
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.4

EDN SSGGMF

**ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
МЭК 61850 И МЭК 61131-3 ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОТКРЫТОЙ
АРХИТЕКТУРЫ ПЛК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ****Р.С. Горохов**ORCID: 0009-0003-1887-9105 e-mail: GorokhovRS@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***М.А. Савичев**ORCID: 0009-0004-5666-1366 e-mail: SavichevMA@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***Е.А. Волошин**ORCID: 0000-0002-1318-3796 e-mail: VoloshinYA@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***В.Ф. Лачугин**ORCID: 0009-0000-7135-6117 e-mail: LachuginVF@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Статья посвящена решению актуальной проблемы цифровой трансформации электроэнергетики – преодолению семантической и архитектурной разрозненности информационных моделей, используемых на разных уровнях управления технологическими процессами. Существующая практика построения АСУ ТП характеризуется жесткой привязкой к проприетарным платформам и средам разработки конкретных производителей (*vendor lock-in*), что приводит к высоким инжиниринговым затратам, ошибкам при ручной стыковке конфигураций и затрудняет внедрение интеллектуальных ассистентов. В работе предлагается архитектурный подход, основанный на глубокой интеграции стандартов МЭК 61850 (системная модель и данные) и МЭК 61131-3 (прикладные программы управления) с перспективой включения *SIM* (МЭК 61970/61968) для описания объекта управления. Ключевым элементом решения является независимый от производителя системный конфигуратор,

формирующий единое описание системы (SCD-файл), и платформа виртуальных контроллеров (*VirtualPLC*), обеспечивающая абстракцию от аппаратного обеспечения. Для проверки концепции разработан прототип открытого контроллера (*IED*), архитектура которого включает управляющий гипервизор, изолированные среды выполнения (*runtime*) для загрузки скомпилированных функциональных модулей, соответствующих логическим узлам МЭК 61850, и единую шину данных на базе *ZeroMQ*, связывающую прикладной уровень с адаптерами протоколов и физического ввода-вывода. В качестве иллюстративного примера рассмотрена реализация функции регулирования уровня в барабане котла через специализированный логический узел *HLCN*, интерфейс которого сопоставлен с исполняемым модулем ПИД-регулятора. Научная новизна работы заключается в разработке сквозного модельно-ориентированного подхода, обеспечивающего автоматическую генерацию конфигураций контроллеров непосредственно из системного описания, что устраняет ручные операции и снижает риски рассогласования. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность создания открытой, масштабируемой и конкурентоспособной среды для интеграции решений различных вендоров, а также создают основу для внедрения ИИ-ассистентов, оперирующих унифицированной семантической моделью на всех этапах жизненного цикла системы. Дальнейшие исследования направлены на формализацию расширений МЭК 61850 и интеграцию с *CIM* для построения полноценных цифровых двойников.

Ключевые слова: виртуализация контроллеров; информационная модель; межстандартная интеграция; МЭК 61131-3; МЭК 61850; открытая архитектура; программируемый логический контроллер; системный конфигуратор.

Для цитирования: Горохов Р.С., Савичев М.А., Волошин Е.А., Лачугин В.Ф. Интеграция информационных моделей МЭК 61850 и МЭК 61131-3 для создания открытой архитектуры ПЛК в электроэнергетике // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 3. С. 52-67. EDN SSGGMF

INTEGRATION OF IEC 61850 AND IEC 61131-3 INFORMATION MODELS FOR CREATING AN OPEN PLC ARCHITECTURE IN ELECTRIC POWER INDUSTRY

R.S. Gorokhov

ORCID: 0009-0003-1887-9105 e-mail: GorokhovRS@mpei.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
Moscow, Russia

M.A. Savichev

ORCID: 0009-0004-5666-1366 e-mail: SavichevMA@mpei.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
Moscow, Russia

E.A. Voloshin

ORCID: 0000-0002-1318-3796 e-mail: VoloshinYA@mpei.ru

National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
*Moscow, Russia***V.F. Lachugin**

ORCID: 0009-0000-7135-6117 e-mail: LachuginVF@mpei.ru

National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI)
Moscow, Russia

Abstract. The article addresses the pressing problem of digital transformation in the electric power industry – overcoming the semantic and architectural fragmentation of information models used at different levels of process control. The current practice of building automated process control systems (APCS) is characterised by a rigid dependence on proprietary platforms and development environments of specific vendors (vendor lock-in), which leads to high engineering costs, errors in manual configuration alignment and hinders the adoption of intelligent assistants. The work proposes an architectural approach based on deep integration of the IEC 61850 (system model and data) and IEC 61131-3 (application control programs) standards, with a view to including CIM (IEC 61970/61968) for describing the controlled object. The key elements of the solution are a vendor-independent system configurator that produces a unified system description (SCD file) and a virtualised controller platform (VirtualPLC) that provides hardware abstraction. To validate the concept, a prototype of an open controller (IED) has been developed. Its architecture includes a supervising hypervisor, isolated runtime environments for loading compiled functional modules corresponding to IEC 61850 logical nodes, and a unified data bus based on ZeroMQ that connects the application layer with protocol adapters and physical I/O. As an illustrative example, the implementation of a drum level control function for a boiler is considered through a dedicated logical node HLCN, the interface of which is mapped to an executable PID controller module. The scientific novelty of the work lies in the development of a seamless model-driven approach that enables automatic generation of controller configurations directly from the system description, thereby eliminating manual operations and reducing the risk of inconsistencies. The obtained results demonstrate the fundamental feasibility of creating an open, scalable and competitive environment for integrating solutions from multiple vendors, and also lay the groundwork for deploying AI assistants that operate on a unified semantic model throughout the entire system life cycle. Further research is directed towards formalising IEC 61850 extensions and integrating with CIM for building full-fledged digital twins.

Keywords: controller virtualization; cross-standard integration; IEC 61131-3; IEC 61850; information model; open architecture; programmable logic controller; system configurator.

For citation: R.S. Gorokhov, M.A. Savichev, E.A. Voloshin and V.F. Lachugin, “Integration of IEC 61850 and IEC 61131-3 information models for creating an open PLC

architecture in electric power industry”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 52-67, 2026. EDN SSGGMF

I. Введение

Современная электроэнергетика характеризуется растущей сложностью объектов, интеграцией возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и необходимостью повышения гибкости и надежности управления. Ключевым трендом является цифровая трансформация, включающая создание цифровых двойников и внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) для прогнозирования аналитики и оптимизации режимов [1, 2]. Однако существующая разрозненность информационных моделей на разных уровнях управления – от уровня предприятия (*CIM – Common Information Model*, Общая информационная модель, МЭК 61970/61968) до уровня полевых устройств (МЭК 61850) и уровня программных контроллеров (МЭК 61131-3) – создает существенные барьеры в процессе цифровой трансформации [3, 4].

Традиционные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), будь то системы на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) или распределенных систем управления (PCU, англ. *Distributed Control System, DCS*), характеризуются жесткой привязкой к проприетарным средам разработки и аппаратным платформам конкретных производителей. Хотя отраслевые протоколы обмена данными (такие как *Modbus TCP*, МЭК 60870-5-104, *MMS – Manufacturing Message Specification, OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture*) являются широко распространенными, процесс интеграции систем различных вендоров остается сложной инженерной задачей. Это связано с неоднородностью реализации протоколов, различиями в способах их настройки и, что особенно важно, с отсутствием стандартизированной семантики для описания передаваемых данных и сигналов. Все это приводит к высоким затратам на инжиниринг, сложностям интеграции разнородного оборудования, невозможности сквозной передачи данных и семантики от проектирования до эксплуатации, что получило название «*vendor lock-in* (зависимость от поставщика)» [5]. Данное ограничение делает затруднительным применение ИИ-ассистентов, требующих для своей работы унифицированных информационных моделей устройств, функций автоматики и систем управления в целом, а также семантически насыщенных данных [6].

Разрешение этого противоречия возможно путем создания АСУ ТП с открытой архитектурой (АСУ ТП ОА), ядром которой является унифицированная и расширяемая информационная модель, интегрирующая существующие стандарты, и виртуализация уровня исполнения, то есть среды, в которой непосредственно выполняется прикладная программа управления [7]. Цель данной работы – предложить архитектурный подход к интеграции

открытых информационных моделей и провести испытания на прототипе. Важной особенностью предлагаемого решения является совмещение моделей МЭК 61850 (системная модель и данные) и МЭК 61131-3 (прикладные программы управления), с перспективой включения *CIM* для описания объекта управления. Для подтверждения реализуемости предлагаемого решения разрабатывается ключевой компонент такой системы – программируемый логический контроллер с открытой архитектурой (англ. *Intelligent Electronic Device, IED*).

II. Модели и их области применения

МЭК 61970/61968: Предназначена для моделирования энергосистемы на уровне управления предприятием и диспетчеризации (*EMS – Energy Management System / DMS – Distribution Management System*). *CIM* обеспечивает семантическое описание объектов энергетики (подстанции, линии, генераторы) и их связей для задач планирования, анализа режимов и обмена данными между системами [8]. Ее сильная сторона – охват широкого спектра объектов энергосистемы (активов), включая генерацию, передачу, распределение и потребление, а также моделирование их взаимосвязей и топологии на концептуальном уровне. Слабая сторона – недостаточная детализация для описания конкретного оборудования, сигналов и функций АСУ ТП.

МЭК 61850: Стандарт для коммуникаций на подстанциях и энергообъектах. Предлагает детализированную информационную модель (*Logical Nodes, LN* – логические узлы), охватывающую данные от первичного оборудования до функций защиты и автоматики [9]. Модель МЭК 61850, представленная в виде файлов на языке *SCL (System Configuration Language, язык конфигурации систем)*, идеально подходит для конфигурации систем релейной защиты и автоматики (РЗА) и АСУ ТП, но изначально была ориентирована на электрические подстанции и требует расширения для других объектов (ТЭЦ, ГЭС, ВИЭ).

МЭК 61131-3: Широко применяемый стандарт для программирования ПЛК. В Российской Федерации он соответствует ГОСТ Р МЭК 61131-3. Он определяет языки программирования (*LD – Ladder Diagram*, релейно-контактные схемы; *FBD – Function Block Diagram*, функциональные блоки; *ST – Structured Text*, структурированный текст и др.) и базовые модели данных, но не имеет универсальной семантической модели для описания системных функций и их взаимосвязей [10]. Модель конфигурации (*PLCOpenXML*) по стандарту МЭК 61131-10 (в российской практике – ГОСТ Р МЭК 61131-10 «Контроллеры программируемые. Часть 10. Формат обмена на основе *PLC open XML*») позволяет описывать программную логику, но слабо связана с моделью данных верхнего уровня.

МЭК 61499: Стандарт для создания распределенных систем управления и автоматизации. Он расширяет МЭК 61131-3, вводя событийно-ориентированную (*Event-Driven*) модель выполнения и архитектуру на основе функциональных блоков с четкими интерфейсами. Это позволяет распределять единое приложение между несколькими контроллерами в сети, что принципиально соответствует концепциям Индустрии 4.0 [11] и промышленного Интернета вещей (*IIoT*). Его сильная сторона – гибкость и пригодность для построения сложных, масштабируемых распределенных систем. Слабая сторона – повышенная сложность проектирования и зависимость от надежности сетевой инфраструктуры.

III. Проблемы совместимости и «разрывы» в жизненном цикле АСУ ТП

Показательным примером несовместимости моделей является создание функции автоматики, например, функции автоматического ввода резерва (АВР). В системной модели по стандарту МЭК 61850 эта функция описывается как взаимодействие логических узлов (*LN*), таких как *XCBR* для управления выключателями и *MMXU* для измерений напряжения. Однако сама логика работы АВР реализуется в виде программы, написанной на языке стандарта МЭК 61131-3, внутри проприетарной среды программирования конкретного ПЛК. Любое изменение в системной конфигурации, описанной на языке *SCL*, требует ручного внесения правок в код ПЛК, и наоборот. Этот ручной, несвязанный процесс является источником ошибок и значительно увеличивает время и сложность инжиниринга.

Другой проблемой является несвязанность конфигураций: настройки драйверов протоколов в контроллере и клиентов в *SCADA*-системе производятся раздельно, что приводит к дублированию усилий и рискам рассогласования конфигурации.

Применимость стандарта МЭК 16850 ограничена одним энергообъектом. Многие функции автоматики при этом рассчитаны на использование информации, получаемой с разных участков сети, с разных объектов. Кроме того, модель данных об объекте управления в МЭК 61850 недостаточна для автоматизации процессов проектирования и расчета параметров работы функций защиты и автоматики. В связи с этим важно осуществить интеграцию моделей *SIM* и МЭК 61850 для того, чтобы с использованием моделирующих комплексов, таких как ПАК «ЦДЭС», осуществить автоматизированные расчеты настроечных параметров функций защиты и автоматики, а также проведение испытаний РЗА и АСУ ТП в условиях, приближенных к реальным. В этом случае модель *SIM* является описанием объекта управления и окружающей среды, модель МЭК 61850 описывает состав функций защиты и автоматики с указанием управляемого оборудования, а модель МЭК 61131 описывает алгоритм работы прикладной программы.

Эти примеры показывают, что существующие стандарты решают свои узкие задачи, но их интеграция на протяжении всего жизненного цикла системы (проектирование-конфигурирование-эксплуатация) требует значительных усилий и является источником ошибок. Важным направлением для преодоления этих разрывов являются работы российской рабочей группы по открытым АСУ ТП (РГ ОАСУ ТП) и стандарты *OPA-F/OPA-S*, направленные на создание открытых, совместимых решений [12, 13]. Российские производители оборудования с осторожностью подходят к внедрению новых подходов в связи с тем, что основным фокусом внимания в настоящее время является процесс импортозамещения, а не развития новых направлений. Многие производители активно развивают собственные среды исполнения на основе стандартов МЭК 61131 и МЭК 61499 (Прософт-Системы, РегЛаб, Сегнетикс и другие) в качестве замены *CODESYS*. Разработка программных ПЛК идет не высокими темпами. На рынке уже появились первые российские решения *SofiLogic* от *MasterSCADA 4D* и «Виртуальный контроллер» от компании «Айсорс» реализующие концепции независимых от аппаратной платформы контроллеров АСУ ТП.

IV. Архитектура АСУ ТП с открытой архитектурой на основе интеграции моделей

В основе предлагаемого подхода лежит не отказ от традиционной двух- или трехуровневой аппаратной архитектуры АСУ ТП, а введение нового логического уровня интеграции поверх нее. Предлагаемое решение сохраняет преемственность существующих аппаратных платформ (ПЛК, серверы сбора информации, сети передачи данных), обеспечивая производителям и интеграторам плавный переход. Ключевое изменение заключается в использовании общих, открытых информационных моделей (МЭК 61850, МЭК 61131-3, *CIM*) на всех этапах жизненного цикла системы, что реализуется через единый системный конфигуратор и платформу виртуальных контроллеров.

V. Ключевые принципы архитектуры

Предлагаемая архитектура имеет ряд особенностей, которые будут описаны далее.

1. Независимый от производителя системы и устройств системный конфигуратор, который работает с открытыми файлами описаний отдельных частей системы управления:

- описание объекта управления в формате *SSD (System Specification Description)*, описание спецификации системы);
- описание возможностей устройств автоматизации от разных производителей в формате *ICD (IED Capability Description)*, описание возможностей *IED*);

– расширенное описание функций с подключенными эталонными реализациями логики на основе МЭК 61850 с привязкой к МЭК 61131-10.

2. На выходе конфигуратор формирует *SCD* (*System Configuration Description*, описание конфигурации системы) файл – полное описание системы автоматизации.

3. Открытая информационная модель системы управления позволяет подключить к процессу проектирования ассистентов на основе искусственного интеллекта (ИИ ассистент, *AI Co-pilot*). Это обеспечит возможность проведения автоматизированных проверок проектируемых решений на соответствие отраслевой и локальной нормативной документации.

4. Прямая загрузка конфигурации в *IED*: *SCD*-файл разделяется на *CID* (*Configured IED Description*, описание сконфигурированного *IED*) файлы для каждого контроллера. В целевой архитектуре *CID* файл напрямую загружается в *IED*, минуя проприетарные конфигураторы устройств, что обеспечивает возможность использования одинаковой конфигурации на оборудовании разных производителей при совместимости устройств на уровне *ICD* моделей.

5. Контроллер (*IED*) реализуется как платформа для запуска программных ПЛК (*SoftPLC*). Это позволяет абстрагироваться от конкретного аппаратного обеспечения, динамически распределять вычислительную нагрузку и масштабировать систему. Отдельным направлением развития является концепция *VirtualPLC*, предполагающая работу нескольких изолированных виртуальных контроллеров на одной физической платформе [12].

Предлагаемый подход (рис. 1) не предполагает отказа от существующих решений, а создает новую среду для их интеграции. Ключевая идея заключается в том, что интеллектуальная собственность в виде алгоритмов и программ для ПЛК остается у ее владельцев (производителей оборудования, интеграторов, собственников объектов управления) и встраивается в архитектуру практически без изменений. Для этого роли участников должны быть четко определены:

Производители оборудования поставляют описания своих устройств в виде *ICD* файлов, а также могут предлагать свои функции в виде готовых модулей для платформы *SoftPLC*, сохраняя возможность защиты интеллектуальной собственности.

Собственники и эксплуатанты объектов на основе своих требований описывают функции системы управления в системном конфигураторе, используя стандартизированные информационные модели.

Системные интеграторы адаптируют существующие или создают новые программные модули, обеспечивая их соответствие заданным информационным моделям и внешнему интерфейсу для интеграции в единую систему.



Рис. 1. АСУ ТП с открытой архитектурой

Fig. 1. APCS with open architecture

VI. Преимущества предлагаемого подхода и его отличие от существующих решений

Предлагаемый подход позволяет разорвать традиционную связку «производитель оборудования – проприетарное ПО – *vendor lock-in*». Производители могут поставлять свои реализации функций (в виде скомпилированных модулей, соответствующих стандартным интерфейсам), которые интегрируются в систему через стандартизированные *LN*-интерфейсы, что стимулирует конкуренцию и инновации. Концепция открытой архитектуры перекликается с целями международных инициатив, таких как *OPA-F* (Open Process Automation Forum), и находит отражение в работе российской РГ ОАСУ ТП, что подтверждает актуальность выбранного направления [12, 13].

Существующие попытки интеграции, такие как *OPC UA Companion Specifications* для МЭК 61131-3 [13], часто фокусируются на предоставлении доступа к данным ПЛК, но не решают проблему сквозной системной конфигурации и виртуализации исполнения. Предложенный подход, напротив, начинается с единой системной модели (МЭК 61850) и заканчивается виртуальной средой выполнения, что обеспечивает целостность конфигурации системы управления на всех этапах жизненного цикла. Ключевой перспективой развития является интеграция с *CIM*-моделью (МЭК 61970/61968), что позволяет создать полный цифровой двойник объекта управления и окружающей сети. Такой модельно-ориентированный подход, при котором конфигурация системы автоматизации может создаваться и валидироваться на основе единой семантической модели объекта, принципиально повышает надежность и сокращает время проектирования и внедрения АСУ ТП.

VII. Пример реализации интеграции на уровне моделей

Рассмотрим функцию регулирования уровня воды в барабане парового котла на ТЭЦ (рис. 2).

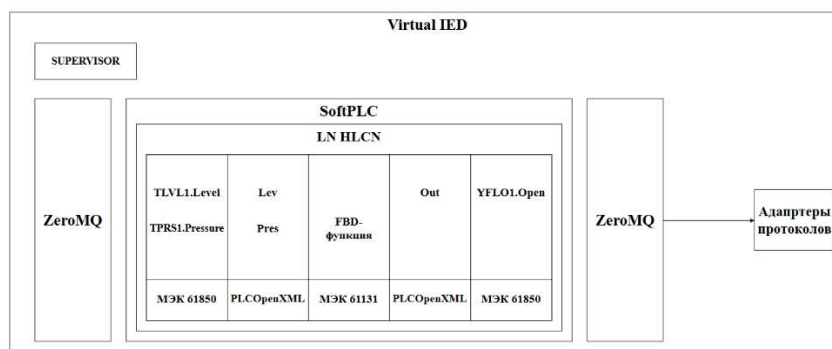


Рис. 2. Схема интеграции *LN HLCN* в *IEC 61850* с *FBD*-функцией, реализованной в виде исполняемого модуля

Fig. 2. Integration diagram of the *LN HLCN* into *IEC 61850*, with the *FBD* function implemented as an executable module

Основные характеристики традиционного подхода

В системном конфигураторе (на основе *SCL*) инженер описывает датчики уровня (*TLVL*), давления (*TPRS*), исполнительные механизмы (*YFLO* – аналог *KVLV* для регулирующего клапана).

В проприетарной среде программирования ПЛК другой инженер создает ПИД-регулятор в виде *FBD*-блока или программы на другом языке, поддерживаемом стандартом МЭК 61131. Вручную связывает физические сигналы (например, % *IW100* — уровень, % *QW50* – выход на клапан) с входами/выходами блока.

Семантика связи (какой ПИД-регулятор управляет каким клапаном) хранится только в документации, предназначенной для инженеров.

Особенности предлагаемого подхода

В системной модели (МЭК 61850) в системном конфигураторе создается специализированный *Logical Node*, например, *HLCN* (*Water Level Controller*).

LN HLCN содержит:

- *DataObjects* для входных параметров: *Lev* (*TLVL1.Level*), *Pres* (*TPRS1.Pressure*);
- *DataObjects* для выходных параметров: *Out* (*YFLO1.Open*).

DataObjects для настройки: *SetLev* (уставка уровня), K_p , K_i , K_d (коэффициенты ПИД регулятора). Функция ПИД-регулятора реализуется в виде скомпилированного модуля (*.so файл*), интерфейс которого строго соответствует структуре *LN HLCN*.

При развертывании *CID*-файла на целевом *IED*, виртуальный ПЛК загружает данный модуль и автоматически связывает его объектную модель

(*DataObjects*) с соответствующими сигналами в системной модели через шину данных.

VIII. Опыт реализации прототипа открытого контроллера (IED)

Для проверки предложенного решения был разработан прототип программной платформы открытого контроллера АСУ ТП. Архитектура прототипа платформы (рис. 3), содержит следующие компоненты:

1. *Hypervisor/Supervisor*: Управляющий модуль, отвечающий за создание и жизненный цикл *SoftPLC*. Получает *CID*-файл от системного конфигуризатора, запускает и контролирует отдельные модули программной платформы.

2. Программные ПЛК (*SoftPLC*): Изолированные среды выполнения (*Runtime*). Каждый *Runtime* представляет собой контейнер или процесс, который загружает скомпилированные модули функций (*.so* файлы), каждый из которых является реализацией конкретного *LN*.

3. Шина данных на базе *ZeroMQ* обеспечивает асинхронный обмен сообщениями между всеми компонентами системы. *Runtime* не взаимодействует с оборудованием напрямую, все общение происходит через эту шину, что обеспечивает слабое связывание (*decoupling*) прикладной программы от аппаратной реализации.

4. Адаптеры протоколов и оборудования: Специализированные модули, подключаемые к шине *ZeroMQ*, которые реализуют взаимодействие с физическими входами/выходами (*DI/DO* — *Discrete Input/Output*, дискретные входы/выходы, аналоговые сигналы) и цифровыми интерфейсами (*Ethernet*, *RS-485*) по различным протоколам (*OPC UA*, *Modbus TCP*, МЭК 60870-5-104).

5. *Configurator*: Модуль, который взаимодействует с *Hypervisor*, преобразует данные из стандартизированного *CID*-файла в настройки для *Runtime* и адаптеров, запускает и останавливает *SoftPLC*.

В предлагаемой архитектуре ключевым требованием является открытость форматов данных и интерфейсов взаимодействия (например, с *Hypervisor*). Это позволяет различным вендорам предлагать собственные, в том числе проприетарные, реализации *Configurator* с уникальным функционалом (например, расширенной аналитикой, интеграцией со сторонними системами), что создает зону здоровой конкуренции. При этом гарантируется совместимость за счет соблюдения открытых стандартов обмена.

Данная архитектура демонстрирует работу как в режиме *softPLC* (на стандартном сервере), так и в концепции *VirtualPLC* [12], где несколько виртуальных контроллеров функционируют в изолированных средах, что соответствует современным трендам Индустрии 4.0 и обеспечивает отказоустойчивость и масштабируемость. Для обеспечения изоляции сред выполнения отдельных *VirtualPLC* в одном устройстве используются механизмы

namespaces и cgroups, поддерживаемые современными операционными системами на базе ядра *Linux*. Данный механизм позволяет изолировать ресурсы, выделяемые каждому *VirtualPLC* (доступ к сети, ОЗУ, ядра процессора), добавляя при этом минимальные накладные расходы к задержкам времени выполнения (0,1...0,2 %), значительно меньшие по сравнению с полноценным гипервизором ОС (2...5 % в зависимости от типа) или контейнеризацией (1...2 %). Однако обеспечение работы нескольких *VirtualPLC* на одном устройстве в режиме реального времени требует проведения дополнительных исследований с учетом особенностей конкретных аппаратных платформ и объема одновременно выполняемых прикладных программ.

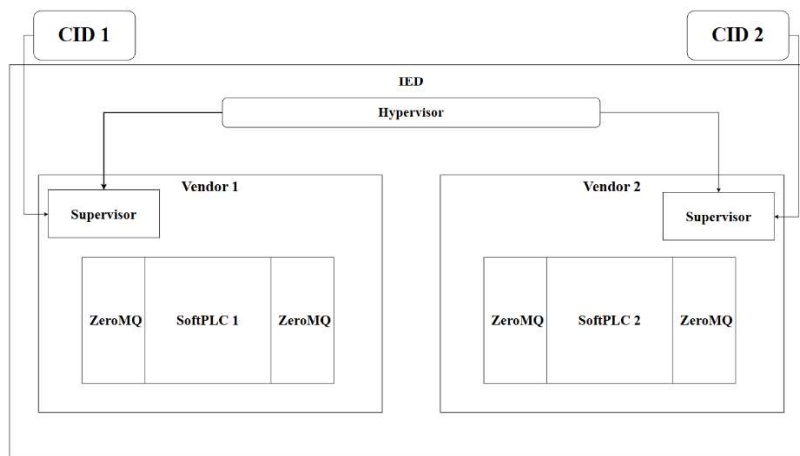


Рис. 3. Высокоуровневая архитектура прототипа открытого контроллера (IED)

Fig. 3. High-level architecture of the open controller prototype (IED)

В ходе проведения исследования были проведены опыты в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний. По результатам проведения испытаний было выявлено, что использование общей шины данных внутри *softPLC* с использованием *ZeroMQ* вносит задержки менее 2 мс (с вероятностью 99 %) на 100 передаваемых объектов данных (*DO* в терминах МЭК 61850). Данный уровень задержек является значительным по сравнению с прямой передачей информации между программными модулями с использованием, например, технологии разделяемой памяти, при которой время передачи исчисляется единицами микросекунд, однако он приемлем для задач автоматического управления процессами, работающими в цикле 10-100 мс. Поскольку разработанный прототип является

прежде всего демонстратором технологии, постольку он обладает значительным потенциалом оптимизации времени исполнения.

IX. Заключение

Проведенное исследование и разработанный прототип подтверждают принципиальную возможность и практическую целесообразность построения АСУ ТП ОА на основе глубокой интеграции информационных моделей МЭК 61850 и МЭК 61131-3. Предложенная архитектура, центром которой является независимый от производителя системный конфигуратор и виртуализированный контроллер, позволяет:

- реализовать открытую модель данных и конфигурации, разрывая зависимость от конкретного производителя оборудования;
- обеспечить абстракцию от аппаратного обеспечения через виртуализацию ПЛК и единую шину данных, позволяя переносить прикладные функции между различными вычислительными платформами;
- снизить затраты на инжиниринг и пусконаладку за счет сквозной, автоматизированной конфигурации от системного уровня до прикладной логики и возможности прямой загрузки конфигурации в контроллер;
- создать платформу для внедрения ИИ-решений (*AI Co-Pilot*), которые могут работать с унифицированной семантической моделью на всех этапах жизненного цикла системы;
- создать новую среду для конкуренции производителей, которые могут предлагать оптимизированные, совместимые с данной моделью программные модули (логические блоки), реализующие сложные алгоритмы или обеспечивающие более высокую производительность и надежность.

Дальнейшие работы направлены на формализацию и стандартизацию предлагаемых расширений МЭК 61850, углубленную интеграцию с CIM для реализации модельно-ориентированного подхода к разработке прикладных программ, а также на разработку и тестирование ИИ-модулей, использующих единую информационную модель для автоматического синтеза конфигураций систем автоматизации и отдельных устройств.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка прототипа устройств и программного обеспечения АСУТП с открытой архитектурой для решения задач управления в электроэнергетике» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «ПНИ-24/26» в 2024-2026 г.г.

© Горохов Р.С., 2026

© Савичев М.А., 2026

© Волошин Е.А., 2026

© Лачугин В.Ф., 2026

Поступила в редакцию 02.07.2026

*Принята к публикации 21.08.2026**Received 02.07.2026**Accepted 21.08.2026***Библиографический список**

- [1] Zhabelova G., Vyatkin V. Multiagent Smart Grid Automation Architecture Based on IEC 61850/61499 Intelligent Logical Nodes // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59. P. 2351-2362. DOI: 10.1109/TIE.2011.2167891
- [2] F.M.T. Brazier, H.la Poutre, A.R. Abhyankar, K. Saxena, S.N. Singh, K.K. Tomar, A review of multi agent based decentralised energy management issues // *International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE)*, 2015 № 978-1-4673-7491-0. DOI: 10.1109/EnergyEconomics.2015.7235106
- [3] Strasser T. et al. A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. № 62 (4). P. 2424-2438. DOI: 10.1109/TIE.2014.2361486
- [4] Usler M. et al. Applying the Smart Grid Architecture Model for Designing and Validating System-of-Systems in the Power and Energy Domain: A European Perspective // *Energies*. 2019. № 12 (2). DOI: 10.3390/en12020258
- [5] Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F., Lastra J.L. Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach. Berlin: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-05624-1
- [6] S. Chatzivasileiadis, A. Venzke, J. Stiasny, G. S. Misyris Machine Learning in Power Systems: Is It Time to Trust It? // *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 20, pp. 32–41, 2022, DOI: 10.1109/mpe.2022.3150810
- [7] Vyatkin V. IEC 61499 as Enabler of Distributed and Intelligent Automation: State-of-the-Art Review // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2011. № 7 (4). P. 768-781. DOI: 10.1109/TII.2011.2166785
- [8] Santodomingo R., Rohjans S., Rodríguez-Mondejar J.A., Sanz-Bobi M.A. Using CIM and IEC 61850 for the Management of Electric Vehicle Charging Stations // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017.
- [9] IEC 61850-7-4:2010. Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-4: Basic communication structure – Compatible logical node classes and data object classes. Int. 2010-03-31.
- [10] IEC 61131-3:2013. Programmable controllers – Part 3: Programming languages. Int. 2013-02-20.
- [11] Иванова О.Е. Индустрия 4.0 – революция, требующая технологий и национальных стратегий промышленного развития // *Российский журнал менеджмента*. 2022. № 10 (3). С. 56-60. DOI: 10.29039/2409-6024-2022-10-3-56-60
- [12] D. Lehner, S. Wolny, A. Mazak-Huemer, M. Wimmer Towards a Reference Architecture for Leveraging Model Repositories for Digital Twins // *25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2020, pp. 1501–1508, DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212144
- [13] OPC UA Information Model for IEC 61131-3 [Электронный ресурс] - OPC Foundation, 2018. Режим доступа: <https://reference.opcfoundation.org/specs/OPC-30000/full> (дата обращения: 01.09.2026).

References

- [1] G. Zhabelova and V. Vyatkin, "Multiagent Smart Grid Automation Architecture Based on IEC 61850/61499 Intelligent Logical Nodes", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 2351-2362, 2012. DOI: 10.1109/TIE.2011.2167891
- [2] F. M. T. Brazier, H. la Poutre, A. R. Abhyankar, K. Saxena, S. N. Singh, K. K. Tomar, A review of multi agent based decentralised energy management issues // International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE), 2015 № 978-1-4673-7491-0. DOI: 10.1109/EnergyEconomics.2015.7235106
- [3] T. Strasser et al., "A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2424-2438, Apr. 2015. DOI: 10.1109/TIE.2014.2361486
- [4] M. Uslar et al., "Applying the Smart Grid Architecture Model for Designing and Validating System-of-Systems in the Power and Energy Domain: A European Perspective", *Energies*, vol. 12, no. 2, 2019. DOI: 10.3390/en12020258
- [5] A.W. Colombo, T. Bangemann, S. Karnouskos, J. Delsing, P. Stluka, R. Harrison, F. Jammes and J.L. Lastra, *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*. Berlin: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-05624-1
- [6] S. Chatzivasileiadis, A. Venzke, J. Stiasny, G. S. Misyris Machine Learning in Power Systems: Is It Time to Trust It? // *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 20, pp. 32–41, 2022, DOI: 10.1109/mpe.2022.3150810
- [7] V. Vyatkin, "IEC 61499 as Enabler of Distributed and Intelligent Automation: State-of-the-Art Review", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 768-781, Nov. 2011. DOI: 10.1109/TII.2011.2166785
- [8] R. Santodomingo, S. Rohjans, J.A. Rodríguez-Mondejar and M.A. Sanz-Bobi, "Using CIM and IEC 61850 for the Management of Electric Vehicle Charging Stations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017.
- [9] Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-4: Basic communication structure – Compatible logical node classes and data object classes, IEC 61850-7-4:2010, Mar. 2010.
- [10] Programmable controllers – Part 3: Programming languages, IEC 61131-3:2013, Feb. 2013.
- [11] O.E. Ivanova, "Industry 4.0 - a revolution requiring technology and national industrial development strategies", *Russian journal of management*, vol. 10, no. 3, pp. 56-60, 2022. DOI: 10.29039/2409-6024-2022-10-3-56-60
- [12] D. Lehner, S. Wolny, A. Mazak-Huemer, M. Wimmer Towards a Reference Architecture for Leveraging Model Repositories for Digital Twins // *25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2020, pp. 1501-1508, DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9212144
- [13] OPC Foundation. OPC UA Information Model for IEC 61131-3, 2018.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Горохов Роман Сергеевич, студент
Национального исследовательского
университета «МЭИ», г. Москва, Россий-
ская Федерация.

Савичев Михаил Алексеевич, студент
Национального исследовательского
университета «МЭИ», г. Москва, Россий-
ская Федерация.

Волошин Евгений Александрович,
старший преподаватель Национального
исследовательского университета
«МЭИ», г. Москва, Российская Федера-
ция.

Лачугин Владимир Федорович, доктор
технических наук, профессор
Национального исследовательского
университета «МЭИ», г. Москва, Россий-
ская Федерация.

Roman S. Gorokhov, student of the
National Research University “Moscow
Power Engineering Institute” (MPEI),
Moscow, Russian Federation.

Mikhail A. Savichev, student of the
National Research University “Moscow
Power Engineering Institute” (MPEI),
Moscow, Russian Federation.

Evgeniy A. Voloshin, senior lecturer
of the National Research University
“Moscow Power Engineering Institute”
(MPEI), Moscow, Russian Federation.

Vladimir F. Lachugin, D. Sci. (Eng.),
professor of the National Research Uni-
versity “Moscow Power Engineering In-
stitute” (MPEI), Moscow, Russian
Federation.