект направлен на разработку комплексов релейной защиты и автоматики для цифровых подстанций и сетей с фокусом на оптимизацию числа используемых микропроцессорных устройств за счет возможности независимой реализации технологических функций защиты, автоматики и управления от аппаратной платформы при сохранении требуемой надежности и функциональности.

Уникальность

Разработанные технологии позволяют снизить стоимость комплексов РЗА ЦПС и увеличить их надежность за счет внедрения нового способа передачи данных измерений, применения самосинхронизации устройств по времени и увеличения киберзащищенности устройств защиты и автоматики.

Новый подход к синхронизации устройств по параметрам аварийного режима основан на передаче **синхронизирующих сообщений посредством протокола GOOSE**. Таким образом, при возникновении аварийного режима в период потери синхронизации по NTP и RTP устройства могут быть синхронизированы через отправку GOOSE-сообщений, в которых содержится информация о моменте возмущения **с точностью $\pm 2-3$ мкс**. Применение **нового способа синхронизации** измерений в перспективе позволит отказаться от использования протокола RTP и дорогостоящего оборудования для его поддержки.

Для исключения ложных отключений первичного оборудования средствами защиты применяется пусковой орган на основе вейвлет-преобразования с использованием нейронных сетей для анализа коэффициентов вейвлет-разложения. Этот подход позволяет анализировать переходные процессы с высокой точностью и определять момент возникновения аварийных ситуаций, а следовательно, исключать несанкционированные отключения оборудования и увеличивать **надежность и киберзащищенность** разработанных комплексов.

Эффекты

Достигнуто повышение надежности работы систем защиты и автоматики при одновременном снижении стоимости этого комплекса в составе цифровых подстанций.

Продукты Центра НТИ МЭИ

Комплекс синтеза структурно-функциональных схем релейной защиты и автоматики цифровых подстанций ng.Grace

Интеллектуальная система релейной защиты и автоматики ng.AIR

Цифровой двойник энергосистемы

Автоматизированная система проведения испытаний

Автоматизированная система расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистемах

Интеллектуальная система энергоснабжения

Комплекс синтеза структурно-функциональных схем релейной защиты и автоматики цифровых подстанций ng.Grace

Краткое описание

ng.Grace – система автоматизированного проектирования комплексов РЗА для цифровых подстанций в соответствии со стандартом МЭК 61850. Программное обеспечение использует эвристические механизмы, базы знаний и другие методы искусственного интеллекта, имитирующие процесс мышления и принятия решений инженера-проектировщика. Такой подход позволяет автоматически синтезировать общую архитектуру комплексов РЗА и АСУ ТП, обеспечивая требуемые показатели надежности и экономичности.

Функциональные возможности

- Автоматизированное определение состава и типов УСО (МУ).
- Автоматизированный синтез перечня функций РЗА с привязкой к первичному оборудованию в соответствии с НТД.
- Автоматизированное распределение функций релейной защиты и автоматики по ИЭУ (IED).
- Автоматизированное создание структурно-функциональных схем РЗА ЦПС.
- Автоматизированный синтез структурной схемы технологической локально-вычислительной сети цифровых комплексов РЗА и АСУ ТП ЦПС.
- Оценка надежности цифровых комплексов РЗА и АСУ ТП ЦПС.
- Оценка капитальных и эксплуатационных затрат по реализации технического решения на базе создаваемых цифровых комплексов РЗА и АСУ ТП ЦПС.

Пользователи продукта

Инжиниринговые и проектные компании.

Эффекты использования

- Уменьшение времени проектирования (среднее время выполнения проекта – 1 день против 30 дней у аналогов).
- Минимизация ручного труда.
- Использование правил проектирования, ориентированных на заказчика.
- Интеграция с другими продуктами экосистемы центра НТИ МЭИ.

Принцип работы

Для работы системы требуется задать только главную схему подстанции или импортировать ее в формате SSD. Далее запускается последовательный процесс автоматизированного проектирования цифрового комплекса РЗА ЦПС, опирающийся на базу знаний, содержащую НТД и формализованный опыт инженеров-проектировщиков. На каждом этапе пользователю предоставляется возможность задания настроек синтеза и редактирования сгенерированных решений.



Функциональная структура процесса проектирования в ng.Grace

Продвижение и использование:

Поставки продукта

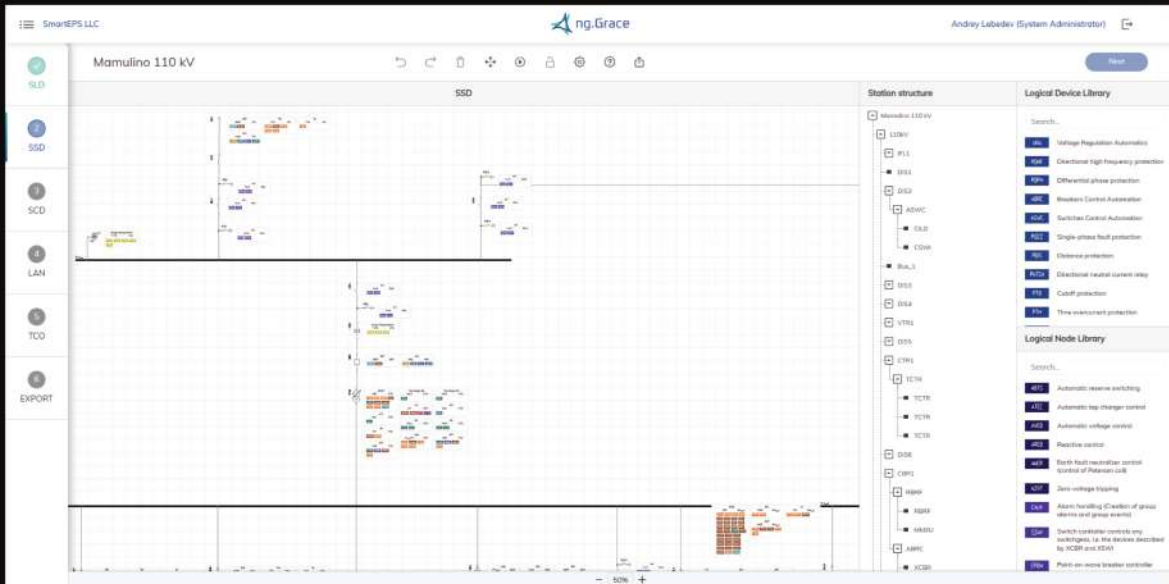
Трансфер технологии промышленным партнерам: в 2019, 2020, 2021 и 2022 гг. Заключены лицензионные договоры на использование РИД, полученных при выполнении проекта.

Партнеры

- ПАО «Россети Центр и Приволжье» - опытно-промышленное апробирование РИД, полученных Центром.
- АО «РАДИУС Автоматика», ООО «Прософт-Системы» - разработка собственного программного обеспечения и устройств для РЗА ЦПС.
- ЗАО «ЭНЛАБ» - официальный дистрибьютор на территории России, КНР.
- АО «Профотек» - официальный дистрибьютор на территории России.

Результаты интеллектуальной деятельности

- База знаний требований к защите первичного оборудования ЦПС (свидетельство на БД для ЭВМ № 2019622038 от 11.11.2019 г.).
- Программа для автоматизированного синтеза структурно-функциональных схем РЗА ЦПС, обеспечивающих заданные показатели надежности и экономичности (свидетельство на программу для ЭВМ № 2019664701 от 13.11.2019 г.).



SmartEPS LLC ng.Grace Andrey Lebedev (System Administrator)

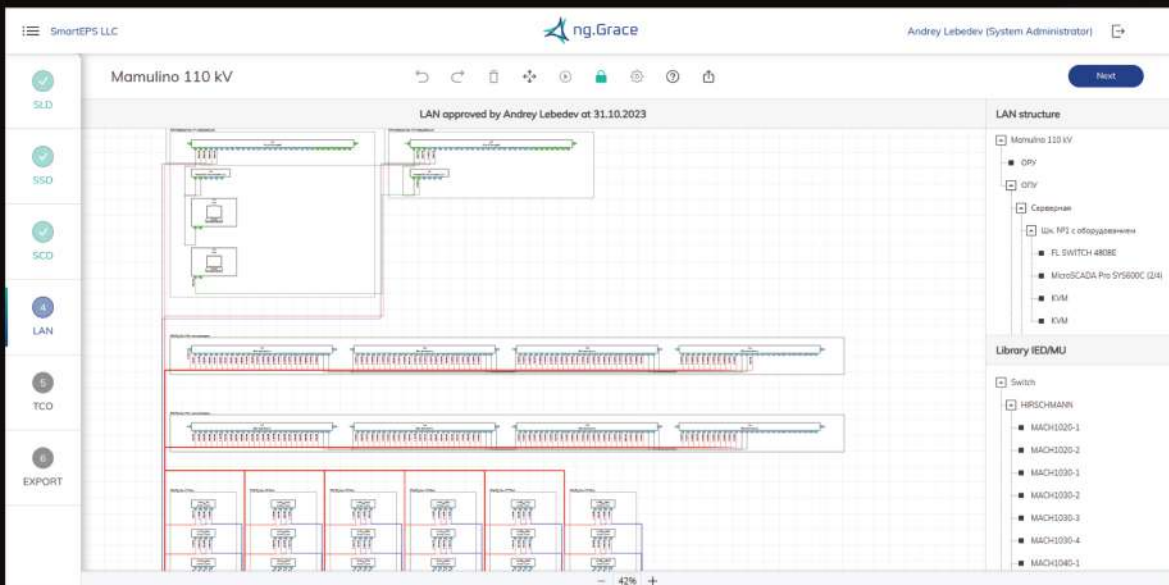
Mamulino 110 kV

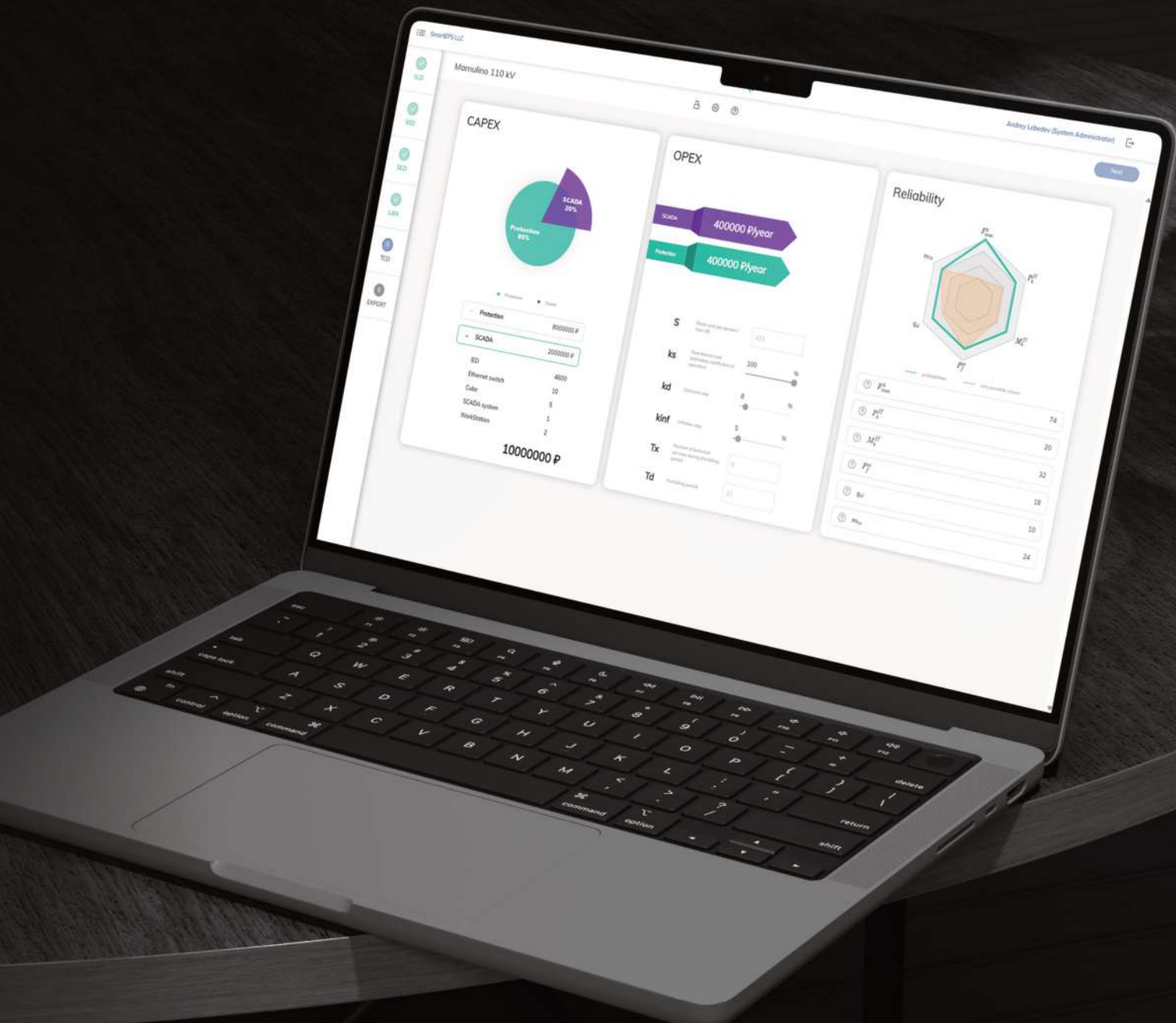
Export

Documents export

Here you can select the packages to export.
The data for each documentation package must be entered manually, if this data has not been entered previously.

- 1 SLD Single Line Diagram
- 2 SSD System Specifications Description
- 3 SCD System Configuration Description
- 4 LAN structure Local area network structure
- 5 Specification
- 6 Cable list
- 7 Total cost of ownership





Mamolino 110 kV

Andrey Lebedev (System Administrator)

CAPEX



Item	Value
Protection	800000 P
SCADA	200000 P
IED	4800
Ethernet switch	10
Cable	5
SCADA system	1
Workstations	2

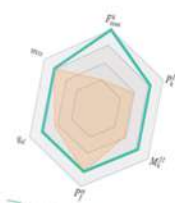
1000000 P

OPEX



S	Number of substation	10
ks	Number of substation	100
kd	Number of substation	10
kinf	Number of substation	10
Tx	Number of substation	10
Td	Number of substation	10

Reliability



P _{max}	74
P _{1%}	20
M _{1%}	32
B _{1%}	18
M _{2%}	10
P _{2%}	24

Интеллектуальная система релейной защиты и автоматики ng.AIR

Краткое описание

ng.AIR – комплекс программно-технических средств, предназначенный для реализации функций защиты и автоматики подстанций 6-220 кВ в целях обеспечения бесперебойного и качественного электроснабжения.

Основным преимуществом **ng.AIR** является самовосстановление функций защиты и автоматики при авариях без участия человека, а также самонастройка и самоконфигурация системы за счет мультиагентного взаимодействия устройств. Самовосстановление осуществляется посредством перераспределения функций между работоспособными устройствами РЗА в режиме реального времени.

Решение является победителем премии «Технологический прорыв 2022» в номинации «Преодоление барьеров и открытие новых возможностей (рынков)».

Для организации работы данной системы используются следующие устройства:

- унифицированные микропроцессорные устройства защиты и автоматики – **ng.AIR-IED**;
- преобразователи дискретных и аналоговых сигналов, выполняющие функцию сопряжения с объектом защиты – **ng.AIR-MU**;
- программный комплекс для настройки и эксплуатации системы – **ng.AIR-SW**.

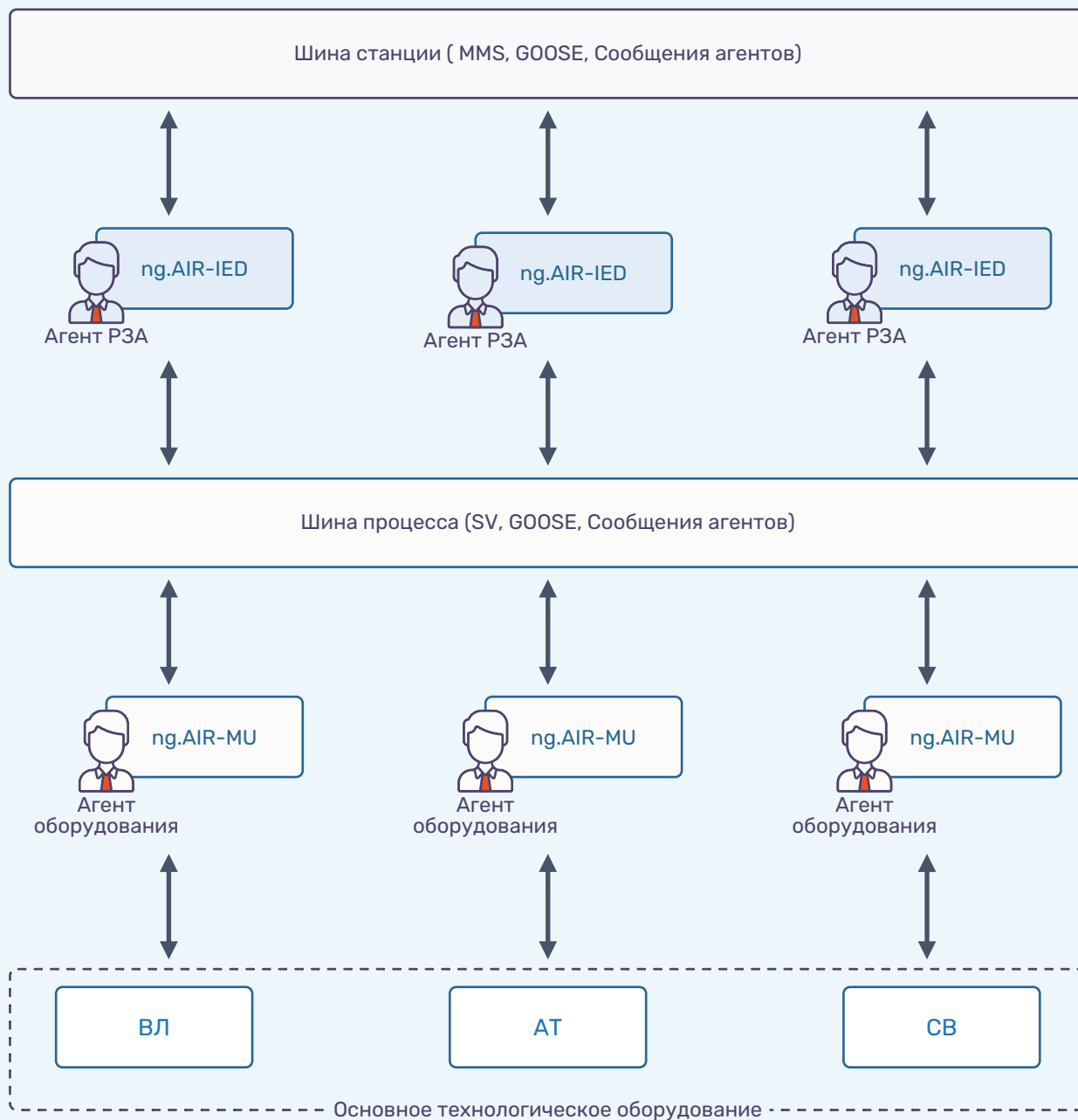
В устройствах типов ng.AIR-IED и ng.AIR-MU реализуются интеллектуальные программные агенты, отвечающие за автоматический подбор и перераспределение функций защиты и автоматики.

Пользователи продукта

Электросетевые и генерирующие компании.

Эффекты использования

- Разработанный способ передачи измерений в технологической сети передачи данных ведет к снижению нагрузки на технологическую ЛВС при передаче измерительной информации от УСО до терминалов РЗА с сохранением должного уровня надежности, что позволяет сократить затраты на коммутаторы для ЛВС на 25%.
- Разработанный способ синхронизации по времени позволяет обеспечить надежную работу всех устройств РЗА в синхронном режиме с технологическим процессом даже при потере внешней синхронизации времени и исключить необходимость в применении дорогостоящих устройств синхронизации и коммутаторов ЛВС.
- Разработанный способ бесперебойного электропитания потребителей позволяет повысить уровень киберзащищенности решения за счет контроля правильности возникновения сигналов аварийного отключения от РЗА.
- Решение на базе ng.AIR может выдерживать отказы сразу нескольких элементов системы РЗА, что позволяет повысить надежность при снижении капитальных и операционных затрат для объектов электроэнергетики на 20-30%.



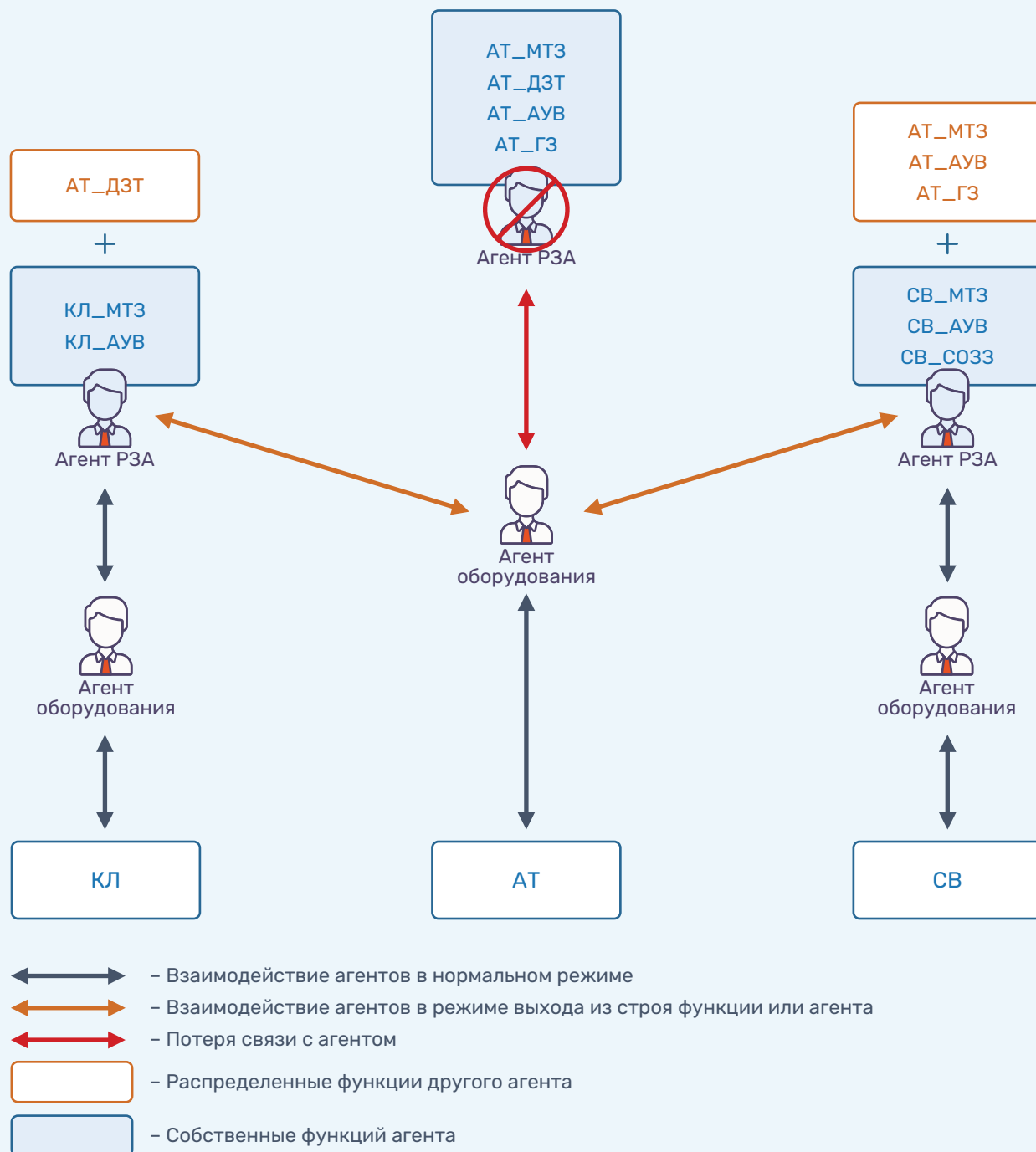
Архитектура построения интеллектуальной системы РЗА

Принцип работы

Мультиагентное взаимодействие устройств в системе определяет их поведение в штатном режиме работы, а также в случае выхода из строя какого-либо из устройств.

- При включении системы агенты устройств сопряжения с объектом (ng.AIR-MU) определяют состав функций защиты и автоматики для силового оборудования, к которому они относятся, и направляют запросы соответствующим интеллектуальным устройствам РЗА (ng.AIR-IED) для выполнения этих функций. Агенты устройств РЗА в ответ на запрос запускают выполнение функций защиты и автоматики на своем устройстве РЗА исходя из его параметров загрузки, производительности, а также требований НТД.

- При неисправности какой-либо функции или целого интеллектуального устройства РЗА устройство сопряжения фиксирует неисправность в обеспечении защиты, автоматики или управления силовым оборудованием, с которым оно связано. Устройства ng.AIR-MU, определившие неисправность, инициируют запросы к оставшимся исправным устройствам защиты на выполнение необходимых функций. Они, в свою очередь, берут на себя соответствующие задачи с учетом собственной загрузки, производительности и пр.
- После восстановления работы неисправного устройства и, соответственно, системы РЗА целиком происходит обратное перераспределение функций защиты и автоматики в соответствии с изначальным нормальным распределением.



Взаимодействие агентов при перераспределении функций РЗА

Продвижение и использование:

Поставки продукта

- В ноябре 2022 года на объекте пилотного внедрения проведены успешные испытания по информационной безопасности, подтвердившие совместимость разработанных технологий построения комплексов РЗА и средств киберзащиты от ведущих российских компаний, таких как АО «Лаборатория Касперского» и АО «Инфотекс».
- В 2022 году успешно завершена опытная эксплуатация на пилотном объекте ПС 110 кВ «Мамулино» в филиале «Тверьэнерго» ПАО «Россети Центр».

Партнеры

- Официальные промышленные партнеры: ООО «СМАРТ ГРИД КОМПАНИ», ООО «Цифровые энергосистемы».
- Производство оборудования с использованием РИД, полученных Центром: АО «ЭлеСи», АО «РАДИУС Автоматика».
- Инжиниринговые услуги с использованием ПТК, созданного при выполнении проекта Центра: ООО «Фирма ОРГРЭС».
- Опытное-промышленное апробирование РИД, полученных Центром: ПАО «Россети Центр».

Результаты интеллектуальной деятельности

- Способ передачи измерений в технологической сети передачи данных (патент на изобретение № 2738887 от 18.12.2020 г.).
- Способ бесперебойного электропитания потребителей (патент на изобретение № 2739373 от 23.12.2020 г.).
- Способ синхронизации по времени устройств РЗА с использованием параметров аварийного режима (патент на изобретение № 2740360 от 13.01.2021 г.).

Для развития предложенной концепции построения комплексов РЗА с гибкой функциональной архитектурой в 2020–2023 гг. действовала международная рабочая группа «WG B5.60 Protection, Automation and Control Architectures with Functionality Independent of Hardware». В состав группы входил 21 специалист из 11 стран мира: России, США, Китая, Канады, Великобритании, Германии, Швеции, Нидерландов, Испании, Португалии и Бразилии. В 2023 году группа успешно завершила свою деятельность, зафиксировав результаты в техническом отчете.



ИС РЗА ПС 110/10 кВ
СМАРТ ГРИД КОМПАНИ



СМАРТ ГРИД КОМПАНИ



100.07



Цифровой двойник энергосистемы

Краткое описание

ЦДЭС – программно-аппаратный комплекс моделирования работы энергосистем в реальном времени. Продукт прежде всего предназначен для проведения научно-исследовательских работ, связанных с анализом функционирования оборудования релейной защиты и противоаварийной автоматики в различных режимах работы энергосистемы, а также с вопросами работы электроэнергетических систем при возникновении различных возмущающих воздействий.

ПАК «ЦДЭС» также представляет собой общую платформу для интеграции других приложений экосистемы Центра компетенций НТИ МЭИ с общей шиной передачи данных между ними, предоставляя возможность более эффективного использования результатов моделирования. К таким приложениям относятся: системный конфигуратор по стандарту МЭК 61850 (на базе ng.Grace), конфигуратор и среда выполнения виртуальных устройств РЗА (vPACS), а также конфигуратор и среда выполнения виртуальных программируемых логических контроллеров (vPLC).

ПАК «ЦДЭС» объединяет широкий набор программных модулей, обеспечивающих результативность и гибкость функционирования платформы.

- **Программный модуль «Редактор схемы ЭЭС»:** предназначен для создания и редактирования модели ЭЭС, ее валидации и конвертации в SSD и CIM форматы.
- **Программный модуль «Симулятор РВ»:** предназначен для управления симуляцией модели ЭЭС и визуализации текущих параметров симуляции и рассчитанных измерений модели.
- **Программный модуль «Журнал событий»:** предназначен для агрегации команд и событий и отображения списка системных, аварийных, предупредительных и технологических событий в процессе моделирования.
- **Программный модуль «Графики»:** предназначен для агрегации, обработки, сохранения и отображения измерений по результатам расчета модели ЭЭС.
- **Программный модуль «Расчетный модуль реального времени (РМРВ)»:** предназначен для моделирования энергосистем в режиме реального времени. Модуль использует алгоритм Доммеля для решения задачи определения мгновенных значений токов и напряжений в узлах и ветвях электрической сети.
- **Программный модуль «Протокол МЭК 60870-5-104»:** предназначен для обеспечения информационного обмена по протоколу МЭК 60870-5-104, реализует серверную и клиентскую части.
- **Программный модуль «Протокол UDP»:** предназначен для отправки данных в виде массива байт по протоколу UDP.
- **Программный модуль «Дискретный и аналоговый ввод/вывод»:** предназначен для управления и считывания информации с плат дискретного/аналогового ввода/вывода.
- **Программный модуль «Протокол Ауога»:** предназначен для интеграции систем реального времени между собой путем передачи данных на высокой скорости через соединение «точка-точка» по протоколу Aurora.
- **Программный модуль «Протокол PMU»:** предназначен для взаимодействия с протоколом передачи данных синхронизированных векторных измерений IEEE C37.118.1.
- **Программный модуль «Осциллограммы»:** предназначен для формирования и отображения осциллограмм изменения аналоговых и дискретных величин, характеризующих моделируемые процессы и события.

Функциональные возможности

- Расчет установившихся нормальных и аварийных режимов.
- Расчет переходных режимов.
- Симуляция квазипереходных режимов и генерация мгновенных значений токов и напряжений.
- Интерактивный пересчет режимов при получении команд управления от внешних устройств и систем.
- Ввод и вывод дискретных и аналоговых сигналов через интерфейсные платы.
- Подключение аналоговых усилителей для выдачи токов и напряжений, эквивалентных цепям ТТ и ТН.
- Прием и передача данных по протоколам GOOSE, SV, MMS, МЭК 60870-5-104, С37.118.
- Импорт, экспорт и редактирование моделей ЭЭС в формате CIM.
- Импорт, экспорт и редактирование файлов SSD, SCD, CID.
- Симуляция работы комплексов РЗА и АСУТП в виде виртуальных устройств.
- Автоматизированное построение эквивалентов ЭЭС по данным реальных измерений СВИ.
- Автоматизированный расчет уставок РЗА.
- Автоматизированная проверка правильности проектных решений по РЗ и автоматике распределительных сетей.
- Автоматизированный синтез сценариев тестирования РЗ и автоматики распределительных сетей.
- Автоматизированное проведение испытаний комплексов РЗ и автоматики распределительных сетей.
- Запись осциллограмм в формате COMTRADE (на основе как данных моделирования, так и разбора трафика от реальных и виртуальных устройств).
- Автоматизированная генерация отчетов о проведении испытаний.

Технические характеристики

- Симуляция в жестком реальном времени на основе алгоритма Доммеля с шагом расчета 20-50 мкс.
- Прием и передача данных через интерфейсные контроллеры по протоколам GOOSE, SV, MMS, МЭК 60870-5-104, IEC 61850, С37.118, UDP, MODBUS TCP, MQTT.
- Свободно конфигурируемая архитектура, состоящая из вычислительных, вспомогательных, конструктивных модулей и модулей ввода/вывода.
- Характеристики вычислительных модулей:
 - центральный процессор вычислительного модуля 24 ядра с частотой не менее 2,4 ГГц;
 - до 6 плат ввода/вывода на каждый вычислительный модуль;
 - поддержка до 4 плат высокоскоростной связи по протоколу Aurora на каждый вычислительный модуль;

- симуляция электромагнитных переходных процессов в диапазоне частот от постоянного тока до 3кГц;
- симуляция режимов электрических схем, содержащих до 600 электрических однофазных узлов с шагом расчета 50 мкс;
- возможность объединения вычислительных модулей между собой для совместной симуляции общей задачи.
- Характеристики аналоговых модулей ввода/вывода:
 - каналов аналогового ввода: 32;
 - диапазон выходного сигнала по напряжению: +/-10 В;
 - диапазон выходного сигнала по току: 0...20 мА, 4...20 мА;
 - каналов аналогового вывода: 16;
 - дифференциальных каналов: 8;
 - каналов с общим проводом: 16;
 - диапазон входного сигнала по напряжению: +/-1.25 В, +/-2.5 В, +/-5 В, +/-10 В, 0...2.5 В, 0...5 В, 0...10 В;
- Характеристики дискретных модулей ввода/вывода:
 - каналов дискретного ввода: 64;
 - тип: контакт с внешним питанием;
 - логическая 1 контакта с внешним питанием: 10...30 В;
 - логический 0 контакта с внешним питанием: 0...3 В;
 - каналов дискретного вывода: 64;
 - тип выходного реле: полупроводниковый, NPN;
 - выходное напряжение: 5...40 В.

Пользователи продукта

Инжиниринговые и научно-производственные компании и эксплуатирующие организации.

Принцип работы

Расчетные модули ЦДЭС последовательно решают системы дифференциальных уравнений по алгоритму Доммеля, определяя мгновенные и действующие значения токов и напряжений в различных узлах системы на каждом шаге расчета.

ЦДЭС предоставляет возможность работы в режиме «ПАК» и режиме «онлайн сервиса».

- В режиме «ПАК» ЦДЭС предоставляет мощный инструментарий для моделирования и анализа электроэнергетических систем, позволяющий оптимизировать их работу и исследовать процессы в различных сценариях. Важной особенностью является возможность проведения испытаний как реальных устройств, так и их «цифровых двойников», что позволяет разрабатывать и тестировать новые типы устройств управления и защиты и их алгоритмы работы.
- В режиме «онлайн сервиса» производится моделирование работы не только первичного оборудования электроэнергетических объектов, но и виртуального комплекса оборудования вторичных систем (терминалов релейной защиты, программируемых логических контроллеров, систем управления верхнего уровня) за счет программных комплексов vPLC и vPACS, моделирующих поведение реальных устройств с использованием протоколов и технологий, применяемых на современных высокоавтоматизированных электрических подстанциях.

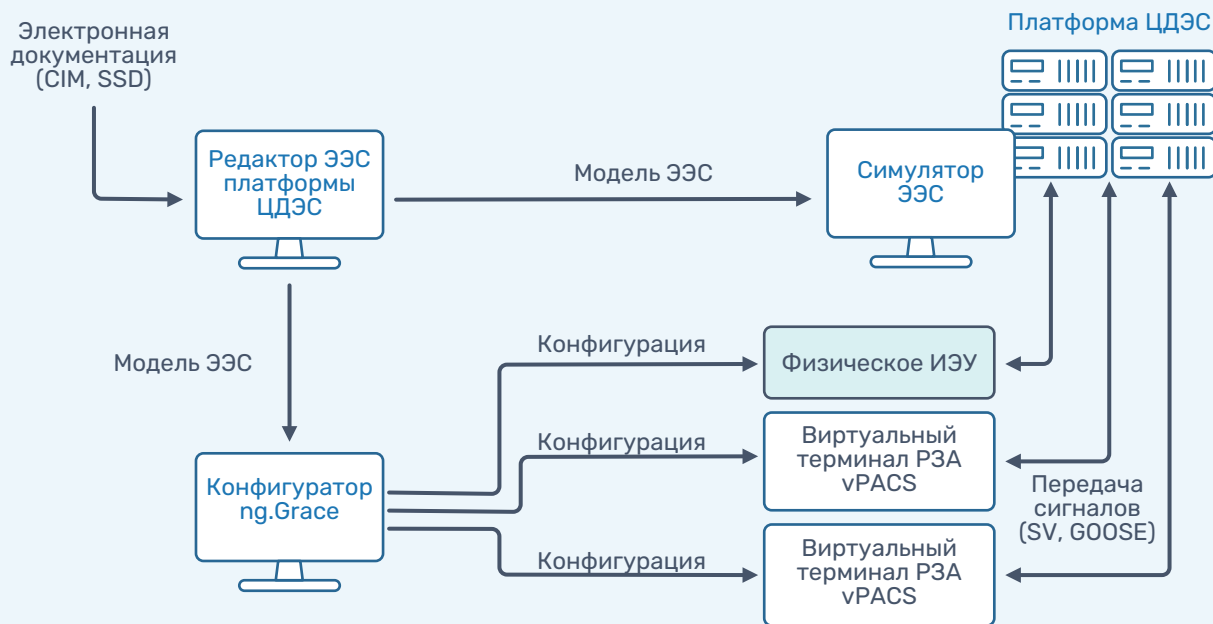


Схема работы в режиме «ПАК»

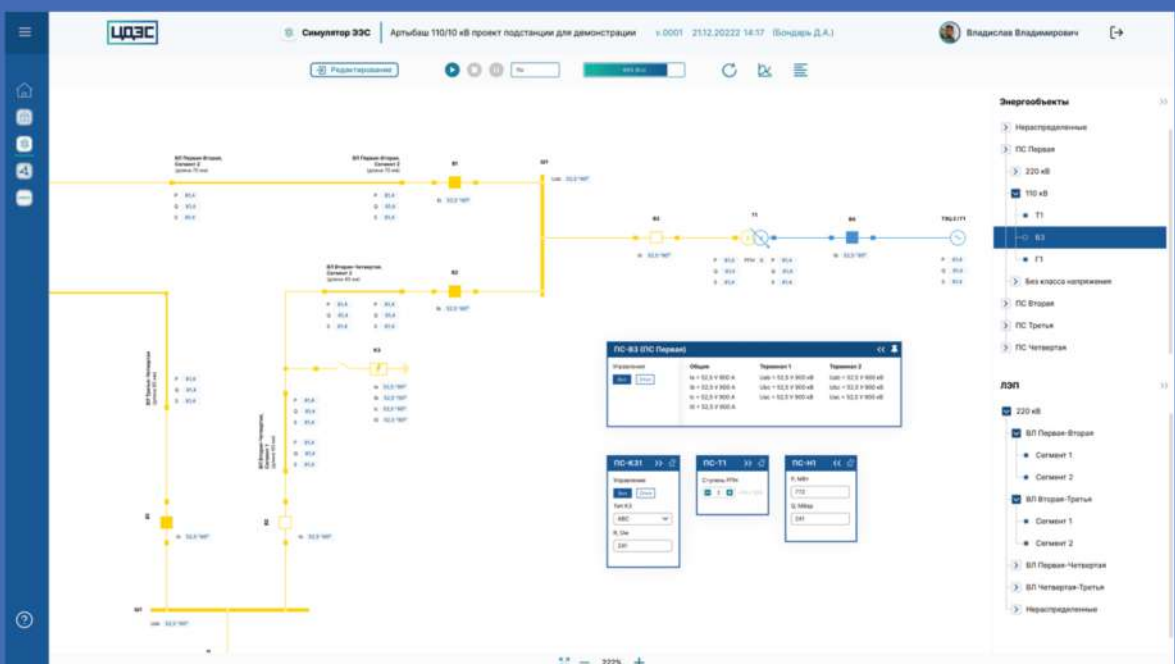
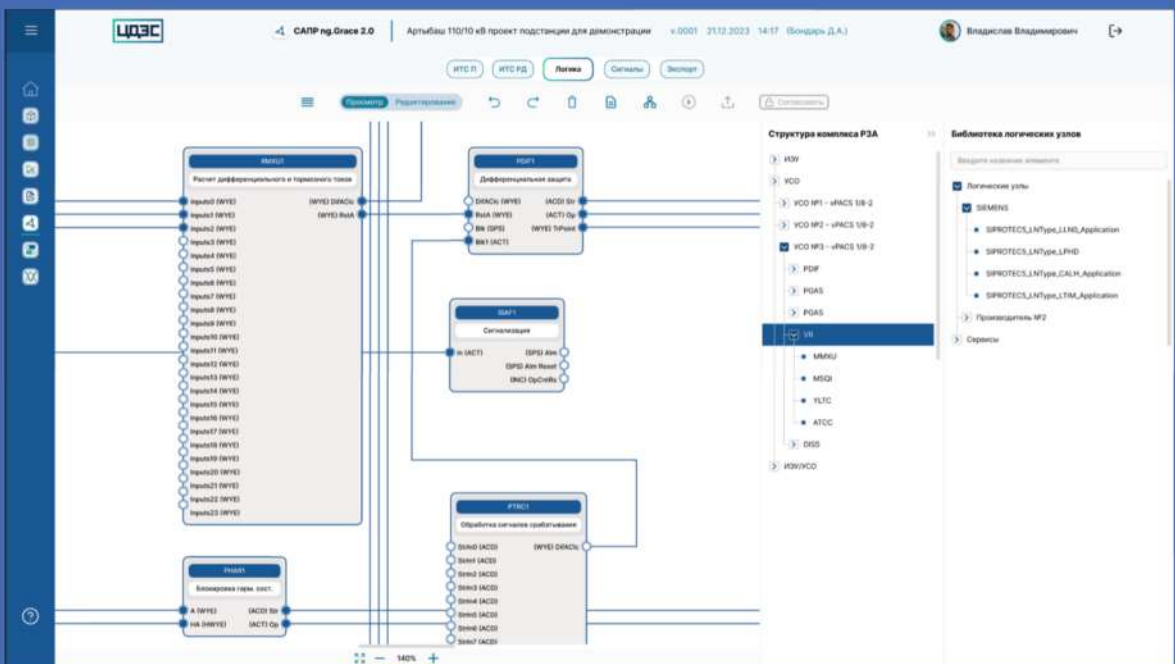
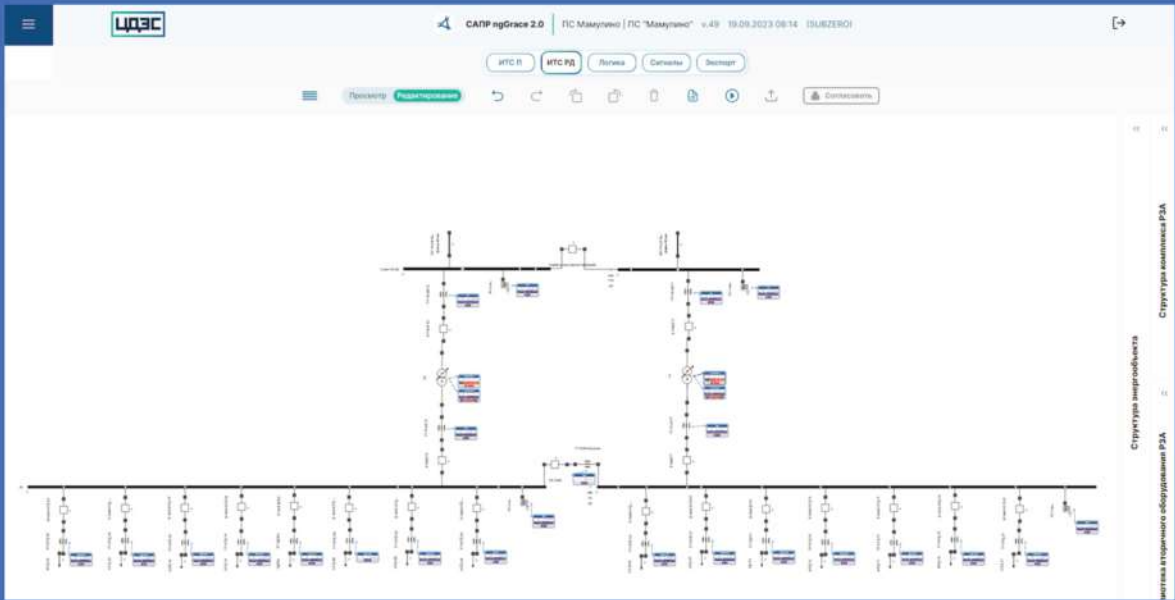
Продвижение и использование:

Партнеры

- Индустриальный партнер - ООО «Фирма ОРГРЭС».
- Индустриальный партнер - ЗАО «ЭнЛАБ».

Результаты интеллектуальной деятельности

- Программный модуль «Редактор схемы ЭЭС» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023662763 от 14.06.2023 г.).
- Программный модуль «Расчетный модуль реального времени» (PMPB) (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023663416 от 22.06.2023 г.).
- Программный модуль «Симулятор РВ» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023662865 от 15.06.2023 г.).
- Программный модуль «Журнал событий» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023662764 от 14.06.2023 г.).
- Программный модуль «Графики» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023662517 от 08.06.2023 г.).
- Программный модуль «Осциллограммы» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023666938 от 08.08.2023 г.).
- Программный модуль «Протокол МЭК 60870-5-104» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023663888 от 28.06.2023 г.).
- Программный модуль «Протокол UDP» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023663605 от 26.06.2023 г.).
- Программный модуль «Протокол PMU» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023662258 от 07.06.2023 г.).
- Программный модуль «Протокол Auoga» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023664407 от 04.07.2023 г.).
- Программный модуль «Дискретный и аналоговый ввод/вывод» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023664107 от 29.06.2023 г.).





Автоматизированная система проведения испытаний

Краткое описание

ПАК АСПИ предназначен для автоматической проверки правильности работы цифровых систем защиты и автоматики электрических сетей. Решение позволяет автоматизировать технически сложный и трудозатратный процесс проведения испытаний систем защиты и автоматики на всех этапах жизненного цикла цифровых комплексов РЗА и АСУ ТП за счет применения специализированных методов искусственного интеллекта, таких как онтологии и базы знаний.

Продукт разработан с использованием технологий, полученных при разработке программно-технического комплекса автоматизированного синтеза структурно-функциональных схем РЗА ЦПС, обеспечивающих требуемые показатели надежности и экономичности:

- программа для ЭВМ «Программа для автоматизированного синтеза структурно-функциональных схем РЗА ЦПС, обеспечивающих заданные показатели надежности и экономичности» (свидетельство № 2019664701 от 13.11.2019 г.);
- база данных «База знаний требований по защите первичного оборудования ЦПС» (свидетельство № 2019622038 от 11.11.2019 г.).

Функциональные возможности

- Импорт электронной документации в формате CIM и SCD.
- Автоматическая генерация тестовых сценариев проверки устройств РЗА.
- Автоматический синтез перечней эталонных сигналов от устройств РЗА.
- Автоматизированная проверка правильности проектных технических решений по РЗА и АСУ ТП.
- Семантический анализ правильности работы функций РЗА и АСУ ТП.
- Предупреждение нарушений в работе цифровых комплексов РЗА и АСУ ТП.
- Автоматическая генерация трафика по протоколам GOOSE и SV и анализ ответных сигналов от устройств РЗА.
- Генерация отчетов о выполнении проверки устройств РЗА.
- Модульность и поддержка на всем жизненном цикле комплексов РЗА и АСУ ТП.

Пользователи продукта

Проектные, пусконаладочные и эксплуатирующие организации.

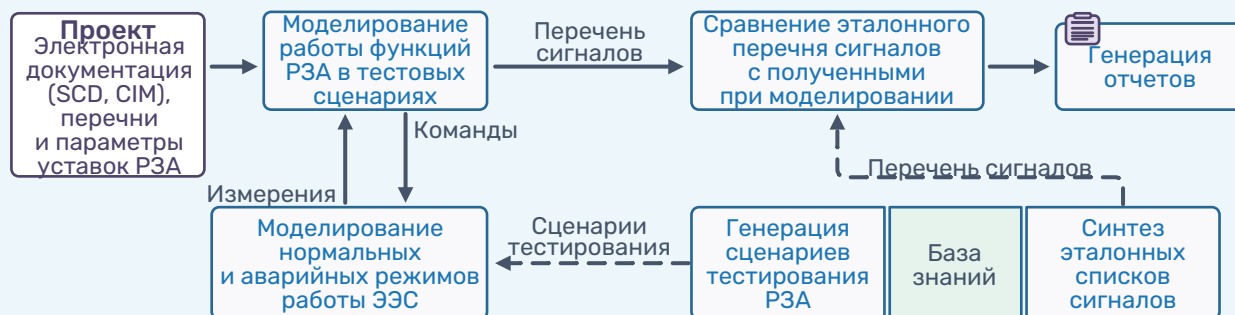
Эффекты использования

- Сокращение времени проведения испытаний цифровых комплексов РЗА и АСУ ТП в 5 раз.
- Предупреждение нарушений в работе цифровых комплексов.
- Повышение качества разрабатываемых проектных решений для цифровых комплексов систем защиты, автоматики и управления по стандарту МЭК 61850.
- Сокращение времени на проведение пуско-наладочных работ цифровых комплексов систем защиты, автоматики и управления цифровых подстанций и РЭС.
- Повышение надежности функционирования цифровых комплексов систем защиты, автоматики и управления по стандарту МЭК 61850.
- Смягчение требований к квалификации электротехнического персонала в части специфических знаний стандарта МЭК 61850 и IT-технологий.

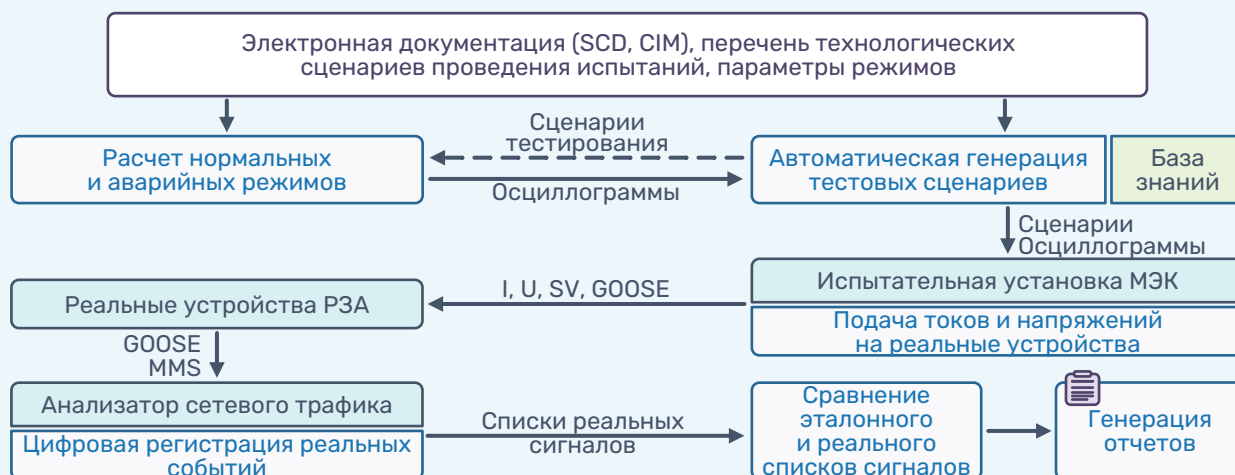
Принцип работы

Продукт осуществляет функциональную проверку и контроль работоспособности систем РЗА, выполненных по стандарту МЭК 61850, на стадиях проектирования и проведения пуско-наладочных работ, а также в процессе эксплуатации.

- На стадии проектирования верификация и валидация файлов электронной документации цифровых комплексов РЗА и распределенной автоматики РЭС осуществляется на основе требований действующей нормативно-технической документации и дополнительных расчетных данных стадии проектирования по режимам электрической сети и параметрам уставок.



Алгоритм проверки на стадии проектирования



Алгоритм проверки на стадиях наладки и эксплуатации

- На стадии пуско-наладочных работ проверка выполняется посредством анализа функционирования комплексов РЗА на основе генерируемого перечня технологических сценариев проведения функциональных испытаний цифровых комплексов РЗА и оптимального состава управляющих воздействий распределенной автоматизации с соответствующим ему перечнем параметров режимов работы РЭС.
- В процессе эксплуатации контроль производится посредством фиксации событий срабатывания функций комплексов РЗА, распределенной автоматизации и всей зарегистрированной технологической информации о режиме работы энергообъекта, сопутствующей контролируемым событиям, и их анализа и сравнения с эталонным функционированием.

Продвижение и использование:

Поставки продукта

Успешная опытная эксплуатация ПАК АСПИ на ПС 110/35/10 кВ «Выездное» в период с июля по октябрь 2022 г.

Партнеры

- Разработка продукта велась по заказу ПАО «Россети Центр и Приволжье».
- Индустриальный партнер – ООО «ИЭЭС»





Автоматизированная система расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистемах

Краткое описание

ПК АРПС предназначен для обеспечения требований селективности и чувствительности релейной защиты в условиях быстро меняющихся режимов работы. Одной из основных проблем при выборе уставок защиты является увеличение скорости изменения и диапазонов значений режимных параметров в микроэнергосистемах и распределительных сетях с распределенной генерацией. Такие условия не позволяют использовать универсальный набор уставок защиты для всех возможных схемно-режимных вариантов.

Система решает эту проблему путем автоматического вычисления параметров срабатывания устройств РЗА. Режимные параметры системы рассчитываются с использованием данных об электроэнергетической сети, содержащихся в CIM-модели, на основе которых определяются оптимальные уставки для релейных защитных устройств. Этот расчет осуществляется в реальном времени, позволяя системе быстро адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать эффективную и надежную работу РЗА.

Функциональные возможности

- Редактирование исходной электрической схемы сети, изменение параметров ее элементов.
- Автоматический расчет эквивалента внешней сети.
- Автоматический расчет параметров срабатывания токовых ступенчатых защит от междуфазных КЗ, ТЗНП (ТНЗНП), ДЗ для радиальных и кольцевых сетей.
- Автоматическая оценка чувствительности защит.
- Автоматическое изменение уставок в устройствах РЗА в режиме реального времени.
- Экспорт рассчитанных параметров срабатывания в электронный файл уставок формата CPD.

Пользователи продукта

Проектные и эксплуатирующие организации.

Принцип работы

Система АРПС РЗА выполнена с использованием микросервисной архитектуры, что позволяет использовать ее функционал в разных режимах.

- **Режим оффлайн:** Оператор запускает ПК АРПС на своем компьютере или локальном сервере, загружая данные о микроэнергосистеме или распределительной сети. Система предоставляет результаты расчета параметров срабатывания релейной защиты, позволяя оператору оптимизировать уставки релейной защиты для обеспечения требуемой чувствительности и селективности.
- **Режим онлайн (на объекте):** Программно-технический комплекс АРПС устанавливается на объекте и непрерывно мониторит текущие режимные параметры в реальном времени. При изменении режимных параметров система автоматически рассчитывает и изменяет параметры срабатывания релейной защиты для обеспечения эффективной и надежной защиты объекта.
- **Режим онлайн (облачный сервис):** Облачный сервис ПК АРПС работает удаленно, не требуя установки на объекте. Сервис осуществляет процесс расчета и корректировки параметров срабатывания в режиме максимальной автоматизации. Результаты расчетов и актуальная информация о системе релейной защиты доступны пользователям через интерфейс облачного сервиса.

Продвижение и использование:

Поставки продукта

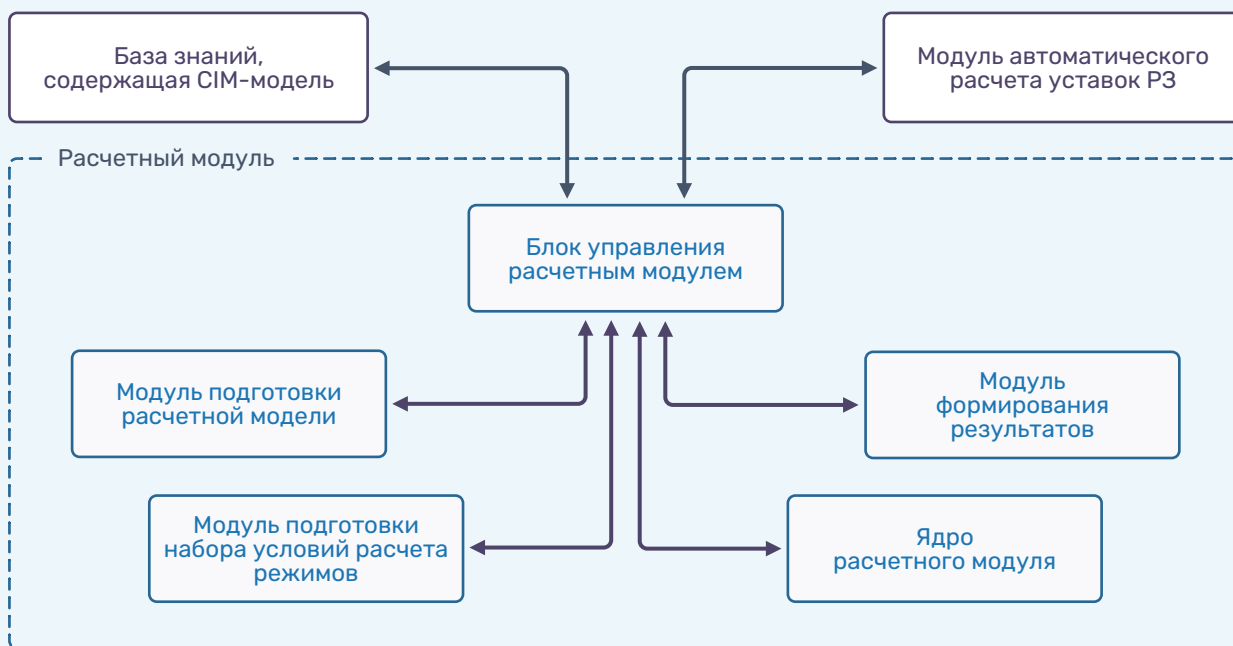
- В 2021 году заключен договор дистрибуции с ООО «Сател» на продвижение программного продукта на территории Российской Федерации.
- В 2022 году заключен лицензионный договор с ЗАО «ЭнЛаб» на передачу неисключительного права использования РИД.

Партнеры

- АО «НТЦ ФСК ЕЭС» - опытно-промышленное апробирование РИД, полученных Центром.
- ООО «Инбрэс» - производство ПТК с использованием РИД, полученных Центром.

Результаты интеллектуальной деятельности

- Автоматизированная система расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистеме (свидетельство на программу для ЭВМ № 2021668958 от 22.11.2021 г.).
- Программа расчета нагрузочных и аварийных режимов (свидетельство на программу для ЭВМ № 2021661849 от 16.07.2021 г.).
- Сервис оптимизации параметров элементов электрической схемы (свидетельство на программу для ЭВМ № 2020661173 от 18.09.2020 г.).
- База знаний требований к защите первичного оборудования микроэнергосистемы (свидетельство на БД для ЭВМ № 2020622475 от 01.12.2020 г.).



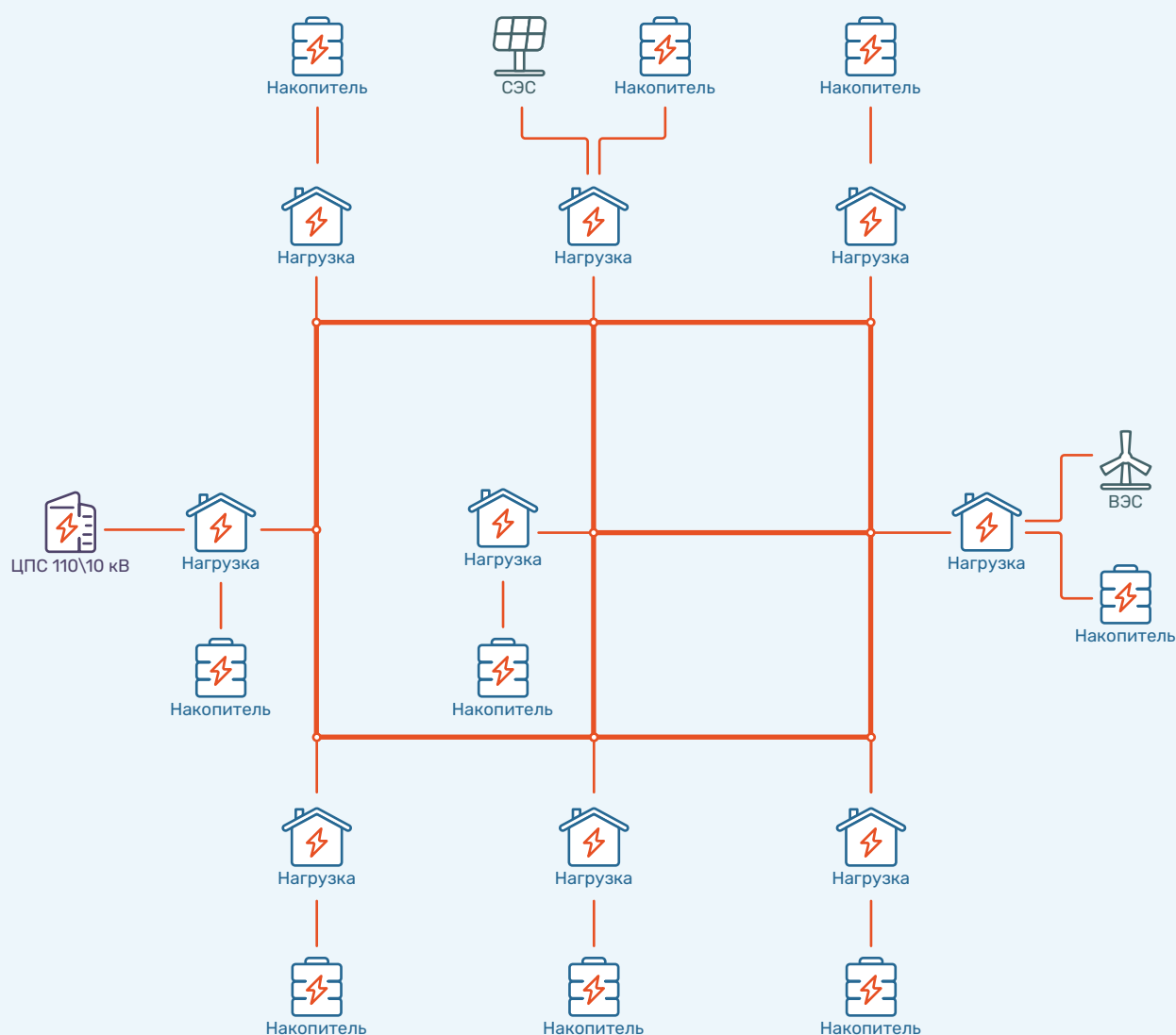
Функциональная структура расчетного модуля

Интеллектуальная система энергоснабжения

Интеллектуальная система энергоснабжения – комплексный продукт Центра НТИ МЭИ, объединяющий в себе технологии по управлению распределительными сетями (микроэнергосистемами) с распределенной генерацией.

Разработано два варианта реализации продукта.

- Первый вариант строится на персональных энергоблоках и мультиагентной системе управления. Он предназначен для использования в изолированных микроэнергосистемах на постоянном токе с топологией “точка-точка”.
- Второй вариант базируется на **энергетических роутерах, системе управления накопителем электроэнергии и распределенной системе управления микроэнергосистемой**. Он предназначен для микроэнергосистем на переменном токе и позволяет обеспечивать их работу как в изолированном режиме, так и в режиме подключения к внешней сети.



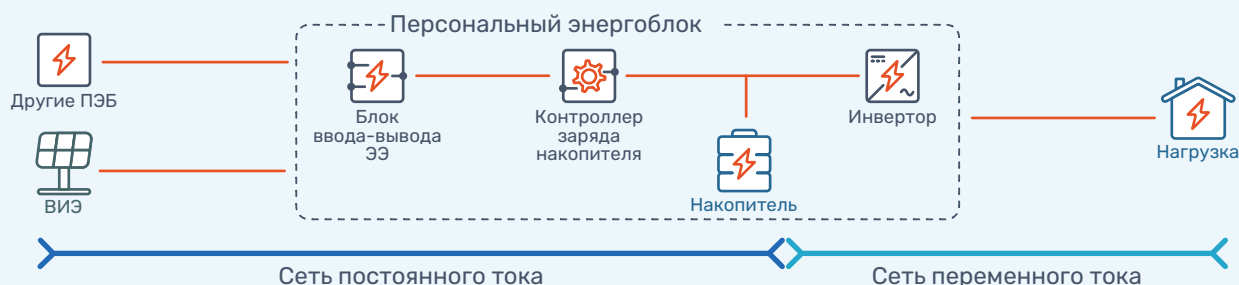
Микроэнергосистема

Персональный энергоблок

Краткое описание

Персональный энергоблок – интеллектуальное устройство потребителя электроэнергии, обеспечивающее возможность подключения ВИЭ и накопления энергии. В отличие от обычных накопителей, в энергоблоке реализован функционал «умной» покупки и продажи энергии.

Персональный энергоблок состоит из накопителя электроэнергии, зарядно-подзарядного устройства, инвертора, блоков ввода-вывода электроэнергии и интеллектуального блока управления.



Структурная схема персонального энергоблока (Пример исполнения)

Персональные энергоблоки соединяются между собой электрическими и цифровыми связями по типу «точка-точка». Каждый энергоблок управляется самостоятельным программным агентом, осуществляющим управление энергетическими транзакциями, которые балансируют спрос и потребление электроэнергии в сети. Согласование работы персональных энергоблоков осуществляется интеллектуальной системой управления.

Функциональные возможности

- Подключение ВИЭ и дизель-генераторов.
- Накопление электроэнергии.
- Прогнозирование нагрузки потребителя.
- Участие в торгах электроэнергией.
- Обеспечение требуемого питания потребителя посредством торгов на локальных розничных рынках электроэнергии.

Пользователи продукта

Активные потребители электроэнергии (просьюмеры).

Принцип работы

Энергоблок за счет мультиагентного взаимодействия с другими энергоблоками принимает решение об оптимальном сценарии поведения на локальном энергорынке с целью минимизации затрат на покупку электроэнергии, в частности:

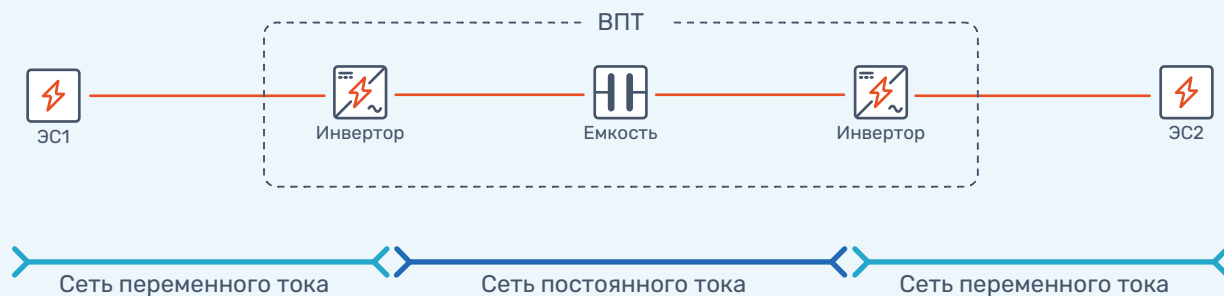
- использует произведенную собственными источниками электрическую энергию для питания нагрузок потребителя, а также ее накопления в аккумуляторной батарее;
- осуществляет закупку электроэнергии на локальном энергетическом рынке в случае недостатка электроэнергии, произведенной собственными источниками;
- осуществляет продажу электроэнергии на локальном энергетическом рынке в случае избытка электроэнергии, произведенной собственными источниками, или роста спроса на электроэнергию в микроэнергосистеме.

«Интеллектуальная система электроснабжения на базе Персональных ЭнергоБлоков (ПЭБ)» – победитель конкурса Энергопрорыв.

Энергорouter

Краткое описание

Энергорouter – устройство силовой преобразовательной техники, которое предназначено для управления потоками мощности, а также согласования напряжений в распределительных электрических сетях. Основой устройства является вставка постоянного тока (ВПТ) на базе инверторов, что позволяет управлять передачей активной и реактивной мощности в двух направлениях.



Структурная схема энергорoutера (Пример исполнения)

Энергорouter, как и персональный энергоблок, может использоваться в качестве устройства подключения потребителей электроэнергии, а также как устройство распределения электроэнергии и управления перетоками в микроэнергосистеме.

По функциональному месту расположения энергорouterы можно разделить на следующие типы.

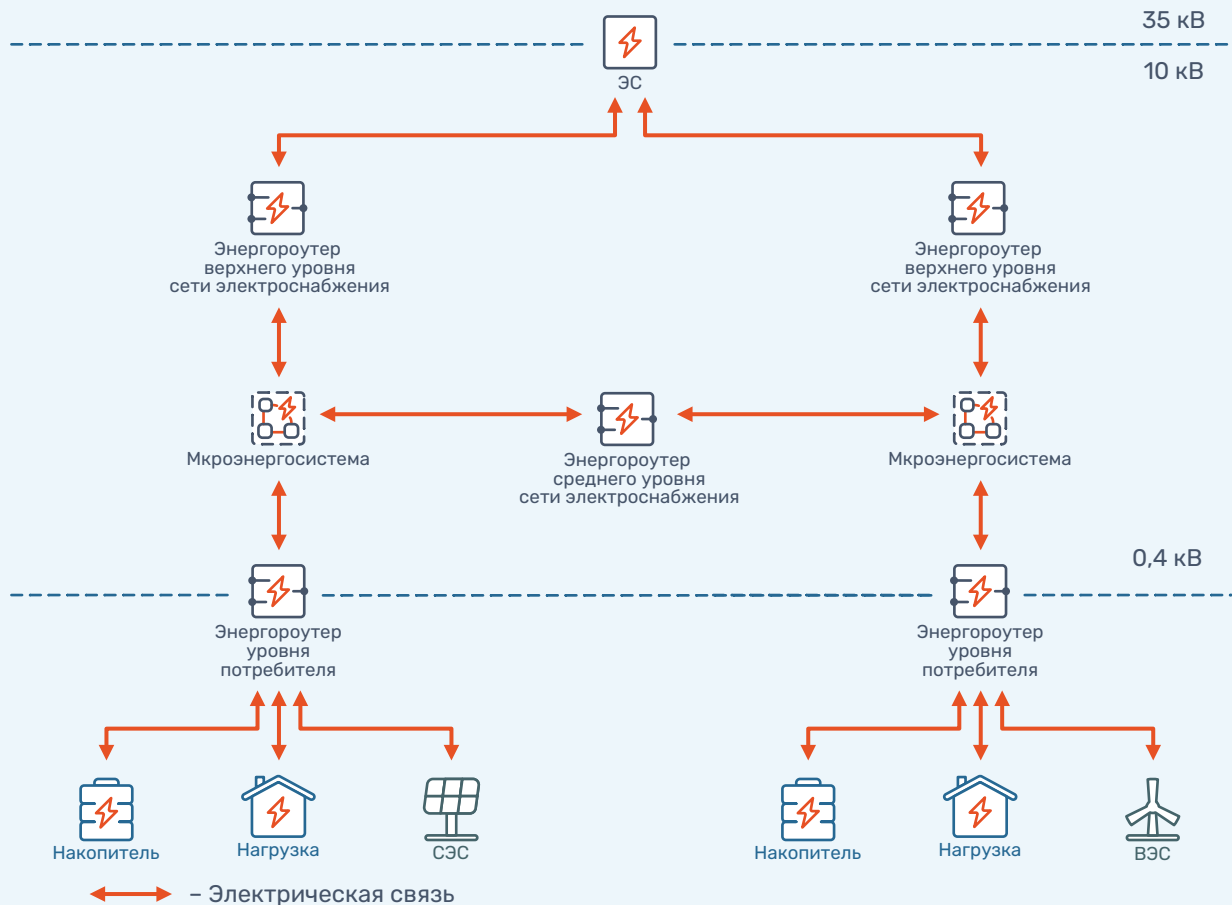
- Энергорouter верхнего уровня системы электроснабжения.
- Энергорouter среднего уровня системы электроснабжения.
- Энергорouter уровня потребителя.

Функциональные возможности

- Регулирование перетоков активной и реактивной мощности между сегментами энергосистемы, объединенными энергорouterами и образующими единую сеть электроснабжения.
- Регулирование частоты и напряжения в микроэнергосистеме для передачи электроэнергии с применением внешних устройств автоматики.
- Поддержание баланса генерации, передачи и потребления электроэнергии в системе электроснабжения.
- Работа в изолированном и подключенном к сети крупной энергосистемы режиме.
- Управление перетоками мощности в системах электроснабжения с динамически изменяющейся топологией.
- Защита электрической сети системы электроснабжения, автоматический перевод в изолированный режим.

Пользователи продукта

Операторы локальных рынков, поставщики энергетических сервисов, активные потребители электроэнергии (просьюмеры).



Система электроснабжения с энергорутерами

Принцип работы

Сценарии использования энергорутера зависят от функционального типа его расположения в системе:

- энергорутер верхнего уровня системы электроснабжения используется, во-первых, для разделения отдельных подсетей и контроля перетока мощности, во-вторых, для обеспечения защиты и ограничений энергообмена от внешней сети при изолированном режиме работы;
- энергорутер среднего уровня сети электроснабжения применяется для контроля и управления направлением перетока электроэнергии от локальных источников генерации, обеспечивая синхронизацию отдельных сегментов сети;
- энергорутер уровня потребителя используется в качестве интерфейса подключения потребителей низкого класса напряжения к сети электроснабжения более высокого класса напряжения. Использование энергорутера такого типа предоставляет потребителям возможность интеграции ВИЭ и накопителей электроэнергии, а также позволяет более эффективно использовать электроэнергию за счет возможностей передачи излишков мощности от одного потребителя к другому. Работа накопителей регулируется специализированной Системой управления накопителями электроэнергии.

Продвижение и использование

Поставки продукта

- В рамках создания «Демонстрационного полигона интеллектуальных систем управления микрогрид» разработаны опытные образцы энергорутера в соответствии с техническими требованиями Центра НТИ МЭИ для натурного апробирования технологий Центра и демонстрации их работоспособности и эффективности потенциальным заказчиком.

Индустриальные партнеры

- ООО «Сател» и ООО «НПФ Вектор».

Система управления накопителем электроэнергии

Краткое описание

Система управления накопителем электроэнергии – программно-технический комплекс, предназначенный для проактивного управления зарядом накопителя энергии с учетом прогнозов генерации и потребления электроэнергии в сети для повышения эффективности использования ВИЭ, отличающихся стохастичным характером генерации энергии.

Функциональные возможности

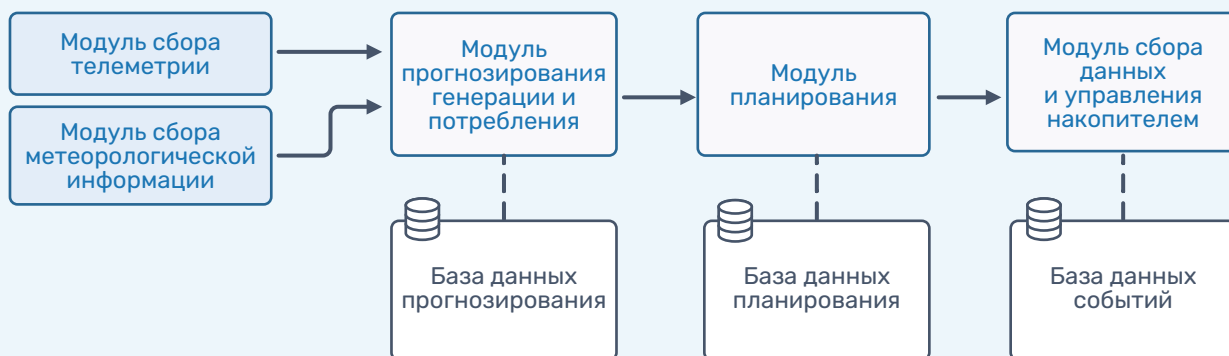
- Прогнозирование потребления электроэнергии на основе ретроспективных данных.
- Прогнозирование генерации ВИЭ на основе модели энергосистемы и прогнозной информации о метеорологических условиях.
- Расчет и выполнение оптимальной последовательности управляющих воздействий в электрической сети для управления накопителем.

Пользователи продукта

Операторы локальных рынков, поставщики энергетических сервисов, активные потребители электроэнергии (просьюмеры).

Принцип работы

Система осуществляет прогнозирование с использованием методов интеллектуального анализа ретроспективных данных и метеорологического прогноза на ближайшие сутки. На основе прогноза принимается решение об оптимальной последовательности управляющих команд для минимизации следующих последствий: избыточный заряд или разряд накопителя; наличие дисбаланса генерируемой и потребляемой электроэнергии на заданном интервале действий; потребление топлива для включения резервного генератора; отключение управляемой нагрузки потребителей.



Структура программных модулей системы

Результаты интеллектуальной деятельности

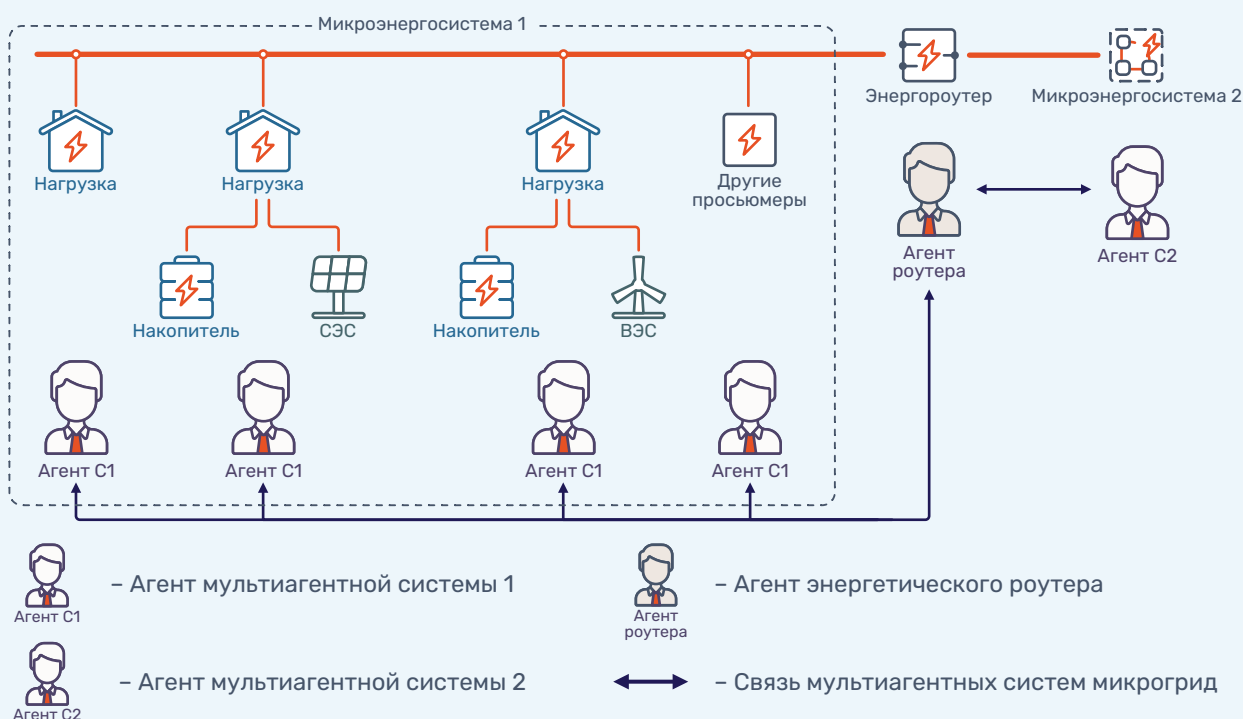
- Сервис прогнозирования генерации ветроустановок (свидетельство на программу для ЭВМ № 2022610318 от 11.01.2022 г.).
- Сервис прогнозирования нагрузки потребителей (свидетельство на программу для ЭВМ № 2022610319 от 11.01.2022 г.).
- Сервис прогнозирования генерации солнечных электростанций (свидетельство на программу для ЭВМ № 2022610898 от 17.01.2022 г.).

Распределенная система управления микроэнергосистемами

Краткое описание

ПТК РСУМ предназначен для автоматического управления устройствами генерации и потребления энергии в микроэнергосистеме с учетом прогнозов выработки электроэнергии и спроса на нее в узлах. ПТК РСУМ организован на мультиагентном принципе и может управлять как одной, так и несколькими связанными друг с другом микроэнергосистемами. Взаимодействие между мультиагентными системами двух отдельных микроэнергосистем осуществляется через агентов – объединяющих их энергоустройств.

ПТК РИСУ предназначен для оптимизации потерь активной мощности в группе энергокластеров на основе децентрализованного подхода к управлению техническими средствами регулирования напряжения и реактивной мощности. ПТК РИСУ построен на сервис-ориентированной архитектуре и мультиагентном принципе взаимодействия как между отдельными единицами технологического оборудования внутри энергокластера, так и между энергокластерами независимо от их масштаба и типа.



Архитектура системы распределенного управления на базе ПТК РСУМ и ПТК РИСУ

Функциональные возможности

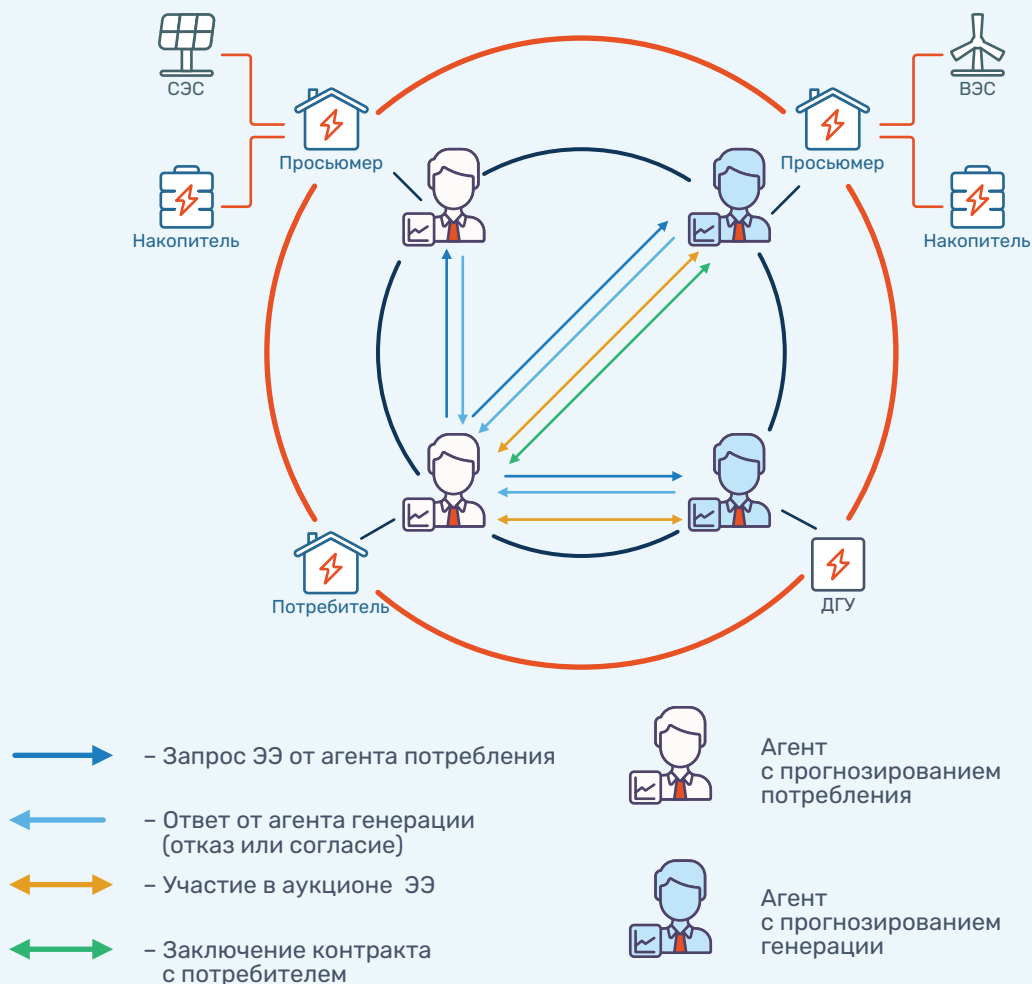
- Организация торгов электроэнергией посредством взаимодействия агентов.
- Организация торгов системными услугами посредством взаимодействия агентов.
- Организация работы микроэнергосистемы в изолированном и подключенном к сети режимах.
- Управление балансом электроэнергии и мощности в системе.
- Управление режимами энергосистем по напряжению и реактивной мощности

Пользователи продукта

Операторы локальных рынков, поставщики энергетических сервисов.

Принцип работы

Система обеспечивает баланс генерируемой и потребляемой энергии в микроэнергосистеме за счет согласования работы самостоятельных программных агентов, которые управляют узлами генерации и потребления электроэнергии в микроэнергосистеме. Каждый программный агент решает задачу оптимизации режима работы своего узла в следующих возможных сценариях: покупка/продажа электроэнергии, обеспечение требуемого качества электроэнергии, обеспечение должной надежности и восстановления после аварий. Для этого он включается в торги с другими программными агентами и заключает сделки на основе самых выгодных предложений.



Организация взаимодействий в мультиагентной системе управления на примере торгов ЭЭ

Продвижение и использование:

Поставки продукта

- Реализуется распространение разработанных технологий в рамках выполнения международного проекта стран БРИКС (Россия, Китай, Бразилия) по заказу Минобрнауки России.
- Включение решений на базе технологий интеллектуальной системы электроснабжения в состав испытательного полигона центра НТИ МЭИ «Демонстрационный полигон интеллектуальных систем управления микрогрид».

Партнеры

ООО «ЦПИ ЦОТЭ» – разработка и проведение испытаний и опытной эксплуатации опытного образца системы управления накопителем электроэнергии с использованием технологий, разработанных Центром.

Результаты интеллектуальной деятельности

- Модуль планирования поведения агентов РСУМ (свидетельство на программу для ЭВМ № 2022684839 от 19.12.2022 г.).
- Мультиагентная система РСУМ (свидетельство на программу для ЭВМ № 2022685135 от 21.12.2022 г.).
- Система мониторинга РСУМ (свидетельство на программу для ЭВМ № 2022685314 от 22.12.2022 г.).
- Способ управления режимами электроэнергетической системы (патент на изобретение № 2750260 от 25.06.2021 г.).
- Web сервис отображения структуры и параметров электрической сети (свидетельство на программу для ЭВМ № 2020618351 от 24.07.2020 г.).
- Сервис базы данных «Хранилище временных рядов оперативной информации» (свидетельство на программу для ЭВМ № 2020618326 от 24.07.2020 г.).
- Адаптер IEEE C37.118 для интеграционной платформы сервис-ориентированной архитектуры (свидетельство на программу для ЭВМ № 2020618201 от 22.07.2020 г.).
- Адаптер МЭК 60870-5-104 для интеграционной платформы сервис-ориентированной архитектуры (свидетельство на программу для ЭВМ № 2020618489 от 29.07.2020 г.).

Мы очень рады успешному осуществлению нами столь амбициозного проекта как создание и развитие на базе нашего университета Центра Национальной Технологической Инициативы по направлению «Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем». Совместно с промышленными партнерами по Консорциуму на протяжении всего периода работы Центра мы старательно исследуем и разрабатываем технологии действительно востребованные реальным сектором экономики. Это подтверждается многочисленными внедрениями наших технологических продуктов и разработок на предприятиях энергетики и положительными эффектами от их применения.



Значимость и высокий технологический уровень результатов нашей работы признаны и на международном уровне, победой в 2020 году сразу двух проектов Центра в конкурсе инноваций в Израиле, организованном Китайской ассоциацией качества, а также использованием полученных разработок Центра в партнерском проекте со странами БРИКС, ставшим победителем в рамках 5-го конкурса «Наука, технологии и инновации» в 2022 году. Нам приятно осознавать высокую оценку и востребованность результатов нашей работы, и мы продолжим развитие Центра и разработку новых технологий для достижения технологического суверенитета нашей страны в энергетическом секторе экономики.

Н.Д. Роголев – ректор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»