

УДК 621.311.4 :378.1
doi:10.18720/SPBPU/2/id23-488

*Попов Станислав Олегович*¹,
доцент, канд. техн. наук, доцент;
*Хохловский Владимир Николаевич*²,
доцент, канд. техн. наук, доцент;
*Гуцин Михаил Витальевич*³,
ассистент

СОЗДАНИЕ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПО ЦИФРОВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

^{1, 2, 3} Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого,
^{1, 3} popov_so@mail.ru, ² hohlovskij_vn@spbstu.ru

Аннотация. Предложена концепция построения научно-образовательного комплекса по цифровым технологиям в электроэнергетике. Необходимость постановки и решения такой задачи обусловлена логикой цифровой трансформации отрасли, в основе которой лежат внедрение адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления и регулирования, использование методов искусственного интеллекта, эффективное применение вычислительных быстродействующих систем и сетевых технологий.

Приведенный анализ уровня технологической готовности позволил сформулировать требования к научно-образовательному комплексу. В статье рассмотрен состав и круг основных задач на примере изложения вопросов, связанных с релейной защитой и автоматикой в учебных и научно-исследовательских подразделениях Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Локальная вычислительная сеть комплекса объединяет лаборатории различных институтов СПбПУ, заинтересованных в решении задач цифровой трансформации электроэнергетики.

Ключевые слова: цифровая трансформация, электроэнергетика, цифровая подстанция, стандарт МЭК 61850, программно-аппаратный комплекс моделирования, имитационное моделирование.

*Stanyslav O. Popov*¹,

Docent, Candidate of Technical Sciences;

*Vladimir N. Khokhlovskiy*²,

Docent, Candidate of Technical Sciences;

*Mikhail V. Gushchin*³,

Assistant

DESIGN OF RESEARCH AND EDUCATIONAL LABORATORIES ON DIGITAL PROCESSES IN ELECTRIC POWER INDUSTRY

^{1, 2, 3} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia, ^{1, 3} popov_so@mail.ru, ² hohlovskij_vn@spbstu.ru

Abstract. The concept of scientific and educational distributed laboratories on digital technologies in the electric power industry is proposed. The need to set and solve such a problem is under consideration because of the logic of digital transformation of the industry, which is based on the introduction of adaptive and intelligent control and regulation algorithms, use of artificial intelligence, the effective utilization of high-speed computing systems and communication network technologies. An analysis of the level of technological readiness made it possible to formulate requirements for the scientific and educational complex. The article considers composition of the laboratories, and scope of the main tasks using the example of relay protection and automation in educational and research departments of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. The local area network of the complex unites the laboratories of various SPbPU institutes interested in solving the problems of digital transformation of the electric power industry.

Keywords: digital transformation, electric power industry, digital substation, IEC 61850 standard, software and hardware means for simulation, computer simulation.

Введение

В настоящее время в нашей стране претворяется в жизнь концепция цифровой трансформации, в основе которой лежат внедрение адаптивных и интеллектуальных алгоритмов управления и регулирования, эффективное применение вычислительных сверхбыстродействующих систем и сетевых технологий [1]. Широкое применение новых цифровых возможностей в различных технологических системах позволяет спро-

гнозировать их интенсивное внедрение в электроэнергетический комплекс. Однако при этом существуют несколько серьезных технологических барьеров, обусловленных особенностями электроэнергетических систем, среди которых можно выделить тесное взаимовлияние отдельных элементов друг с другом, высокую скорость распространения переходных процессов в системе, энергоемкость, металлоемкость и непрерывность процесса генерации, передачи и потребления электроэнергии в ЭЭС. Это обуславливает постепенное внедрение новых технологий с одновременной их доработкой и многоэтапной интеграцией в систему управления ЭЭС. Обеспечение эффективности технологического развития отрасли невозможно без комплексного рассмотрения совокупности всех процессов развития технологий с использованием методов системного анализа. Важным аспектом является подготовка квалифицированных кадров и развитие необходимых «цифровых» компетенций у работающих специалистов, в частности, в службах эксплуатации — возможность проводить квалифицированную опытную эксплуатацию, в проектных подразделениях — способность провести и выполнить эффективную и уместную интеграцию в существующие системы управления, в пусконаладочных организациях — умение провести полноценное тестирование и диагностику внедряемых устройств и программ и т. д.

Переход к локальным вычислительным сетям, распределенным вычислительным системам и искусственному интеллекту в алгоритмах управления, а также существенное повышение доступного объема информации требует принципиального изменения в подходах к своей профессиональной деятельности и, зачастую, мышления сотрудников. Подобная трансформация компетенций также требует управления и регулирования со стороны соответствующих специалистов, в том числе преподавателей вузов. Это особенно важно в свете того, что наиболее компетентные специалисты вовлекаются в процесс инновационного развития и во многом существенно на него влияют.

1. Процесс технологического развития электроэнергетической отрасли и требования к научно-образовательному комплексу

Рассмотрим процесс технологического развития отрасли с использованием шкалы оценки уровня технологической готовности (УТГ) [2] на рисунке 1.

Данная шкала позволяет системно описать развитие технологии от начальной идеи до выпуска в серийное производство, при этом переход на новый УТГ определяется выполнением определенных исследовательских процессов.



Рис. 1. Шкала оценки уровня технологической готовности

На каждом новом уровне развития технологии требуются свои отличительные компетенции и возможности лабораторного и производственного оборудования. В этой связи на разных стадиях эффективно объединение различных участников. Так, например, на первых стадиях исследований участие вузов и НИИ, очевидно, наиболее оптимально, некоторые работы могут выполняться без привлечения производственных предприятий, на последующих стадиях доля участия в работах производственных предприятий возрастает и постепенно становится наибольшей. На заключительных стадиях развития активное участие в доработке технологии принимает непосредственно предприятие-заказчик, то есть конечный пользователь технологии: проводит профессиональную опытно-эксплуатационную, приемо-сдаточные испытания и другие виды работ. Также на заключительных стадиях целесообразно привлекать независимых экспертов, в задачи которых войдут не только вопросы оценки эффективности, но и указание путей уменьшения рисков функционирования при внедрениях. Для этих работ также уместно привлечение вузов. В электроэнергетике заключительные стадии становятся весьма содержательными, так как ни одна математическая или физическая модель не может полноценно воспроизвести все реальные условия эксплуатации

и процессы управления. Характерным примером является текущий процесс реализации «Цифровых подстанций», в рамках которого они реализуются по одной из трех архитектур, предлагаемых стандартом [3–5]. Текущий накопленный опыт эксплуатации указывает на то, что такие подстанции становятся менее надежными, более дорогими и в дальнейшем необходимо приходиться к новым типам архитектур. При этом только при условии накопления опыта эксплуатации подстанций, построенных по текущим стандартам, возможно выработать оптимальные решения и скорректировать те алгоритмы и технологии построения локально-вычислительных сетей, которые внедряются сейчас.

К сожалению, сегодня наблюдаются разрывы единого процесса развития технологий, который приводит к замедлению появления новых готовых решений, но, главное, — существенно тормозят процесс технологического развития или делают его вообще невозможным. В рамках данной статьи обратим внимание только на те проблемы, которые могут решаться с участием вузов. Во-первых, приходится констатировать тот факт, что разработки, начинающиеся в вузах, в дальнейшем передаются производственным предприятиям и дальнейшее участие вузов в разработке прекращается. Некоторые единичные проекты, доведенные вузами до реального промышленного внедрения, лишь подчеркивают сложившееся общее положение. Существует также существенная проблема достоверной информации об устойчивости функционирования энергосистемы и отдельных ее элементов, которая озвучивается регулярно многими специалистами. Общая закономерность представления в отчетах работы электроэнергетической системы, как хорошей, и минимизация информации об нештатных ситуациях практически исключает целенаправленное, а значит эффективное проведение первичных научно-исследовательских работ. Отчасти это обусловлено тем, что при рассмотрении экономических условий выполнения проекта по развитию конкретной единичной технологии привлечение вуза на заключительных стадиях считается не целесообразным.

Вместе с тем, если рассмотреть процесс технологического развития с более общих позиций и рассмотреть развитие нескольких технологий, связанных друг с другом, то в этом случае можно определить целый ряд очевидных преимуществ: Во-первых, теоретическая разработка может обуславливать несколько различных устройств или алгоритмов управления, специализированных на различные объекты управления. Например, новый принцип дифференциальной защиты сначала может доведен до промышленного образца устройства защиты шин, а в дальнейшем проработан для защиты трансформатора. Участие в опытной эксплуатации и получение качественного анализа данных позволяет проявить новые задачи или скорректировать планы научно-поисковых работ. Другим важным фактором повышения эффективности является то, что привлекаются преподаватели вузов к участию в кооперации с сотрудниками

производственных предприятий, а на заключительных этапах — с работниками эксплуатирующих организаций. Это позволяет параллельно выполнению непосредственных задач проекта выстраивать индивидуальные траектории развития персонала предприятий соучастников проекта или предприятия заказчика. Таким образом обеспечиваются не только внедрение технологии, готовность персонала к ее использованию, но и качественное повышение квалификации сотрудников. Причем именно этому фактору технологического развития сегодня уделяется наименьшее внимание, а часто он полностью упускается из вида.

Стоит отметить и необходимость методического описания процессов управления технологическим процессом передачи и распределения электроэнергии. В последнее время наблюдается общее стремление к решению указанных проблем и появляются примеры успешного взаимовыгодного сотрудничества. В этой связи СПбПУ должен активно наращивать взаимодействие со всеми участниками отрасли и занимать заметное и активное место в технологическом развитии электроэнергетики, которая сегодня во многом связана с внедрением цифровых технологий. Одним из ключевых моментов является создание научно-исследовательского полигона — учебно-образовательного комплекса. Сформулируем основные требования к его реализации:

1. Комплекс должен обеспечивать возможность участия вуза в разработке технологий на всех стадиях ее развития вплоть до сертификационных испытаний.
2. Комплекс должен обеспечивать плавный и простой переход от одного этапа развития к последующему;
3. Комплекс должен давать возможность построения учебных тренажеров.
4. Комплекс должен иметь гибкую архитектуру и позволять проводить несколько исследований параллельно, в том числе с использованием дистанционного доступа.

2. Концепция построения научного-образовательного комплекса СПбПУ по цифровым технологиям в электроэнергетике

Лабораторный комплекс призван удовлетворить сформулированным выше требованиям; он включает три основные части.

Программно-технический комплекс (ПТК) ЦПС. Совокупность программно-аппаратных средств, обеспечивающих функционирования кибернетической среды управления объектом электроэнергетики с использованием доступных на момент реализации образцов оборудования и, наравне с ними, эмуляторов оборудования для воспроизведения программными или аппаратными средствами (либо их комбинацией) работы программ или устройств, которые в данный момент не имеются в виде промышленных образцов.

Вычислительный комплекс, реализующий моделирование системы управления. Предназначен как для воспроизведения работы той части системы, которая не вошла в ПТК ЦПС, так и для интеграции в испытательный комплекс новых разрабатываемых алгоритмов и программных сервисов.

Вычислительный комплекс, реализующий моделирование электроэнергетической системы. Все части полигона сопряжены друг с другом через соответствующие устройства сопряжения (усилители тока и напряжения, датчики, преобразователи интерфейсов и т. п.). Такое построение комплекса позволяет проводить испытания, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации.

3. Состав и основные задачи комплекса

Рассмотрим круг возможных решаемых задач комплекса на примере разработки алгоритмов релейной защиты и автоматики. Система релейной защиты и автоматики является комплексной системой, которая основана на взаимодействии множеств элементов и подсистем, включая человека, и неразрывно связана с первичной электроэнергетической системой (рис. 2).

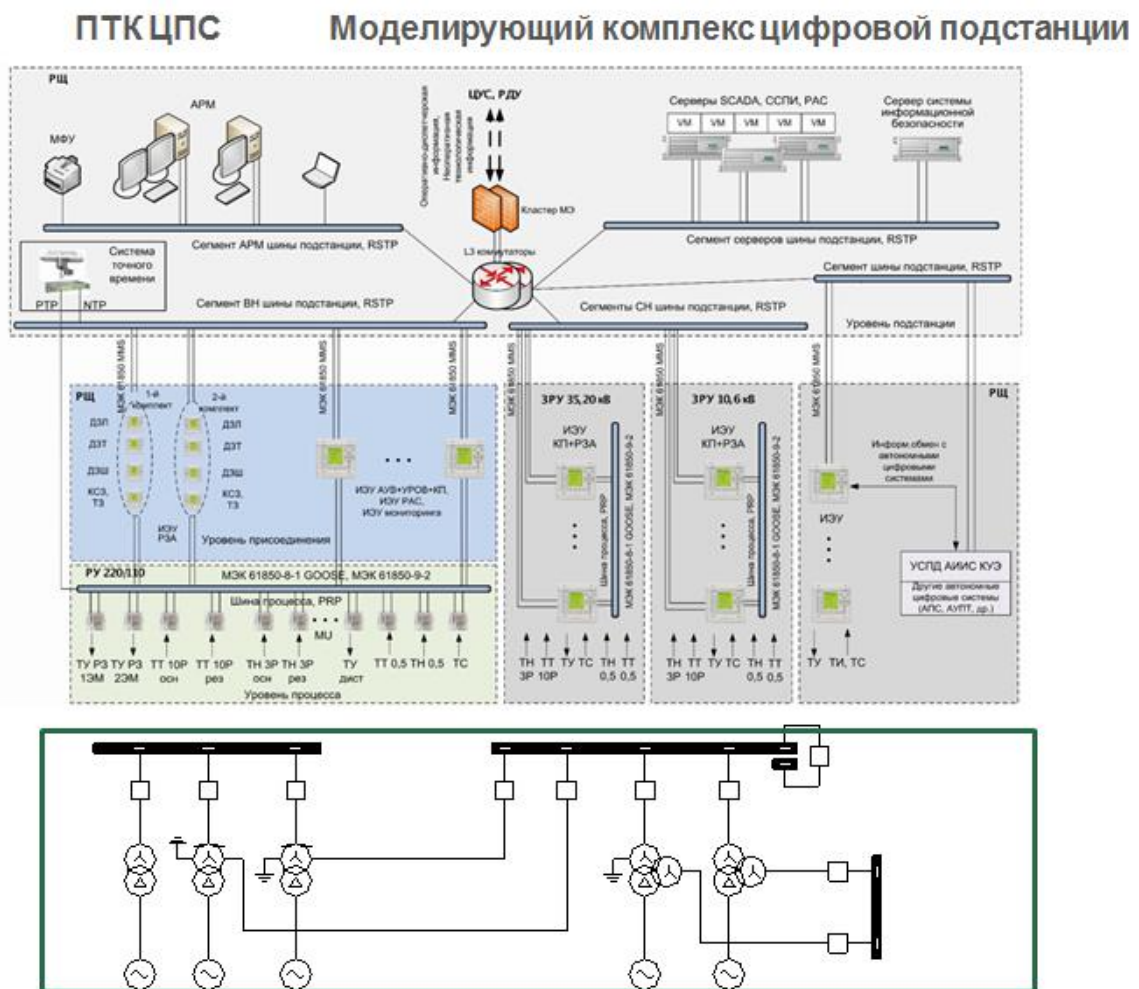


Рис. 2. Программно-аппаратный комплекс «Цифровая подстанция»

Ее особая ответственность в обеспечении электроснабжения потребителей и, как следствие, высочайшие требования по надежности ее функционирования обуславливают сложную структуру резервирования как ее отдельных элементов, так и каналов связи между ними. При этом резервирование реализуется как на функциональном уровне, так и на физическом. При моделировании такой системы важно воспроизвести работу не только отдельных элементов системы (функциональных и/или аппаратных), но и структуру их взаимодействия друг с другом и человеком.

Наряду с моделью в виде программно-технических средств в лабораторный комплекс входит подсистема имитационного моделирования ЦПС. Она соответствует требованиям, установленным стандартом МЭК 61850, и позволяет проводить эксперименты с моделью. Имитационная модель построена на основе агентно-ориентированного подхода [6] в системе Anylogic [7, 8] и включает модели для SV-сообщений, GOOSE-сообщений и MMS-сообщений (МЭК 61850), а также модели агентов «РЗА-устройство» и других.

Созданный лабораторный комплекс и соответствующие модели могут быть использованы для решения следующих задач:

- на первичных стадиях для апробирования предлагаемых алгоритмов и методов защиты;
- для тестирования лабораторных и промышленных образцов устройств, в том числе для их сертификации;
- на стадии проектирования системы для поиска и отработки оптимальных проектных решений;
- в частности, подсистема имитационного моделирования может быть использована для оценки различных характеристик ЦПС, а также для её модернизации путём добавления в модель различных новых устройств, что позволит проанализировать полученные результаты перед тем, как непосредственно внедрять это оборудование в ЦПС;
- на стадии наладки для выявления ошибок проекта и, как следствие, сокращения времени пуско-наладочных работ;
- на стадии эксплуатации позволяет, во-первых, реализовать тренажеры в целях повышения общего уровня компетенций персонала, во-вторых, разработать алгоритмы автоматизированной диагностики системы РЗА.

Стоит отметить, что по мере развития новых решений меняется математическая модель, используемая в испытаниях, так как на разных стадиях развития технологии меняются и требования к модели. Более того, в рамках одной серии экспериментов модель может меняться в зависимости от того какие аспекты функционирования подлежат тестированию. Также постепенно расширяется используемый ПТК для проверки совме-

стимости работы с другими элементами единой системы управления. Важно отметить, что комплекс позволяет проверить работу нового устройства совместно с разными поколениям устройств РЗА (электро-механическими, микропроцессорными и т. д.), что часто является важным условием эксплуатации на реальных объектах, когда идет поэтапная модернизация действующих установок. Проведение подобного рода испытаний с использованием цифровых двойников, работающих в темпе переходных процессов технологического объекта, позволяет одновременно разрабатывать программы и методы наладки и дальнейшей диагностики оборудования. Тем самым решается задача повышения качества опытной эксплуатации и обеспечивается возможность эффективного участия разработчика в авторском надзоре за функционированием своих устройств.

На сегодняшний день лабораторный комплекс СПбПУ объединяет шесть лабораторий, часть из которых реализуют ПТК подстанций, выполненных на устройствах разных поколений, в том числе цифровой подстанции, реализованной по 3 архитектуре (рис. 3).

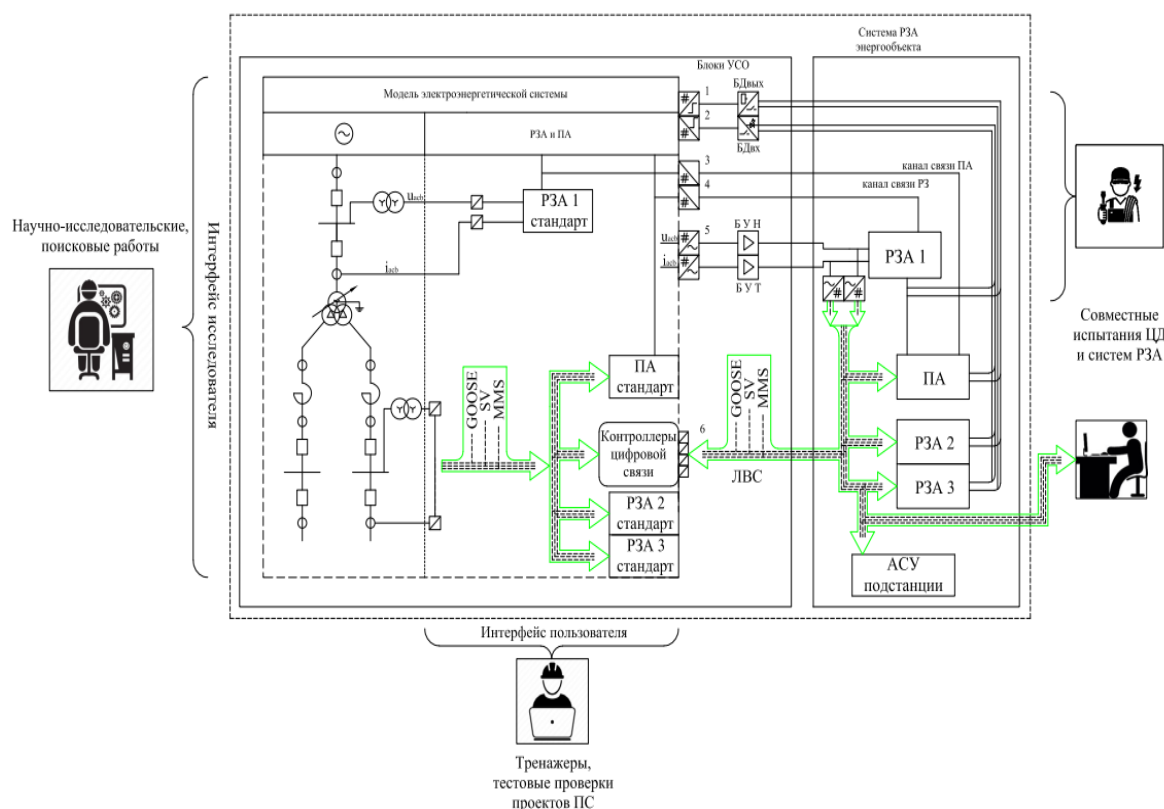


Рис. 3. Схема взаимодействия участников

Эти лаборатории позволяют проводить все виды работ, аналогичных работам на действующих объектах. Кроме этого, реализован класс АСУТП с промышленным ПО. К ПТК лабораторного комплекса организован дистанционный доступ от нескольких компьютерных классов. Также функционирует вычислительный комплекс, моделирующий элект-

троэнергетическую систему и системы управления в темпе переходных процессов (шаг расчета модели до 50 мкс) и сопряженный через усилители тока и напряжения с промышленными образцами устройств управления. Через ЛВС СПбПУ организована связь с лабораторией киберфизических систем управления, что позволяет вести научно-поисковые работы по применению технологий искусственного интеллекта и внедрению перспективных методов автоматизации в электроэнергетике.

Такое построение лабораторий обеспечивает гибкость комплекса и обуславливает возможность быстрой интеграции других лабораторий СПбПУ в случае необходимости при выполнении конкретных НИОКР, а также одновременное проведение нескольких исследований. В частности, возможна организация опережающих исследований, когда несколько параллельных разработок, еще не доведенных до промышленного внедрения, начинают испытываться совместно, тем самым создаются условия для выявления новых синергетических эффектов.

Заключение

Лабораторный комплекс позволяет проводить различные виды учебных и научно-исследовательских работ вплоть до сертификации новых промышленных образцов; его использование приводит к активному и успешному участию в технологическом развитии отрасли.

Методы системного анализа позволяют эффективно реализовывать потенциал СПбПУ и выстраивать стратегию проведения научно-исследовательских работ.

Список литературы

1. Концепция развития релейной защиты, автоматики и автоматизированных систем управления технологическими процессами электросетевого комплекса группы компаний «Россети»: [Электронный ресурс] – URL: https://www.fsk-ees.ru/about/standards_organization/ (дата обращения 01.10.2022).
2. Петров А.Н., Сартори А.В., Филимонов А.В. Комплексная оценка состояния научно-технических проектов через уровень готовности технологий // Экономика науки. – 2016. – Т 2, № 4. – С. 244–260.
3. IEC Smart Grid Standardization Roadmap. Ed. 1.0 – 2009-12.
4. Sidhu T.S., Yin Y. Modelling and simulation performance evaluation of IEC 61850 based substation communication system // IEEE Trans. on Power Del. – 2007. – Vol. 22, No. 3.
5. Kanabar P.M., Kanabar M.G., Khattam W.E., Sidhu T.S. Evaluation of communication technologies for IEC 61850 based Distribution automation system with distributed energy resources // Proc. of IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009.
6. Голубев И.К. Разработка моделей и программ для реализации компонентов цифровой подстанции: выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация). – СПб.: СПбПУ Петра Великого, 2022. – 72 с.
7. Инструмент имитационного моделирования для бизнеса [Электронный ресурс] – URL: www.anylogic.ru/features/ (дата обращения 01.10.2022).
8. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.