

## Архитектура программно-аппаратного комплекса “Цифровой двойник энергосистемы”

- **Волошин А. А.**, канд. техн. наук, НИУ “Московский энергетический институт”, Москва
- **Волошин Е. А.**, НИУ “Московский энергетический институт”, Москва
- **Лебедев А. А.**, канд. техн. наук, НИУ “Московский энергетический институт”, Москва
- **Лебедева Н. С.**, НИУ “Московский энергетический институт”, Москва

Представлено описание архитектуры программно-аппаратного комплекса реального времени “Цифровой двойник энергосистемы”, рассмотрено аппаратное обеспечение каждого уровня комплекса, а также состав программных модулей, исполняемых на каждом уровне, описаны преимущества модульного построения комплекса для реализации различных вариантов применения комплекса.

**Ключевые слова:** моделирование режимов работы энергосистем, цифровой двойник, программно-аппаратная архитектура.

В течение прошедшего десятилетия произошли значительные изменения в структуре электроэнергетических систем, связанные с внедрением в их состав более технологичного первичного и вторичного электроэнергетического оборудования, существенно влияющего как на работу энергосистем на уровне производства, распределения и передачи электроэнергии, так и на функционирование вторичных систем релейной защиты и автоматики.

С ростом технологичности электроэнергетической системы увеличивается потребность и в повышении технологичности инструментов анализа её работы и взаимодействия с управляющими системами. Надёжная эксплуатация электроэнергетических систем, подвергающихся постоянному усложнению, не возможна без всестороннего и тщательного изучения вопросов функционирования современных энергосистем в связке с критически важными для их надёжной работы комплексами релейной защиты, автоматики и управления. Хорошо зарекомендовавшими себя инструментами при проведении подобных исследований являются программно-аппаратные комплексы реального времени (ПАК РВ). Указанные комплексы позволяют создавать высокоточные математические модели энергосистем различной сложности и масштаба, преобразовывать рассчитанные значения из цифровой формы в форму реальных физических сигналов, а также имеют различные программно-аппаратные интерфейсы для подключения как вторичного оборудования, так и силовых устройств.

В 2022 г. в Центре НТИ МЭИ запущена разработка программно-аппаратного комплекса “Циф-

ровой двойник энергосистемы” (ПАК ЦДЭС), к которому изначально предъявлен ряд как стандартных требований, так и требований, превышающих возможности существующих на данный момент ПАК РВ. Среди требований к функциональным возможностям ПАК ЦДЭС можно отнести:

работа в режиме реального времени;  
передача данных по протоколам “Цифровой подстанции”;

возможность внедрения в контур вычислений набора специальных приложений, позволяющих повысить эффективность работы электроэнергетических систем;

возможность ввода данных о моделируемой энергосистеме в формате CIM (Common Information Model) по стандартам МЭК 61968 и МЭК 61970.

Кроме того, на стадии формирования технического задания были определены требования к человеко-машинному интерфейсу ПАК ЦДЭС, как интуитивно понятному, удобному, лёгкому в освоении и соответствующему современным подходам в дизайне (рис 1).

Выполнение перечисленных требований оказалось возможным благодаря выбранному подходу к созданию программно-аппаратной архитектуры ПАК ЦДЭС, которая представляет собой трёхуровневую платформу. Каждый уровень представлен соответствующим аппаратным обеспечением и программными приложениями, выполняющими заданную функциональную задачу. Для передачи данных между уровнями и приложениями используется выделенная шина данных. Структурно-

функциональная схема комплекса представлена на рис. 2.

Нижний уровень ПАК ЦДЭС включает в себя набор коммуникационных устройств для организации “шины процесса” и подключения внешних устройств РЗА по протоколам стандарта МЭК 61850, набор высокопроизводительных серверов для запуска виртуальных устройств и виртуальных программируемых логических контроллеров (ПЛК), промышленные компьютеры для подключения стороннего оборудования по протоколам Modbus TCP, С37.118, МЭК 60870-5-104, MQTT, а также устройства ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов различных уровней напряжения.

Средний уровень системы представлен серверным оборудованием и приложениями, предназначенными для работы в режиме реального времени. Под термином “реальное время” в статье подразумевается работа программных и аппаратных компонентов в режиме периодических расчётов с шагом 30 мкс. Аппаратной средой для выполнения приложений среднего уровня являются высокопроизводительные серверы со специализированными сетевыми Ethernet-контроллерами с поддержкой субмикросекундной передачи данных по технологии RDMA (remote direct memory access – удалённый прямой доступ к памяти). Применение сетевых Ethernet-контроллеров с поддержкой технологии RoCE (RDMA over Conventional Ethernet – RDMA поверх обычной сети Ethernet) позволяет достичь высокой скорости обмена данными между узлами локально-вычислительной сети путём передачи части оперативной памяти в управление сетевому Ethernet-контроллеру. В этом случае обеспечивается синхронизация областей памяти между устройствами без задействования ядра операционной системы, и, таким образом, снижается нагрузка на центральный вычислительный процессор.

Приложения среднего уровня комплекса ЦДЭС выполняются в виде самостоятельных программных вычислительных модулей:

- модули расчёта режимов энергосистем;

- модули дорасчёта значений электрических параметров (действующие значения токов, напряжений, активной и реактивной мощности, значений потерь в трансформаторах и линиях электропередачи);

- модули регистрации переходных режимов (осциллографы);

- коммуникационные процессоры для передачи данных на внешние устройства по протоколам GOOSE, SV, соответствующим стандарту МЭК 61850, протоколу С37.118 для передачи синхронизированных векторных измерений, протоколу UDP с передачей “сырых” данных измерений, протоколу Augora для связи с усилителями сигналов и приведения их к нормированным значениям

- 1(5) А и 100 В для измерительных цепей устройств релейной защиты, автоматики, управления и измерений, и для связи с РНЧ-усилителями.

Верхний уровень комплекса представлен оборудованием и приложениями, с которыми непосредственно взаимодействует пользователь. К таким приложениям относятся:

- приложение для управления пользователями и проектами;

- редактор электрических схем моделируемых энергосистем;

- симулятор энергосистем, обеспечивающий наблюдение за процессом и оперативное управление симуляцией;

- приложение для просмотра графиков изменения различных величин в процессе симуляции;

- приложение для просмотра осциллограмм;

- приложение для просмотра событий, возникающих в процессе симуляции;

- редактор цифровой релейной защиты (конфигуратор по стандарту МЭК 61850);

- редактор алгоритмов автоматики (по стандарту МЭК 61131);

- конфигуратор виртуальных устройств РЗА;

- конфигуратор виртуальных программируемых логических контроллеров;

- конфигуратор для работы с платами дискретного и аналогового ввода-вывода сигналов;

- конфигуратор протоколов передачи данных для внешних цифровых систем.

Также среди приложений ПАК ЦДЭС присутствует ряд программных сервисов, взаимодействующих со всеми уровнями функциональной структуры программно-аппаратного комплекса. Одно из них – сервисное приложение для организации системы единого времени с синхронизацией по протоколам RTP, NTP (SNTP).

Другие сервисные приложения: мониторинг аппаратных средств и локального человеко-машинного интерфейса каждой аппаратной стойки ПАК ЦДЭС; мониторинг работы программных средств ПАК ЦДЭС; централизованная аутентификация и авторизация доступа пользователей.

Модульный способ построения программно-аппаратной архитектуры комплекса ЦДЭС позволяет дополнять базовый набор приложений специальными программными модулями, выполняющими функции, выходящие за рамки стандартных функциональных возможностей, в том числе, разработанных сторонними фирмами-производителями, например, ПАК RTDS. К подобным относятся приложения:

- для расчёта режимов и переходных процессов, включающее в себя, помимо расчётов нормальных и аварийных режимов, автоматические расчёты уставок, проведение анализа устойчивости, анализа и оптимизации потерь по напряжению и реактивной мощности, импорт и экспорт в формате

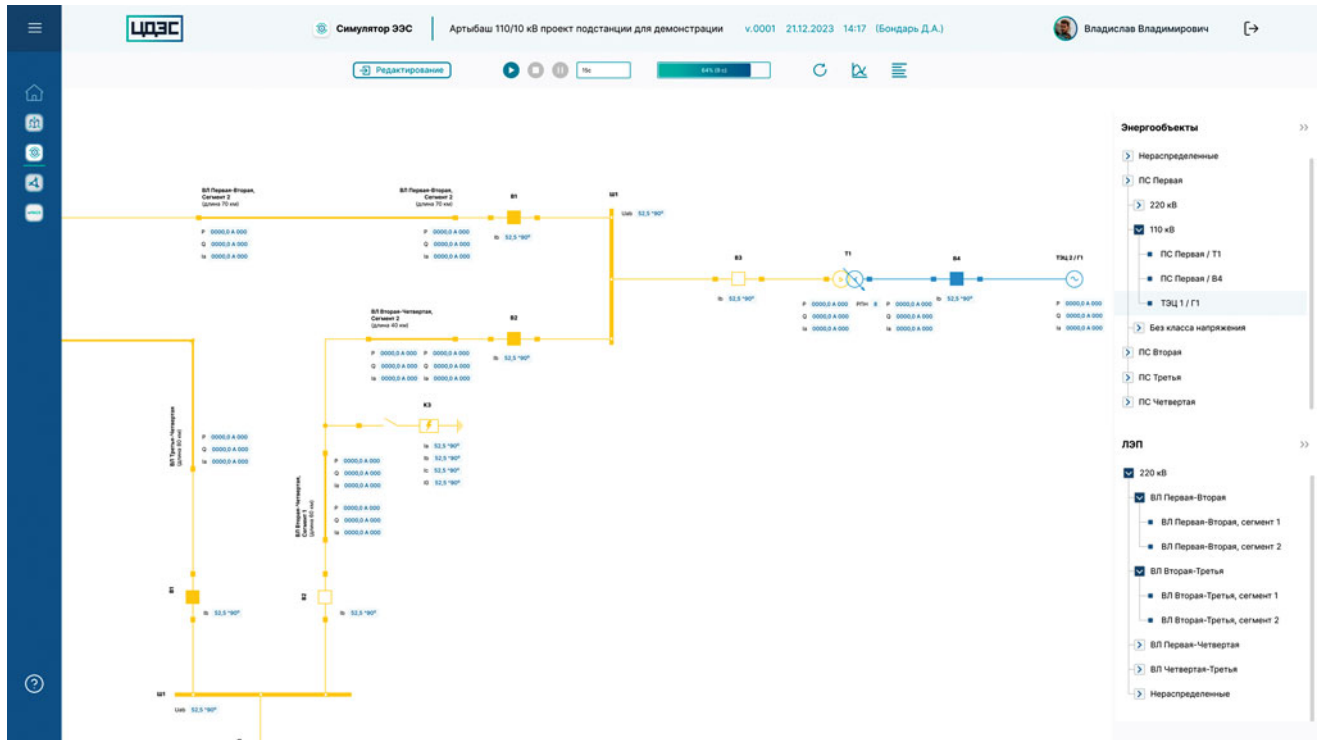


Рис. 1

СІМ моделей энергосистем, а также экспорт в формате SSD-файлов;

для автоматического проектирования комплексов РЗА, позволяющее проводить автоматический синтез архитектуры цифровых система РЗА, расчёты надёжности, CAPEX, OPEX, структурных схем РЗА и АСУТП, а также синтез электронной документации по стандарту МЭК 61850;

для оптимального планирования мероприятий по техническому обслуживанию и ремонтам (ТОиР) на основе риск-ориентированного подхода, позволяющее получать данные от систем мониторинга и диагностики силового оборудования и выполнять оптимизацию планов ТОиР с учётом рассчитанных вероятностей отказа оборудования и ресурсных ограничений для минимизации рисков;

для проведения функциональных испытаний реальных устройств защиты и автоматики, автоматически генерирующее тестовые сценарии для проведения испытаний, аттестации и сертификации и осуществляющее проверку на соответствие требованиям действующей НТД с формированием отчётов о проведённых испытаниях;

для мультиагентного моделирования взаимодействия субъектов энергетики: рынков электроэнергии, просьюмеров с учётом ценозависимого поведения нагрузки и других участников рынка;

для автоматизированного проведения тренировочных занятий для оперативно-диспетчерского персонала и обучающих занятий для вузов.

За счёт наличия в комплексе ПАК ЦДЭС информационной шины данных для передачи инфор-

мации между приложениями, а также унифицированной формы передачи информации, становится возможным бесшовная интеграция в контур программно-аппаратного комплекса этих и других приложений, разработанных под конкретные требования пользователя. Подобные приложения позволяют существенно расширить область применения комплексов цифрового моделирования в реальном времени, которая ранее ограничивалась научно-исследовательскими лабораториями и сертификационными центрами. Используя инструменты ПАК ЦДЭС становится возможным создание:

ситуационно-аналитических центров, где комплекс цифрового моделирования может использовать данные от SCADA и PMU для актуализации модели ЭЭС в темпе реального технологического процесса и повышения достоверности расчётов, а также выполнить сценарное моделирование “Что если”;

взаимосвязанных модельных комплексов, объединённых вычислительной сетью для проведения масштабных расчётов режимов и запуска совместных симуляций, в которых каждый субъект или центр компетенций разрабатывает свою часть модели и верифицирует её;

киберполигонов для проведения киберучений с возможностью оценки ущерба от действий злоумышленников в реальном времени с применением виртуальных терминалов РЗА и контроллеров PLC;

“ловушек для хакеров”, т.е. виртуальных электроэнергетических объектов, подменяющих собой

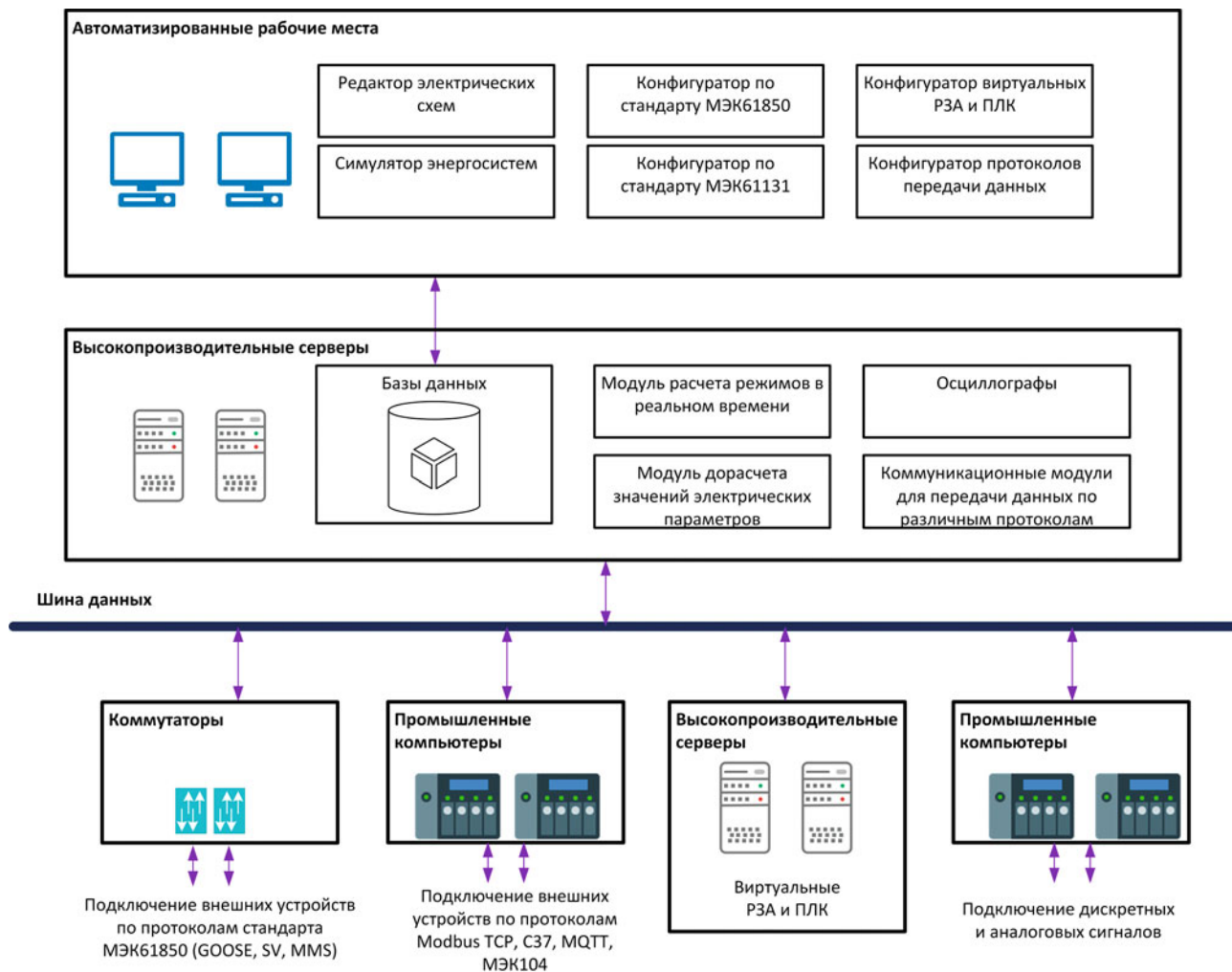


Рис. 2

реальные, делая их “невидимыми” для злоумышленников.

Едиными источниками данных для перечисленных применений ПАК ЦДЭС будут являться расчётные модули нормальных и аварийных режимов работы энергосистем, в том числе с поддержкой реального времени. Результаты испытаний расчётных модулей подтверждают высокую точность используемых в них алгоритмов и возможности их применения для больших моделей [1].

Одним из важных способов применения разрабатываемого Центром НТИ МЭИ комплекса ЦДЭС является использование его в качестве SCADA-системы уровня Центра управления сетями. Сформированный на базе гибкой компоновки программно-аппаратных модулей ЦДЭС цифровой двойник заданной электрической сети не просто осуществит ведение базы данных со сбором и хранением необходимой информации об электрической сети в единой информационной модели, и тем самым обеспечит решение оперативно-технологических задач, а также позволит выполнять стратегическое управление и планирование развитием электрической сети с расчётами прогнозов

изменения режимов и оценкой показателей надёжности электроснабжения.

Накопление данных в указанной базе будет происходить автоматически из разных источников, в результате чего модель, содержащаяся в ПАК ЦДЭС, будет всегда соответствовать реальной электрической сети. Наличие такой базы позволит:

- повысить точность и согласованность модели для проведения расчётов режимов;

- повысить эффективность и оптимизацию процессов в планировании и эксплуатации энергосистем;

- обеспечить более простую интеграцию подсистем в будущем и увеличение общего уровня цифровизации энергокомпании.

Примерами аналогичных систем, хорошо зарекомендовавшими себя в зарубежных компаниях, являются программные продукты, созданные на основе ПО “PSS ODMS” и “PSS SINCAL” [2]. На текущий момент эти продукты недоступны для применения в России и их импортозамещение возможно использованием функциональных модулей, входящих в состав ПАК ЦДЭС.



Таким образом, с учётом тенденций усложнения электроэнергетических систем, связанных с постоянной разработкой и внедрением новых видов первичного и вторичного оборудования, а также с возрастающими возможностями современного микропроцессорного оборудования и программного обеспечения, идея создания ПАК моделирования режимов работы энергосистем в реальном времени, выполняющего как уже хорошо зарекомендовавшие себя функции, так и новые, позволяющие выполнять в автоматизированном режиме рутинные задачи, выполняемые сотрудниками электроэнергетических компаний вручную, является актуальной и осуществимой.

## Выводы

Архитектура разрабатываемого в настоящее время ПАК ЦДЭС обладает следующими свойствами: функциональной гибкостью, многозадачностью и открытостью.

Свойство функциональной гибкости обеспечивается возможностью выбора из широкого ряда приложений, входящих в ПАК ЦДЭС, тех, которые наилучшим образом соответствуют поставленным задачам.

Многозадачность становится доступной благодаря возможности программно-аппаратной архи-

тектуры и взаимосвязанной работы модулей ПАК ЦДЭС.

Открытость обеспечивается возможностью включения в состав исполняемых модулей комплекса дополнительных пользовательских приложений и благодаря наличию в ПАК ЦДЭС единой шины передачи данных с использованием унифицированных стандартов для обмена информацией между приложениями.

## Соблюдение этических норм

Исследование выполнено на средства гранта на государственную поддержку центра Национальной технологической инициативы “Технологии транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем”, созданного на базе ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”.

## Список литературы

1. *Волошин, А. А.* Результаты разработки российского программно-аппаратного комплекса реального времени “Цифровой двойник Энергосистемы” [Текст] / А. А. Волошин, Е. А. Волошин, А. А. Лебедев // Энергоэксперт. – 2023. – № 2. – С. 48 – 52.
2. *Никитина, Е. В.* Цифровой двойник для электрических сетей [Текст] / Е. Н. Никитина, А. Н. Полуэктов, С. Кох // Энергия единой сети. – 2019. – № 4. – С. 32 – 36.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Российское авторское общество (РАО) начинает выплату авторских гонораров за статьи, опубликованные в журнале «Power Technology and Engineering» за 2022 г.

Документы, которые необходимо предоставлять в РАО авторам – получателям гонораров, опубликованы на сайте РАО в разделе АВТОРАМ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ.

<https://rao.ru/for-rightholders/avtoram-nauchnyh-statej/>