

С. П. Ковалёв, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., kovalyov@sibnet.ru,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

Разработка платформы управления распределенными энергетическими ресурсами на базе цифрового двойника

Статья посвящена вопросам разработки платформы для управления распределенными энергетическими ресурсами на основе цифровых двойников. Варианты задач, для решения которых может быть использована платформа, включают управление спросом, зарядку электромобилей, одноранговую торговлю энергией, планирование работы накопителей, организацию виртуальной электростанции и ряд других. Благодаря цифровым двойникам платформа может реализовать такие варианты использования, управляя либо реально эксплуатируемым оборудованием, либо его виртуальными моделями на стадии проектирования. Массовым владельцам и операторам распределенных энергоресурсов платформа предлагает повышение качества электроснабжения (в том числе устойчивости), снижение издержек (в том числе транзакционных), получение новых рыночных возможностей (в том числе участия в программах различных агрегаторов). Поставщикам программного обеспечения и оборудования платформа интересна возможностью быстро компоновать системы управления распределенными энергоресурсами практически без программирования. Проектирование цифрового двойника и платформы выполнено в разрезе архитектурных точек зрения в соответствии с рекомендациями международного стандарта системной инженерии ISO/IEC/IEEE 42010. Описана типовая архитектура формируемых цифровых двойников энергетических систем. Выделены основные типы математических моделей в составе цифровых двойников: физические модели на основе численного решения дифференциальных уравнений и оптимизационных задач, модели машинного обучения, модели на основе знаний. Интероперабельность таких разнородных моделей обеспечивается на основе онтологической модели распределенной энергетики. Для платформы приведены три архитектурных представления, отражающие ключевые точки зрения: функциональное, информационное и программное. Чтобы формализовать и в конечном счете автоматизировать интеграцию разнородных моделей, предложены новые математические методы модельно-ориентированной системной инженерии, основанные на аппарате теории категорий, в том числе на универсальных конструкциях и мультизапаятой. Показано, что категорию мультизапаятой можно построить с помощью стандартных конструкций произведения, экспоненты и декартова квадрата, что позволяет установить ряд ее практически значимых свойств.

Ключевые слова: распределенные энергетические ресурсы, цифровой двойник, цифровая платформа, архитектурная точка зрения, теория категорий, категория мультизапаятой

Во всем мире постоянно растет количество, разнообразие и сложность распределенных энергетических ресурсов (РЭР). Современные системы РЭР — это высокотехнологичные объекты, включающие в себя разнообразные энергоприемники (в том числе с управляемой нагрузкой), локальные генерирующие установки (как на ископаемом топливе, так и на возобновляемых источниках энергии — ВИЭ) и накопители электроэнергии. Наряду с хорошо известными выгодами развитие РЭР порождает новые угрозы устойчивости, надежности, кибербезопасности и др. Например, зависимость генерации на ВИЭ от погодных условий приводит к спорадическим скачкам напряжения в распределительной сети и сбоям противоаварийной автоматики, а рассогласован-

ность уставок генераторов и накопителей порождает незатухающие колебания параметров электрического режима [1]. Автоматизация управления РЭР требует массового внедрения устройств интернета вещей, встроенное программное обеспечение которых отличается высокой уязвимостью для атак [2].

Можно эффективно парировать такие угрозы при координированном управлении РЭР. При этом невозможно централизовать РЭР по аналогии с инфраструктурой большой энергетики, такой как магистральные электрические сети или атомная энергетика. Адекватный подход предлагает цифровая экономика: рекомендуется организовать управление РЭР на базе единой платформы [3]. Платформенный подход позволяет, в условиях обмена большого числа

разнородных субъектов энергетическими, информационными и финансовыми ресурсами, обеспечить эффективный информационный обмен между субъектами, верификацию взаимных обязательств и финансовые взаиморасчеты, взаимодействие с датчиками и исполнительными механизмами объектов управления, моделирование и оптимизационное планирование режимов работы оборудования, защиту от несанкционированного доступа к информации и т. д. Типовые платформенные решения с применением искусственного интеллекта минимизируют ошибки управления. Владельцы и операторы РЭР заинтересованы добровольно подключаться к такой платформе в целях повышения качества электроснабжения (в том числе устойчивости), снижения издержек (в том числе транзакционных), получения новых рыночных возможностей (в том числе участия в программах различных агрегаторов). Поставщикам программного обеспечения и оборудования РЭР платформа интересна возможностью быстро компоновать готовые системы управления практически без программирования (режим "low-code"). Среди платформ такого типа отметим "∀Платформу", создаваемую в рамках российской Национальной технологической инициативы "Энерджинет" [4].

Ключевым средством повышения уровня автоматизации, согласованности и корректности управления является цифровой двойник (ЦД) объекта — набор моделей высокой степени адекватности, способный детально отображать состояние объекта, предсказывать его поведение в различных условиях и определять целесообразные управляющие воздействия на него [5]. Будучи интеллектуальной надстройкой над средой интернета вещей и информационной моделью объекта, ЦД выступает ключевым базовым элементом платформы: реализуется модельно-ориентированный подход к управлению жизненным циклом, согласно которому все операции над объектом сначала оптимизируются и верифицируются на моделях "в цифре" и только потом выполняются "в железе". Ожидается, что в управлении РЭР такой подход позволит существенно повысить экономический эффект [6]. Однако эффект должен соразмеряться с затратами на создание и эксплуатацию ЦД, а высокие затраты обусловлены большим числом сложных разнородных моделей, требующихся для адекватного описания энергосистемы, в особенности

при наличии РЭР [7]. Интеграция и поддержка корректного совместного функционирования многочисленных разноплановых моделей требует огромного количества как компьютерных, так и человеческих ресурсов [8]. Действительно, ЦД должен корректно и своевременно воспроизводить длительные многошаговые процессы электроснабжения, затрагивающие широко распределенные совокупности разнородных объектов и подверженные влиянию скрытых внешних факторов.

Модели в составе ЦД различаются как горизонтально, по описываемым единицам и частям системы, так и вертикально, по отражаемым аспектам и точкам зрения. В условиях такой разнородности системная инженерия рекомендует проектировать ЦД, а значит и платформу в целом, в разрезе архитектурных точек зрения согласно стандарту ISO/IEC/IEEE 42010. Для обеспечения единства структур данных моделей и исключения разночтений в именовании и интерпретации используемых сущностей ЦД должен иметь солидную семантическую основу — онтологическую модель распределенной энергетики [9]. Чтобы формализовать и в конечном счете автоматизировать интеграцию моделей, целесообразно применять новые математические методы модельно-ориентированной системной инженерии, основанные на аппарате теории категорий [10]. Подход к разработке платформы управления РЭР на базе ЦД, удовлетворяющий этим требованиям, представлен в настоящей статье.

Обзор цифрового двойника энергетической системы

С точки зрения архитектуры ЦД представляет собой систему тесно интегрированных друг с другом цифровых моделей. Модели часто реализуются в виде (микро)сервисов [11]. Сервис-ориентированная архитектура скрывает от пользователя детали реализации моделей и обеспечивает большую гибкость в организации взаимодействия между моделями.

В литературе описаны разные подходы к архитектурной декомпозиции ЦД [12]. Например, по образцу киберфизических систем строится слоистая архитектура, на нижнем слое которой находится физический объект, на верхнем — сервисы интеллектуального управления, на промежуточных — те или иные связующие

компоненты. Применяется также классификация модулей ЦД по видам функций: хранение данных, информационный обмен, расчет, визуализация и т. д. Чтобы наглядно выделить специфику ЦД среди других классов цифровых систем, рассмотрим декомпозицию по видам моделей и предметам моделирования. Типичный ЦД энергосистемы состоит из моделей следующих видов [9]:

- *онтологическая модель* — формализованный свод понятий и отношений фрагмента предметной области, охваченного создаваемой системой управления;
- *документация в электронном виде*: нормативно-методическая, проектно-сметная, эксплуатационная, планово-производственная, отчетная и др.;
- *информационные модели* — структурированные машиночитаемые массивы данных по составу и характеристикам технологических объектов, оборудования, субъектов и т. д. (мастер-данные);
- *оперативная информация* — временные ряды параметров энергоснабжения, видеопотоки, журналы событий, поступающие от приборов и смежных автоматизированных систем, из входящих электронных документов и через формы пользовательского интерфейса для ручного ввода данных;
- *цифровые схемы и интерактивные формы*, такие как принципиальные схемы энергоснабжения; структурные и функциональные модели; планы и 3D-модели размещения оборудования в зданиях и сооружениях; карты расположения технологических объектов на местности;
- *математические и имитационные модели*, позволяющие оценивать, прогнозировать и оптимизировать потоки энергоносителей, режимы и переходные процессы, техническое состояние оборудования и ремонты и т. д.

Составление ЦД сводится к выбору подходящих моделей частей и аспектов оригинала, их настройке/

калибровке/обучению и интеграции для получения целостной цифровой системы. По существу, требуется воспроизвести процесс создания оригинала на многочисленных разрозненных виртуальных моделях. Если каждую часть можно представить одной моделью, то можно применить прямой процесс композиции ЦД снизу вверх. Однако для энергетических систем такая ситуация не характерна. Здесь необходим процесс композиции сверху вниз, включающий поиск набора цифровых моделей, реализующего (суб-, Парето-) оптимальный компромисс между точностью/оперативностью и расходом аппаратных ресурсов.

Во время функционирования ЦД модели интенсивно взаимодействуют как с внешними источниками и получателями данных, так и друг с другом. Варианты взаимодействия с моделью включают предоставление данных другим моделям, ссылки на данные из других моделей, проверку данных и генерацию структуры данных, как показано на рис. 1.

Различные математические (в широком смысле) и имитационные модели непосредственно реализуют назначение ЦД в ходе совместного функционирования. Такие модели в общем случае делятся на три больших класса:

- физические и/или экономические модели "из первых принципов", основанные на чис-

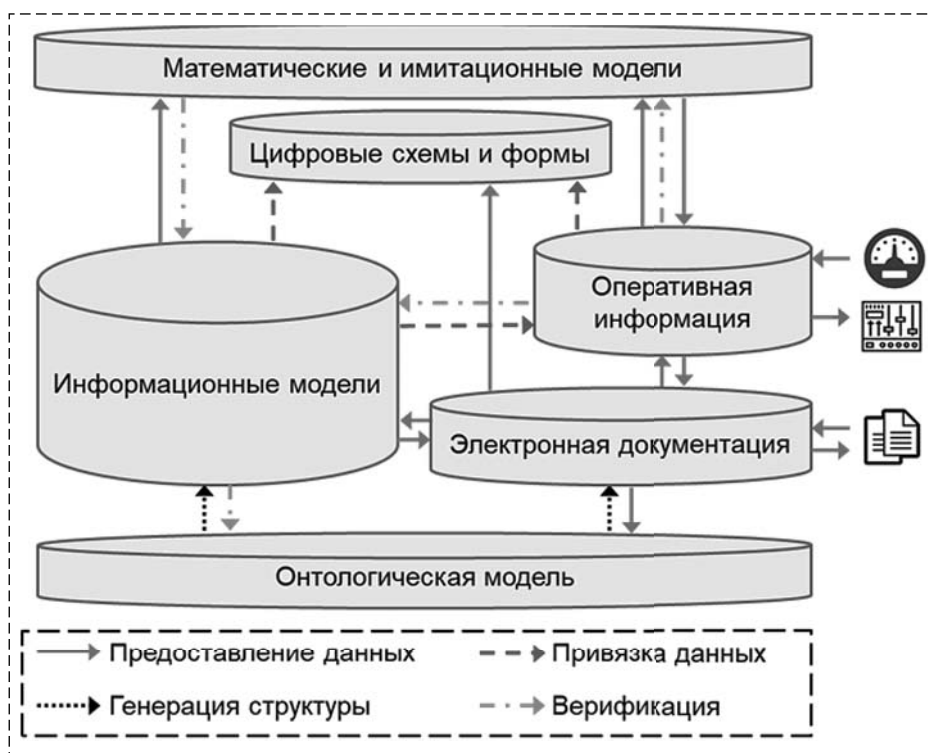


Рис. 1. Архитектура ЦД энергосистемы
Fig. 1. The power system DT architecture

ленном решении уравнений и оптимизационных задач;

- статистические модели, основанные на машинном обучении, включая нейронные сети;
- модели экспертных знаний и принятия решений, в том числе продукционные (rule-based) и мультиагентные системы.

Численные модели имеют долгую историю разработки, особенно в составе инженерного программного обеспечения (Computer Aided Engineering, CAE). Традиционно они использовались в конструкторских бюро для оценки технических решений, обрабатывая введенные вручную данные в условиях очень слабых временных ограничений. В последнее время широко доступные компьютеры достигли производительности, достаточной для выполнения алгоритмов CAE в мягком реальном времени в ходе эксплуатации активов, обрабатывая показания датчиков. Это позволяет использовать CAE в ЦД: приведем в пример термоэлектромагнитную модель распределительного силового трансформатора, предназначенную для оперативного прогнозирования отказов [13].

При всей своей точности модели оборудования недостаточны для скоординированного управления несколькими РЭР, включенными в общую энергосистему. Необходима дополнительная связующая модель типа схемы электроснабжения: это граф, вершины которого представляют единицы оборудования и фрагменты линий электропередачи, а ребра представляют их физические соединения в рамках сети. Графовая модель позволяет решать математические задачи управления сетью: расчет потоков мощности при различных профилях генерации и потребления, поиск и резервирование критических узлов и путей, виртуальное тестирование переключений, оценка стабильности режима и т. д.

Когда процессы, подлежащие дублированию в рамках ЦД, управляются неизвестными правилами (в том числе выходящими за рамки физики) и/или содержат скрытые изменчивые закономерности, численные методы нередко проигрывают машинному обучению (machine learning, ML). Модель ML выполняет прогнозы или принимает решения, не будучи явно запрограммированной, путем экстраполяции обучающей выборки — набора известных сценариев поведения оригинала, наблюдаемых при различных значениях влияющих факторов (характеристик). Известны применения

ML для прогнозирования потребления / генерации / цены электроэнергии, оптимизации распределения нагрузки, оценки и прогнозирования работоспособности энергетических машин, диагностики неисправностей и других процедур управления [14].

В дополнение к вышеприведенным ЦД может содержать модели еще одного класса, основанные на экспертных знаниях, представленных в машиночитаемом формате. Значительный объем знаний, относящихся к мониторингу и управлению, можно выразить в виде правил вида "ЕСЛИ условие, ТО действие". ЦД способен непрерывно вычислять такие правила и выдавать предписанные действия, как только поступающие в реальном времени данные удовлетворяют их условиям [15]. Более сложные сценарии принятия решений выполняются множеством рассуждающих сторон (агентов), мотивированных различными и даже противоречивыми целевыми установками, но стремящихся достичь консенсуса. Например, агент может представлять каждую единицу РЭР в составе микрогрида, нацеливаясь на максимизацию экономического эффекта от него. Консенсус между такими агентами, достигнутый при соблюдении ограничений надежности и стабильности режима, определяет (суб)оптимальный режим работы микрогрида в целом [16].

Вышеприведенный обзор оправдывает оснащение ЦД несколькими принципиально разными моделями одних и тех же явлений, способными выполнять калибровку и проверку друг друга. Более того, набирает популярность подход к повышению точности путем очень глубокого переплетения моделей различной природы. Приведем в пример так называемую нейронную сеть, основанную на физике (physics-informed neural network, PINN): ее функция потерь, которая должна быть минимизирована в ходе обучения, содержит не только чисто статистическую ошибку, но и меру количественного нарушения предсказанием физических законов (например, законов Кирхгофа и Ома). В составе ЦД энергосистемы такая нейросеть может в результате обучения принять топологию, сходную с топологией управляемой электросети. Получается имитационная модель приемлемой точности даже в случае, когда данные об электрическом режиме в реальном времени доступны только для ограниченного подмножества узлов электросети [17].

Цифровая платформа над цифровым двойником

Каким бы функционально мощным ни был ЦД, он предназначен для использования скорее в качестве инструментального цифрового продукта, чем средства для конечного пользователя. Чтобы "дотянуться" до пользователей, ЦД должен быть оснащен универсальными модулями сбора и представления данных, удобным интерфейсом и масштабируемой операционной инфраструктурой. В итоге формируется полноценная цифровая платформа управления распределенными энергетическими ресурсами. На объектах распределенной энергетики, в центрах управления и в облаке внедряются, развертываются и эксплуатируются приложения и службы на базе платформы для автоматизации различных вариантов ее использования. Варианты включают управление спросом (demand response), зарядку электромобилей, одноранговую (peer-to-peer) торговлю энергией, планирование работы накопителей, организацию виртуальной электростанции и т. д. [4] Благодаря ЦД платформа может исполнять такие варианты использования, управляя либо реально эксплуатируемым оборудованием, либо его виртуальными моделями на стадии проектирования. В ходе проектирования платформы моделирование вариантов использования порождает набор архитектурных представлений платформы с различных точек зрения, как предписывает стандарт ISO/IEC/IEEE 42010 (в России принят как ГОСТ Р 57100—2016 "Системная и программная инженерия. Описание архитектуры").

В частности, с точки зрения функциональной архитектуры компоненты платформы образуют следующие семь подсистем:

- подсистема Интернета вещей (ПИВ);
- подсистема ЦД (ПЦД);
- подсистема интеллектуального управления (ПИУ);
- подсистема энергетических транзакций (ПЭТ);
- подсистема электронного документооборота (ПЭД);
- подсистема мониторинга и диагностики (ПМД);
- подсистема информационной безопасности (ПИБ).

Каждая подсистема инкапсулирует некоторый класс решений Индустрии 4.0. Таким образом, платформа предоставляет интернет ве-

щей, ЦД, ML, блокчейн и другие технологии в форме, готовой к использованию массовыми потребителями и агрегаторами распределенной энергетики, с учетом их нужд, возможностей и бюджетов.

С точки зрения информационной архитектуры платформа поддерживает сбор, хранение, обработку и передачу данных следующих типов [4]:

- 1) данные телеизмерений и телесигнализации;
- 2) уставки и команды управления оборудованием;
- 3) данные по профилям, режимам оборудования, ценам;
- 4) нормативно-справочная информация (НСИ);
- 5) мастер-данные;
- 6) электронные документы;
- 7) данные энергетических транзакций и смарт-контрактов;
- 8) журналы мониторинга состояния платформы и приложений;
- 9) данные для идентификации, авторизации и аутентификации;
- 10) онтологическая модель.

В ходе функционирования прикладных систем управления РЭР на базе платформы между компонентами различных подсистем поддерживаются типовые потоки данных, показанные на рис. 2. Архитектура платформы позволяет приложениям формировать и иные конфигурации потоков данных по необходимости.

Обратим внимание, что на рис. 1 выше показана внутренняя структура подсистемы ЦД, для которой, как показано на рис. 2, ПИВ предоставляет данные в реальном времени, ПЭД обрабатывает документы, ПИУ реализует всевозможные алгоритмы для математических моделей, а остальные подсистемы в совокупности замыкают операционную инфраструктуру.

С точки зрения архитектуры программного обеспечения платформа наследует от ЦД микросервисную организацию. Напомним, что микросервисы — это компактные, слабо связанные и легко изменяемые модули с открытым прикладным программным интерфейсом (Application Program Interface, API), взаимодействующие в единой информационной среде с использованием экономичных коммуникационных протоколов в стиле REST (REpresentational State Transfer) [18]. В платформе также реализуются более крупные типовые единицы прикладной функциональности, собранные из микросервисов и доступные по тем

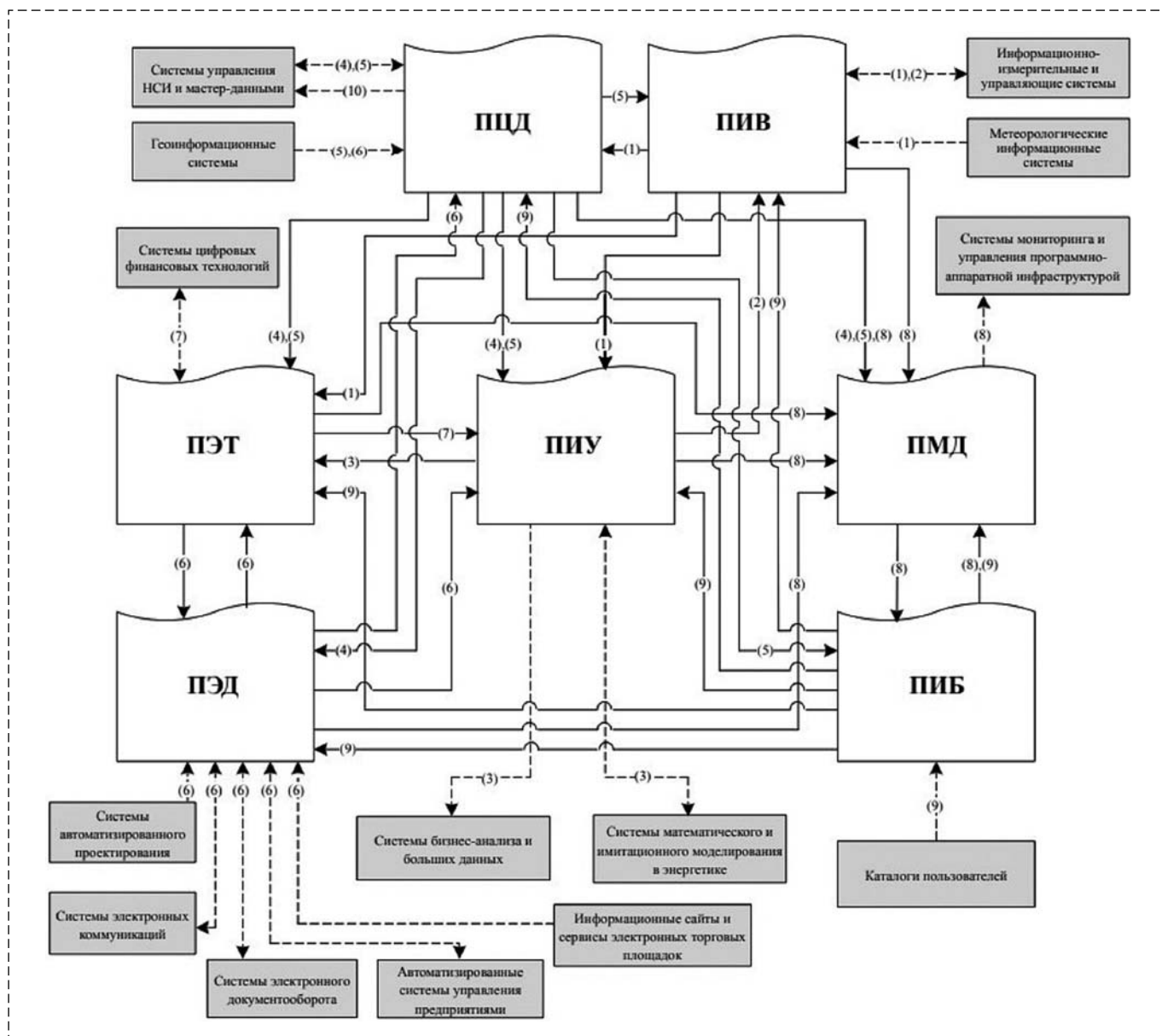


Рис. 2. Архитектура платформы [4]
 Fig. 2. The platform architecture

же протоколам. Интерфейс доступа к компонентам платформы публикуется через шлюз API для вызовов из приложений. К настоящему времени микросервисная архитектура стала достаточно зрелым подходом, пригодным для создания сложных программных систем промышленного уровня готовности.

Приложение на базе платформы, такое как система управления некоторым объектом распределенной энергетики, состоит из вызовов API микросервисов в порядке, обусловленном автоматизированным процессом. Дополнительно в приложении реализуются средства поддержки процесса, специализированные до такой степени, что включать их в платформу

нерационально: это могут быть драйверы взаимодействия с редко встречающимися устройствами, адаптеры интеграции со смежными автоматизированными системами, модули сбора и обработки специфических данных, видеокadres пользовательского интерфейса и шаблоны электронных документов [4].

В качестве примера приложения рассмотрим коммерческую диспетчерскую службу для оптимального управления энергопринимающим оборудованием потребителя, локальной генерацией и системами накопления электроэнергии. Целью управления является минимизация затрат на электроэнергию и мощность, приобретаемые на розничном рынке, при условии

удовлетворения потребностей потребителя в электроэнергии. Вознаграждение диспетчера рассчитывается пропорционально величине экономии затрат по правилам, указанным в смарт-контракте с потребителем. ЦД используется для определения возможных стратегий электроснабжения на очередные сутки, выбора (суб)оптимальной стратегии среди них и, в конечном счете, ее реализации в мягком реальном времени.

Алгебраический подход к синтезу цифрового двойника

Компоновка (интеграция) ЦД энергосистемы, будучи дорогостоящим и трудоемким процессом, нуждается в автоматизации, важнейшим предварительным условием для которой являются формальное описание и верификация. Существует перспективный подход к такому описанию, в качестве математической основы использующий теорию категорий [19 и др.]. Теория категорий позволяет четко выделить интегрируемость среди других свойств моделей, смещая фокус представления с их внутреннего содержания на внешнее поведение по отношению друг к другу (точка зрения системного инженера на изделие как на "черный ящик").

Обозначим \mathcal{C} категорию вида "виртуального каталога" моделей. Объектами такой категории являются все возможные модели определенного типа. Ее морфизмы описывают в терминах моделей все возможные действия, которые могут выполняться при составлении систем из компонентов. Легко видеть, что \mathcal{C} действительно является категорией, поскольку в ней имеется композиция морфизмов (последовательное выполнение действий) и тождественные морфизмы (холостое "ничегонеделание" с любой моделью). Сложные конфигурации систем, включающие несколько моделей, провязанных морфизмами, представляются диаграммами в \mathcal{C} .

Такое теоретико-категорное представление известно для информационных моделей [20]. Здесь объектами служат множества данных различных типов, заполняющие таблицы в базе данных, а морфизмы порождаются реляционными ссылками (внешними ключами) — отображениями, посредством которых таблицы комбинируются в сложные массивы взаимосвязанных данных, удовлетворяющих

выбранной онтологии. Таким образом, все возможные информационные модели, относящиеся к определенной предметной области, такой как распределенная энергетика, составляют подкатегорию в хорошо известной категории **Set**, состоящей из всех множеств и всех отображений. Диаграммы в этой подкатегории описывают конструирование баз данных.

Математические модели, будучи самыми важными среди компонентов ЦД, труднее всего поддаются категорному представлению. Например, для описания энергосистем с РЭР и расчета потоков мощности было предложено сложное категорное описание РЭР как конечных автоматов с состояниями, помеченными областями спроса на электроэнергию [21]. В качестве более простого, но вполне релевантного подхода рассмотрим дискретно-событийное моделирование. Здесь модель представляет собой сценарий — фрагмент воображаемой истории поведения актива, представленный потоком дискретных событий различных видов. Описания действий по сборке сценариев поведения сложных систем отражают вклад сценариев поведения компонентов. Формально сценарий — это множество событий, частично упорядоченное причинно-следственными зависимостями и размеченное видами событий. Ни события, ни зависимости, ни виды событий не "теряются" при сборке сложных сценариев, поэтому действия по сборке описываются отображениями, сохраняющими порядок и разметку [22]. Все сценарии и действия образуют категорию, обозначаемую как **Pomset**, диаграммы в которой представляют построенные сложные сценарии. В качестве способов построения последних рассматривается не только традиционная сборка из модулей, но и связывание (weaving) аспектов — повторяющихся функциональных единиц, погруженных в контекст своего исполнения [23].

В произвольной категории \mathcal{C} строго определена универсальная алгебраическая конструкция, называемая копределом диаграммы: если копредел существует, то преобразует диаграмму в интегральную комплексную модель, структуру которой она представляет. Формально *копредел* — это объект, снабженный морфизмами из каждой вершины диаграммы, удовлетворяющими определенным условиям естественности и универсальности. Условия выражают в алгебраических терминах общепринятое представление о системе

как о контейнере, который включает в себя все части с учетом их структурных взаимосвязей, и ничего другого [10]. Примерами реализации копредела служат полная база данных информационной модели и комплексный сценарий эксплуатации объекта. В то время как конструкция копредела облегчает подход к моделированию системы "снизу вверх", подход "сверху вниз" подразумевает поиск диаграммы, копредел которой удовлетворяет определенным интегральным свойствам.

Для сложного гетерогенного актива, такого как энергетическая система, может быть нецелесообразным собрать все возможные модели всех частей в одну категорию-каталог. Вместо этого имеются разные каталоги, представляющие части различной природы: энергообъекты, силовое оборудование, сегменты линий электропередачи, контроллеры, программы и т. д. В рамках ЦД высокоуровневая структура актива представляется ориентированным графом с вершинами, помеченными моделями разнородных частей. Такой граф не является диаграммой в теоретико-категорном смысле, поскольку его вершины относятся к разным категориям. Тем самым, вышеописанный механизм вычисления копределов не работает для формализации составления ЦД. Однако стандарт ISO/IEC/IEEE 42010 позволяет все же применять его, только в контексте некоторой точки зрения [10]. Действительно, алгебраические описания всех возможных компонентов с определенной фиксированной точки зрения составляют категорию, морфизмы в которой выражают выбранную точку зрения на действия по сборке систем. Например, категория **Set** (или подходящая подкатегория в ней) применяется для представления информационной архитектуры, а категория дискретно-событийного моделирования **Pomset** представляет точку зрения поведения. Пусть I — граф структуры актива, $|I|$ — множество вершин графа, D_i — категории-каталоги моделей частей (по одной для каждого $i \in |I|$), C — категория точки зрения, $F_i: D_i \rightarrow C$ — функторы, представляющие модели частей с точки зрения C с обеспечением семантической согласованности. Архитектура актива описывается с точки зрения C как семейство объектов $A_i \in D_i$, $i \in |I|$, вместе с некоторой диаграммой $\Delta: I \rightarrow C$, удовлетворяющей условию $\Delta i = F_i A_i$, $i \in |I|$.

Копредел диаграммы Δ представляет с точки зрения C актив в целом, формализуя про-

цесс прямого составления ЦД снизу вверх. Для формализации процедур подбора и замены моделей, из которых состоит процесс составления ЦД сверху вниз, применяются соответствующие преобразования описаний архитектуры. В частности, преобразование должно сохранять граф структуры актива и правила представления всех частей. Следовательно, адекватным является естественное преобразование (в теоретико-категорном смысле) диаграмм описания архитектуры при условии, что оно индуцировано действиями, заимствованными из каталогов моделей частей. При любых фиксированных графе I и семействе функторов F_i , $i \in |I|$, совокупность всех описаний архитектуры и всех их преобразований образует категорию, которая обозначается $\Downarrow_I F$ и называется *категорией мультизапятой (multicomma)* [10]. (Такое название связано с тем, что если I состоит из двух точек и единственной нетождественной стрелки из одной точки в другую, то мультизапятая переходит в хорошо известную категорию запятой.) Автоматический инструмент составления ЦД может найти наилучший набор составляющих моделей в подходящей подкатегории мультизапятой, синхронно перемещаясь по каталогам моделей частей шагами, каждый из которых образует формально корректное преобразование описаний архитектуры. Фактически автоматизируется параметрическая оптимизация ЦД.

Примечательно, что категория мультизапятой является универсальной конструкцией — ее можно построить в "категории всех категорий" **CAT** посредством стандартных конструкций произведения, экспоненты и декартова квадрата. Напомним, что экспонента C^I — это категория, состоящая из всех диаграмм в C формы I и всех их естественных преобразований. Каноническое вложение множества $|I|$, рассматриваемого как дискретная категория, в I индуцирует функтор $C^{(|I| \hookrightarrow I)}: C^I \rightarrow C^{|I|}$, сопоставляющий диаграмме семейство ее вершин. Мультизапятая изоморфна левой верхней вершине декартова квадрата в **CAT**, изображенного на рис. 3 [24].

Мы будем называть этот декартов квадрат *образующим* для мультизапятой $\Downarrow_I F$. Он позволяет установить ряд ее свойств, имеющих прикладное значение в проектировании ЦД. Например, если система не имеет никакой нетривиальной структуры, т.е. $I \cong \mathbf{1}$, то ее представление с точки зрения C сводится в частности к одному функтору $F_0: D_0 \rightarrow C$; однако

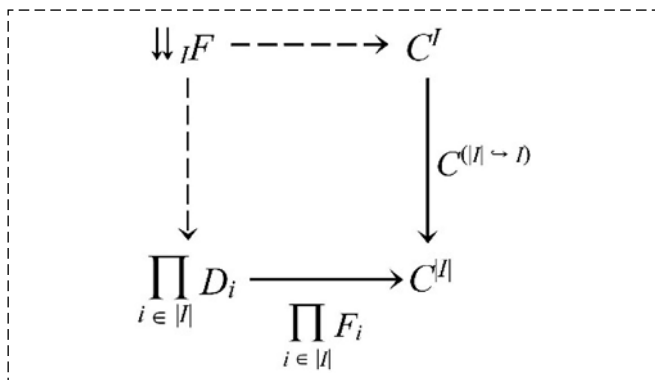


Рис. 3. Декартов квадрат, образующий мультизапятую [24]
 Fig. 3. The multicomma generating pullback

категория $\Downarrow_I(F_0)$ изоморфна каталогу единственной "составляющей" D_0 вне зависимости от выбора этого функтора. Действительно, $|I| \cong \mathbf{1}$, так что правая вертикальная стрелка образующего декартова квадрата становится изоморфизмом. А поскольку ребро любого декартова квадрата, параллельное изоморфизму, само является изоморфизмом [25, предложение 11.18], левая вертикальная стрелка образующего декартова квадрата для $\Downarrow_I(F_0)$ также является изоморфизмом: $\Downarrow_I(F_0) \cong D_0$.

Другой частный случай мультизапятой получается, когда все функторы F_i , $i \in |I|$, являются изоморфизмами. Это означает, что все части взаимно однозначно (т. е. без пробелов и лишней информации) описываются с точки зрения C . Тем самым, собираемые из таких частей системы фактически гомогенны, и сборка полностью описывается в C , причем любая диаграмма формы I пригодна в качестве представления архитектуры некоторой системы. В этом случае нижняя горизонтальная стрелка образующего декартова квадрата является изоморфизмом, а значит, им является и верхняя горизонтальная стрелка: $\Downarrow_I F \cong C^I$.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда система состоит из нескольких не взаимодействующих друг с другом подсистем, т. е. когда форма I представляет собой сумму (раздельное объединение) подформ: $I \cong \prod_{s \in S} I_s$ для некоторого множества S . Как и следует ожидать, архитектура такой системы может быть составлена из произвольной совокупности архитектур подсистем путем простого "расположения рядом":

$$\Downarrow_I F \cong \prod_{s \in S} \Downarrow_{I_s} (F_i, i \in |I_s|).$$

Чтобы убедиться в этом, нужно построить "почленное" произведение образующих декар-

товых квадратов для мультизапятых, представляющих каждую подсистему, и воспользоваться тем фактом, что экспонента переводит произведения в суммы (т. е. $C^X \times C^Y \cong C^X \amalg C^Y$ [25, предложение 27.8(3)]). Отсюда, в частности, вытекает, что если структура системы дискретна, т. е. ни одна часть не "знает" ни о какой другой, то соответствующая категория мультизапятой изоморфна произведению каталогов частей.

Почленное произведение образующих декартовых квадратов также возникает при моделировании комплексов систем, состоящих из различных частей, с различных точек зрения. Если схема архитектуры всех систем комплекса имеет одну и ту же форму, то можно получить категорию описаний архитектуры всего комплекса с помощью произведения. С формальной точки зрения получается, что конструкция категории мультизапятой переводит произведения функторов в произведения категорий, т. е. "ковариантно" зависит от правил представления частей. А именно, для произвольных формы I , множества Q и семейства функторов $F_i^{(q)}: D_i^{(q)} \rightarrow C_q$, $i \in |I|$, $q \in Q$, почленное произведение образующих декартовых квадратов для каждой мультизапятой $\Downarrow_I F^{(q)}$ приводит к следующему изоморфизму:

$$\Downarrow_I (\prod_{q \in Q} F_i^{(q)}: \prod_{q \in Q} D_i^{(q)} \rightarrow \prod_{q \in Q} C_q, i \in |I|) \cong \prod_{q \in Q} \Downarrow_I F^{(q)}.$$

Аналогично, для произвольной малой категории J путем почленного возведения образующего декартова квадрата в степень J проверяется следующее соотношение, демонстрирующее конструкцию мультизапятой в пространстве диаграмм фиксированной формы:

$$\Downarrow_I (F_i^J: D_i^J \rightarrow C^J, i \in |I|) \cong (\Downarrow_I F)^J.$$

Заключение

Интеллектуальное управление РЭР с помощью цифровой платформы, обеспечивающей широкое внедрение технологий Индустрии 4.0, позволяет существенно ускорить развитие распределенной энергетики. В настоящее время разрабатывается такая платформа на базе ЦД, следуя подходам, предложенным в настоящей работе. Идут первоочередные пилотные проекты по управлению РЭР с помощью платформы; формируется экосистема платформы.

Список литературы

1. **Xue A.** et al. Review and prospect of research on subsynchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation // *Electric Power Automation Equipment*. 2020. Vol. 40, N. 09. P. 118–128.
2. **Sharma A.** et al. Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions // *arXiv*, 2020. <https://arxiv.org/abs/2011.02833>.
3. **Kloppenborg S., Boekelo M.** Digital platforms and the future of energy provisioning: Promises and perils for the next phase of the energy transition // *Energy Research & Social Science*. 2019. Vol. 49. P. 68–73.
4. **Илюшин П. В.** и др. Методы интеллектуального управления распределенными энергоресурсами на базе цифровой платформы. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2021. 116 с. [Библиотека электротехника, приложение к журналу "Энергетик". Вып. 8 (272)].
5. **Madni A. M., Madni C. C., Lucero S. D.** Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering // *Systems*. 2019. Vol. 7, Iss. 1. Art. N. 7. P. 1–13.
6. **Onile A. E.** et al. Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 997–1015.
7. **Palensky P.** et al. Digital twins and their use in future power systems // *Digital Twin*. 2021. Vol. 1:4. doi:10.12688/digitaltwin.17435.1.
8. **Ковалёв С. П.** Системный анализ жизненного цикла больших информационно-управляющих систем // *Автоматика и телемеханика*. 2013. № 9. С. 98–118.
9. **Андрюшкевич С. К., Ковалев С. П., Нефедов Е. И.** Разработка цифрового двойника энергетической системы на основе онтологической модели // *Автоматизация в промышленности*. 2020. № 1. С. 51–56.
10. **Ковалёв С. П.** Проектирование гетерогенных киберфизических систем с применением теории категорий // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022. Т. 23, № 2. С. 59–67.
11. **Steindl G., Kastner W.** Semantic microservice framework for digital twins // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 5633.
12. **Steindl G.** et al. Generic digital twin architecture for industrial energy systems // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 8903.
13. **Тихонов А. И.** и др. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и 2D-моделей магнитного поля // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020. № 1 (29). С. 76–82.
14. **Cioara T.** et al. An overview of digital twins application domains in smart energy grid // *arXiv*, 2021. <https://arxiv.org/abs/2104.07904>.
15. **Kuehn W.** Digital twins for decision making in complex production and logistic enterprises // *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2018. Vol. 13, Iss. 3. P. 260–271.
16. **Harmouch F. Z.** et al. An optimal energy management system for real-time operation of multiagent-based microgrids using a T-cell algorithm // *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 3004.
17. **Pagnier L., Chertkov M.** Physics-informed graphical neural network for parameter & state estimations in power systems // *arXiv*, 2021. <https://arxiv.org/abs/2102.06349>.
18. **Ньюмен С.** Создание микросервисов. СПб: Питер, 2016. 304 с.
19. **Mabrok M. A., Ryan M. J.** Category theory as a formal mathematical foundation for model-based systems engineering // *Applied Mathematics and Information Sciences*. 2017. Vol. 11, Iss. 1. P. 43–51.
20. **Spivak D., Kent R.** Ologs: A categorical framework for knowledge representation // *PloS one*, 2012. Vol. 7. P. e24274.
21. **Nolan J. S.** et al. Compositional models for power systems // *EPTCS*. 2020. Vol. 323. P. 149–160.
22. **Pratt V. R.** Modeling concurrency with partial orders // *International Journal of Parallel Programming*. 1986. Vol. 15, N. 1. P. 33–71.
23. **Ковалёв С. П.** Семантика аспектно-ориентированного моделирования данных и процессов // *Информатика и ее применения*. 2013. Т. 7, Вып. 3. С. 70–80.
24. **Ковалёв С. П.** Методы теории категорий в цифровом проектировании гетерогенных киберфизических систем // *Информатика и ее применения*. 2021. Т. 15, Вып. 1. С. 23–29.
25. **Adámek J., Herrlich H., Strecker G. E.** Abstract and concrete categories. New York, USA: John Wiley, 1990. 507 p.

Development of a Platform for Distributed Energy Resources Management on the Basis of a Digital Twin

S. P. Kovalyov, kovalyov@sibnet.ru,

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author: Kovalyov Serge P., Dr., Lead Scientist of V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, 117997, Russian Federation, e-mail: kovalyov@sibnet.ru

Accepted on November 16, 2022

Abstract

The paper discusses the development of a platform for distributed energy resources management based on digital twins. The platform use cases include demand response, electric vehicle charging, peer-to-peer energy trading, storage scheduling, virtual power plant, and so on. Thanks to the digital twin, the platform can perform the use cases controlling either real operation-stage equipment or virtual design-stage simulation models. The platform offers mass distributed energy resources owners and operators to improve the power supply quality (including stability), reduce costs (including transaction overhead), and gain emerging market opportunities (including participation in various aggregators' programs). Software and equipment vendors are interested in the platform's capability to quickly assemble distributed energy management systems almost without programming. The digital twin and the platform are designed with the viewpoint-based approach established by the international systems engineering standard ISO/IEC/IEEE 42010. The typical power system digital twin architecture is described. The major kinds of mathematical models as part of digital twins are presented: physical models based on numerical solutions of differential equations and optimization problems, machine learning models, knowledge-based models. The interoperability of such heterogeneous models is ensured on the basis of the ontological model of distributed energy. The platform architecture is represented from three key viewpoints: functional, information, and software. To formalize

and ultimately automate the integration of heterogeneous models, we propose novel mathematical methods of model-based system engineering based on category theory, including universal constructions and the multicomma. The multicomma category is shown to be constructed using standard product, exponent, and pushout constructions, which makes it possible to establish a number of its practically significant properties.

Keywords: distributed energy resources, digital twin, digital platform, architecture viewpoint, category theory, multicomma category

For citation:

Kovalyov S. P. Development of a Platform for Distributed Energy Resources Management on the Basis of a Digital Twin, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 3, pp. 131–141.

DOI: 10.17587/mau.24.131-141

References

1. **Xue A.** et al. Review and prospect of research on subsynchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation, *Electric Power Automation Equipment*, 2020, vol. 40, no. 09, pp. 118–128.

2. **Sharma A.** et al. Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions, *arXiv*, 2020, available at: <https://arxiv.org/abs/2011.02833>.

3. **Kloppenborg S., Boekelo M.** Digital platforms and the future of energy provisioning: Promises and perils for the next phase of the energy transition, *Energy Research & Social Science*, 2019, vol. 49, pp. 68–73.

4. **Ilyushin P. V.** et al. Smart control of distributed energy resources on the basis of the digital platform, Moscow, Company "Energoprogress", 2021, [Bibliotekha Elektrotekhnika, iss. 8 (272)] (in Russian).

5. **Madni A. M., Madni C. C., Lucero S. D.** Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering, *Systems*, 2019, vol. 7, no 1, art. no. 7, pp. 1–13.

6. **Onile A. E.** et al. Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review, *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 997–1015.

7. **Palensky P.** et al. Digital twins and their use in future power systems, *Digital Twin*, 2021, vol. 1:4, doi:10.12688/digitaltwin.17435.1.

8. **Kovalev S. P.** Systems analysis of life cycle of large-scale information-control systems, *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 9, pp. 1510–1524 (in Russian).

9. **Andryushkevich S. K., Kovalyov S. P., Nefedov E.** Development of a power system digital twin based on an ontological model, *Automation in Industry*, 2020, no. 1, pp. 51–56 (in Russian).

10. **Kovalyov S. P.** Design of heterogeneous cyber-physical systems employing category theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 59–67 (in Russian).

11. **Steindl G., Kastner W.** Semantic microservice framework for digital twins, *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, pp. 5633.

12. **Steindl G.** et al. Generic digital twin architecture for industrial energy systems, *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, pp. 8903.

13. **Tikhonov A. I.** et al. Development of technology for creating digital twins of power transformers based on chain and 2D magnetic field models, *South-Siberian Scientific Bulletin*, 2020, vol. 29, pp. 76–82 (in Russian).

14. **Cioara T.** et al. An overview of digital twins application domains in smart energy grid, *arXiv*, 2021, available at: <https://arxiv.org/abs/2104.07904>.

15. **Kuehn W.** Digital twins for decision making in complex production and logistic enterprises, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 260–271.

16. **Harmouch F. Z.** et al. An optimal energy management system for real-time operation of multiagent-based microgrids using a T-cell algorithm, *Energies*, 2019, vol. 12, pp. 3004.

17. **Pagnier L., Chertkov M.** Physics-informed graphical neural network for parameter & state estimations in power systems, *arXiv*, 2021, available at: <https://arxiv.org/abs/2102.06349>.

18. **Newman S.** Building microservices: Designing fine-grained systems, Sebastopol, USA, O'Reilly, 2016.

19. **Mabrok M. A., Ryan M. J.** Category theory as a formal mathematical foundation for model-based systems engineering, *Applied Mathematics and Information Sciences*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 43–51.

20. **Spivak D., Kent R.** Ologs: A categorical framework for knowledge representation, *PloS one*, 2012, vol. 7, pp. e24274.

21. **Nolan J. S.** et al. Compositional models for power systems, *EPTCS*, 2020, vol. 323, pp. 149–160.

22. **Pratt V. R.** Modeling concurrency with partial orders, *International Journal of Parallel Programming*, 1986, vol. 15, no. 1, pp. 33–71.

23. **Kovalyov S. P.** Semantics of aspect-oriented modeling of data and processes, *Informatics and Applications*, 2013, vol. 7, no. 3, pp. 70–80 (in Russian).

24. **Kovalyov S. P.** Methods of the category theory in digital design of heterogeneous cyber-physical systems, *Informatics and Applications*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 23–29 (in Russian).

25. **Adámek J., Herrlich H., Strecker G. E.** Abstract and concrete categories, New York, John Wiley, 1990.