

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Гребенюк Г.Г., Калянов Г.Н., Ковалёв С.П., Крыгин А.А., Лукинова О.В.,
Никишов С.М.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

grebenuk@lab49.ru, kalyanov@ipu.ru, kovalyov@sibnet.ru, akrygin@lab49.ru, lobars@mail.ru,
nikishov@lab49.ru

Аннотация: Рассматривается цифровой двойник (ЦД) организационно-технологического объекта крупномасштабной инфраструктуры, как ключевой компонент автоматизированной системы управления объектом. Очерчена предметная область ЦД посредством онтологической модели. Предложены методы повышения эффективности и безопасности функционирования технологической инфраструктуры на базе ЦД.

Ключевые слова: цифровой двойник, технологическая инфраструктура, реконфигурация сетей, техническое обслуживание и ремонт, безопасность функционирования инфраструктуры.

Введение

ЦД – это цифровая копия физического объекта, достоверно воспроизводящая и задающая состояние и поведение оригинала в том или ином контексте [1]. В рамках парадигмы Индустрии 4.0 ЦД выступает ключевым компонентом автоматизированной системы управления объектом, обеспечивая двунаправленную связь между физическим и цифровым миром в (мягком) реальном времени.

Изначально ЦД разрабатывались для изделий машиностроения, для которых характерны локализованные в пространстве и времени физические процессы с непосредственно измеряемыми характеристиками и практически прямым последствием. Значительно труднее создать ЦД для крупномасштабной технологической инфраструктуры, такой как распределительная сеть ресурсоснабжения, поскольку ей присущи длительные многошаговые процессы, затрагивающие широко распределенные совокупности разнородных объектов и подверженные влиянию скрытых технических, социальных и экономических факторов. Относительно невысоок и уровень ИТ-оснащения распределительных сетей: не хватает мощных дорогостоящих информационно-аналитических систем моделирования энергоснабжения и высококвалифицированного персонала для работы с ними, имеются пробелы в охвате инфраструктуры цифровыми приборами для измерения и управления, часто происходят задержки и потери при сборе данных.

Подходы к созданию ЦД технологической инфраструктуры, направленные на преодоление этих проблем, представлены в настоящем докладе. Чтобы очертить предметную область ЦД, обеспечить единство структур данных и исключить разночтения в именовании и интерпретации понятий, которыми оперирует ЦД, в его основу помещается онтологическая модель. Потребности и ответственности субъектов, эксплуатирующих инфраструктуру, описываются посредством функциональной модели. Подробно рассмотрены эффективные в применении методы решения следующих практически значимых задач управления, специфических для технологической инфраструктуры, на базе ЦД:

- минимизация затрат на техническое обслуживание и ремонт тепловых сетей на основе анализа статистики ремонтов;
- уменьшение недопоставок энергии при ремонтах участков и увеличение устойчивости путем реконфигурации распределительных энергетических сетей;
- повышение безопасности функционирования сетевой инфраструктуры на основе выявления множеств минимальных отказов.

1 Архитектура цифрового двойника объекта технологической инфраструктуры

С точки зрения архитектуры, ЦД представляет собой интегрированный комплекс цифровых моделей, способных достоверно отображать состояние оригинала в реальном времени, прогнозировать его поведение в штатных и нештатных условиях, порождать адекватные управляющие воздействия на него. В целях обеспечения удобного доступа к моделям в составе ЦД их часто оформляют как (микро)сервисы. Сервисная архитектура, скрывающая детали реализации моделей, особенно удобна для применения в сетевых технологических инфраструктурах с распределенным управлением, в том числе децентрализованным.

В литературе описаны разные подходы к архитектурной декомпозиции ЦД [1]. 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. В настоящем докладе, чтобы наиболее наглядно выделить специфику ЦД как отдельного класса цифровых систем, рассматривается декомпозиция по видам моделей и предметам моделирования. Типичный ЦД объекта технологической инфраструктуры состоит из моделей следующих видов [2]:

- онтологическая модель – формализованный свод понятий и отношений фрагмента предметной области, охваченного создаваемой системой управления;
- цифровые схемы и визуальные формы, такие как принципиальные схемы энергоснабжения; структурные и функциональные модели; планы и 3D-модели размещения инфраструктуры в зданиях и сооружениях; карты расположения технологических объектов на местности;
- 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 объектов, из входящих электронных документов и через формы пользовательского интерфейса для ручного ввода данных;
- математические и имитационные модели, позволяющие оценивать, прогнозировать и оптимизировать потоки энергоносителей, режимы и переходные процессы, техническое состояние оборудования и ремонты, процедуры модернизации инфраструктуры.

В ходе функционирования объекта модели интенсивно взаимодействуют как с внешними источниками и получателями данных, так и друг с другом, в том числе в режиме циклов с обратной связью, направленных на повышение достоверности ЦД. В число вариантов использования каждой модели при взаимодействии с другими входят предоставление данных другим моделям, ссылочная привязка данных других моделей, верификация данных, а также генерация структуры моделей, как показано на рис. 1 [2].

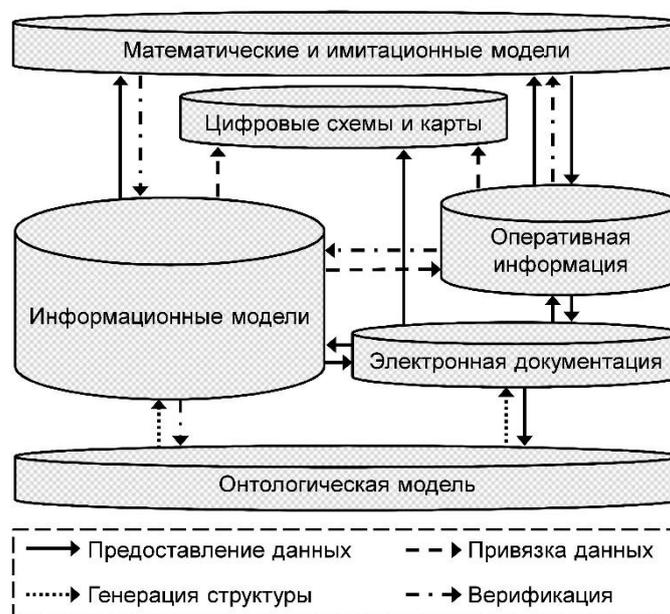


Рис. 1. Архитектура цифрового двойника

Для крупномасштабных объектов высокой трудоемкостью обладает сборка целостного цифрового двойника из двойников составляющих. По существу, требуется воспроизвести на цифровых моделях процесс строительства технологической инфраструктуры. Существует перспективный подход к решению этой проблемы на базе теории категорий – математического аппарата модельно-ориентированной системной инженерии [3]. Структурная схема инфраструктуры представляется

диаграммой в категории, объектами которой служат алгебраические представления моделей системных единиц, а морфизмы описывают действия по сборке моделей систем из моделей составляющих. Для этой диаграммы вычисляется универсальная конструкция копредела (colimit) – алгебраического аналога сборки системы. Копредел дает возможность строго рассчитывать интегральные характеристики и поведение инфраструктуры по информации о ее составляющих. Аппарат теории категорий также позволяет решать ряд обратных задач – вычислять структурные схемы, обеспечивающие достижение (суб-, Парето-)оптимальных значений интегральных характеристик. Тем самым открывается возможность решать задачи типа порождающего проектирования в энергетике.

2 Подходы к формированию цифрового двойника

Процесс разработки ЦД естественным образом начинается с выбора/составления подходящей онтологии: выявляются используемые понятия и описываются в виде формализованных семантических моделей. Существенно, чтобы онтология содержала все основные понятия фрагмента предметной области, охваченного создаваемой системой управления, и эти понятия не противоречили друг другу. В то же время, онтология не должна быть перегружена неиспользуемыми понятиями.

Подготовленная онтология (полу)автоматически преобразуется в структуру реляционной базы данных информационной модели: онтологические понятия превращаются в таблицы, свойства – в атрибуты, отношения – во внешние ключи, экземпляры – в записи (в т.ч. справочников), аксиомы – в правила проверки наполнения [4]. Затем информационная модель заполняется мастер-данными объекта вместе с электронной документацией и цифровыми схемами. Если объект уже построен и введен в эксплуатацию, то нужные данные извлекаются из эксплуатационной документации на него и верифицируются натурным обследованием. В противном случае, данные формируются в ходе проектирования и строительства объекта, в том числе при помощи инструментов класса САПР. По мере готовности информационной модели разворачиваются, настраиваются и тестируются на ней математические и имитационные модели. Модели машинного обучения обучаются на доступных исторических и/или референтных наборах данных. Затем к ЦД присоединяются источники и получатели данных, в том числе (мягкого) реального времени, и начинается функционирование ЦД, включающее постоянное поступление новой оперативной информации, расчет всевозможных показателей, верификацию и корректировку других данных. По мере необходимости модели ЦД и смежные системы модернизируются, добавляются новые, отключаются утратившие актуальность.

Критерием завершения основного цикла работ по формированию ЦД является достижение значений показателей качества, достаточных для его применения как ядра информационного и математического обеспечения создаваемой системы управления. Выделяются следующие показатели (требования) качества ЦД [5]: интерактивность, достоверность, удобство использования (эргономичность), защищенность (в контексте кибербезопасности), удобство развертывания (в том числе переносимость между различными ИТ-платформами), актуальность (синхронность с динамикой оригинала). Многие из них применимы и к цифровым системам других классов; для ЦД наиболее специфичны достоверность и актуальность. В дополнение к ним, к информационному обеспечению ЦД целесообразно предъявить требования по полноте представления объекта и по взаимной непротиворечивости различных аспектов его представления. Полнота и непротиворечивость оцениваются в первую очередь по онтологической модели, достоверность – по схемам, информационным и математическим моделям, а актуальность – по документации и оперативной информации.

3 Онтологическая модель технологической инфраструктуры

Идеальная онтологическая модель представляет собой структурно-функциональный цифровой образ объекта, представляющий не только его статический облик, но и динамику. Для задач управления технологической инфраструктурой, рассматриваемых в настоящем докладе, разработана альфа-версия онтологии, позволяющая достичь следующие цели:

- обеспечение общей терминологией специалистов, работающих в разных предметных областях, для совместного использования моделей ЦД;
- обеспечение разработчиков систем управления сведениями о наличии/отсутствии моделей, методов, алгоритмов в составе ЦД (оглавление);
- представление логической схемы информационной модели в составе ЦД.

Под онтологией понимается эксплицитная спецификация концептуализации предметной области [6]. В формализме семантических сетей, структура онтологии представляется кортежем $O = \langle O_B, O_{Ci} \rangle$, где O_B – онтология верхнего уровня (родовые классы), O_{Ci} – детализирующие ее онтологии нижнего уровня. Каждая из онтологий описывается формализмом $O = \langle C, R, F, P \rangle$, где:

$C = \{C_1, \dots, C_n\}$ – конечное непустое множество понятий предметных классов,

$C = C_{TP} \cup C_{Attr} \cup C_V \cup C_A$;

C_{TP} – конечное множество понятий, составляющих таксономию по отношениям партономии и родовидовым;

C_{Attr} – конечное множество атрибутов, т.е. характеристик понятий предметной области;

C_V – конечное множество возможных значений (для означивания атрибутов);

C_A – конечное множество понятий, не вошедших в остальные группы, но вступающих в функциональные отношения или отношения ассоциации;

$R = \{R_1, \dots, R_m\}$ – конечное множество отношений, $R_i \subseteq C \times C$, $R = R_T \cup R_P \cup R_A \cup R_{Attr} \cup R_V$;

R_T – родовидовые отношения «класс–подкласс», задающие таксономию на множестве понятий C (антисимметричные, транзитивные, нереклексивные бинарные отношения наследования понятий);

R_P – отношения партономии «часть–целое», транзитивные, и также обладающие свойством наследования;

R_A – отношения ассоциации, т.е. конечное множество наследуемых отношений между понятиями, которые отражают специфику предметных классов;

R_{Attr} – наследуемые отношения назначения атрибутов понятиям;

R_V – отношения присваивания значений атрибутам;

F – конечное множество описательных интерпретаций понятий;

P – конечное множество аксиом и правил, определяющих семантику понятий и отношений.

Ни различные группы понятий, ни различные группы отношений попарно не пересекаются. Взаимосвязь понятий и отношений онтологий описывается следующим образом: любое отношение из групп R_T и R_P является подмножеством в $C_{TP} \times C_{TP}$, из R_A – в $(C_{TP} \cup C_A) \times (C_{TP} \cup C_A)$, из R_{Attr} – в $C_{TP} \times C_{Attr}$, из R_V – в $C_{Attr} \times C_V$.

На верхний уровень онтологии O_B вынесены концепты $C_{TP} = \{\{\text{Процесс}\}, \{\text{Субъект}\}, \{\text{Ресурс}\}, \{\text{Событие}\}, \{\text{Информационно-математическое обеспечение (ИМО)}\}\}$, между которыми введены ролевые отношения ассоциации $R_A = \{\{\text{Триггер}\}, \{\text{Актор}\}, \{\text{Объект}\}, \{\text{Формализованное представление}\}\}$, как показано на рис. 2.

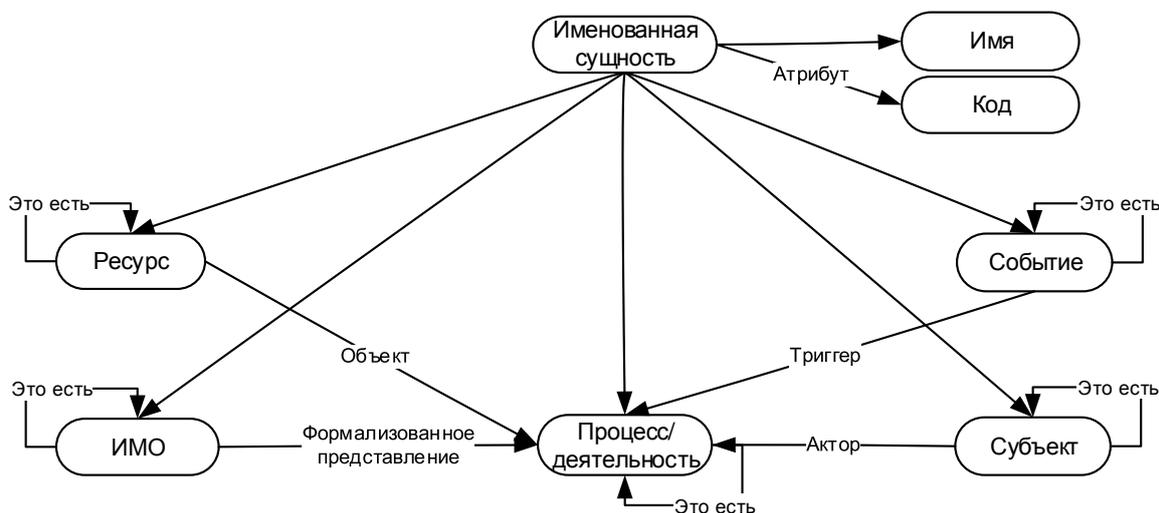


Рис. 2. Онтология верхнего уровня O_B

Кроме того, в онтологии O_B присутствуют атрибуты $C_{Attr} = \{\{\text{Имя}\}, \{\text{Код}\}\}$, ассоциированные с атрибутивными отношениями. Эти атрибуты предназначены для идентификации экземпляров понятий – сущностей логической схемы информационной модели объекта.

Указанные концепты верхнего уровня порождают иерархии вида «класс–подкласс», что подчеркивается транзитивным отношением $\{\text{Это есть}\}$. Подклассы концептов составляют онтологии O_{Ci} , наполнение которых извлекается из письменных источников предметной области: стандартов, справочников, документации, баз данных и т. д. Например, для электрических сетей широкий спектр

релевантных понятий представлен в стандартах IEC 61968, 61970, 62325 CIM (Common Information Model). Для ЦД онтологии O_{ci} сформированы из соображений полноты и непротиворечивости:

1. $\{Процесс\}$ – деятельность, как частный случай активности, источником которой является сознательная воля субъекта, продиктованная его интересами. Представлен двумя классами процессов: исполнительными в части технического обслуживания и ремонта участков теплопровода, реконфигурации и резервирования сетей, а также управленческими в части планирования исполнительных процессов на разные горизонты по времени.

2. $\{Субъект\}$ – актер, обладающий собственными интересами и возможностями для их реализации. Представлен понятиями $\{Конечные потребители\}$, $\{Ресурсоснабжающие организации\}$ и другими. Является инициатором и исполнителем процессов.

3. $\{Ресурс\}$ – родовой концепт для оборудования различных видов (подкласс $\{Единицы оборудования\}$) и технологических объектов генерации / потребления / распределения энергии, на которых оборудование устанавливается (подкласс $\{Технологические объекты\}$). Каждый подкласс является корнем сложной таксономии с разнообразными характеристиками элементов. Ресурс является объектом процесса (в том смысле, что в ходе процессов изменяются состояния ресурсов).

4. $\{Событие\}$ – момент времени, который фиксирует то, что происходит с сущностями $\{Процесс\}$ и $\{Ресурс\}$. Является триггером функционирования процесса.

5. $\{Информационно-математическое обеспечение (ИМО)\}$ – сущность, которая хранит информацию о нормативно-справочных документах, математических моделях, методах и программных комплексах управления инфраструктурой.

Онтологические аксиомы (множество P) записаны в логике предикатов, а множество F состоит из описательных интерпретаций, взаимно-однозначно соответствующих словарю онтологии.

4 Функциональная модель

Основным субъектом, заинтересованным в применении рассматриваемых методов, является ресурсоснабжающая организация (РСО). Поэтому в состав ЦД включена функциональная модель РСО в виде иерархии диаграмм потоков данных [7]. Верхний (контекстный) уровень модели описывает информационные взаимодействия РСО с другими субъектами, такими как управляющие компании, надзорные органы и др. На следующих уровнях детализируются процессы служб РСО, в частности, сетевой службы и инженерной службы. В качестве основных процессов этих служб рассматриваются поддержка сетей в рабочем состоянии и ремонт сетей: для повышения их эффективности предназначены методы, изложенные в последующих разделах доклада. Иерархия функций этих процессов на примере теплоснабжающей РСО приведена на рис. 3. На рис. 4 показана диаграмма процессов среднего и капитального ремонта сети.

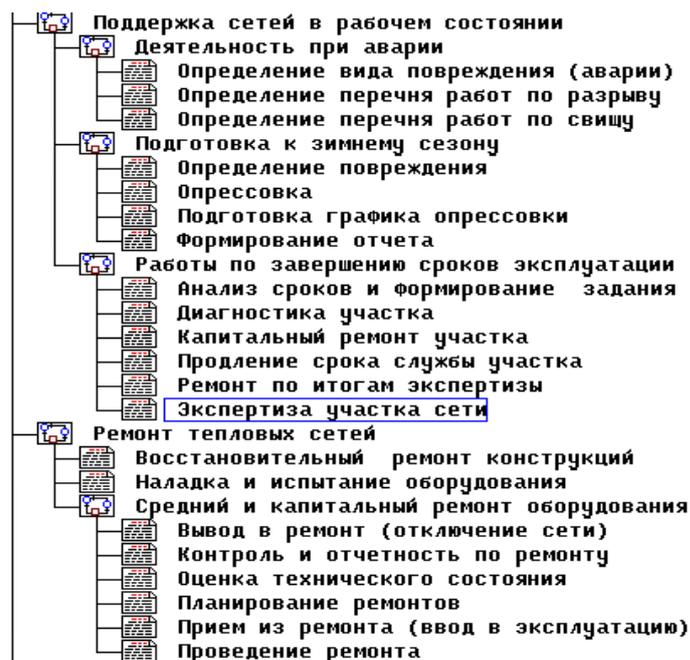


Рис. 3. Иерархия функций процессов РСО

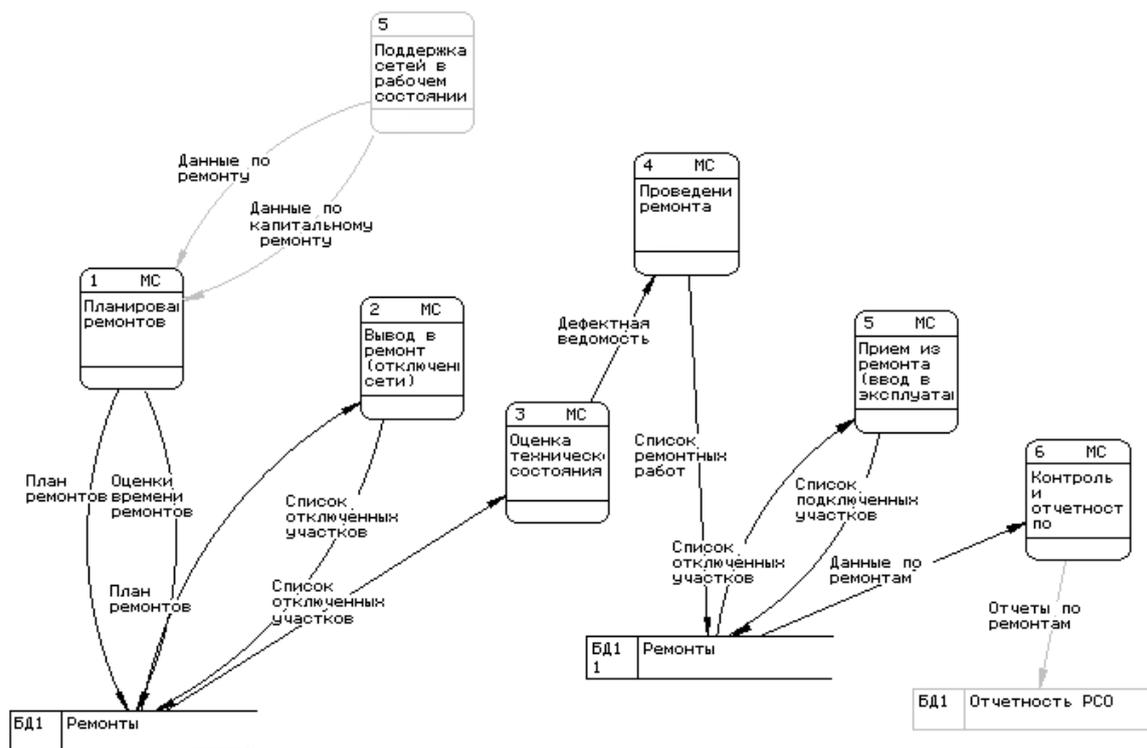


Рис. 4. Диаграмма процессов ремонта сети

5 Статистические методы минимизации стоимости ремонтов тепловых сетей

На базе ЦД реализуются расчетно-аналитические модели и методы информационной поддержки процесса планирования ремонтных работ участков тепловой сети, предназначенные для решения двух задач:

- оценка оптимального времени капитального ремонта (замены) участка сети;
- оценка комплексного показателя состояния участка сети.

В работе [8] предложена методика оценки оптимального времени капитального ремонта, базирующаяся на нахождении функции $S(T)$ – зависимости общих затрат на обслуживание участка от времени проведения капитального ремонта T . (включая затраты на проведение капитального ремонта). Момент времени $T = 0$ соответствует моменту ввода участка в эксплуатацию.

Оптимальное время проведения капитального ремонта T_0 определялось как момент времени, в который функция общих удельных затрат $S_y(T) = S(T)/T$ достигает минимума. Для предложенной в [8] математической модели было показано существование и единственность такого T_0 . Однако в этой модели не учитывались в полной мере особенности эксплуатации конкретных инженерных сетей. Поэтому при применении на практике предложенного подхода, возникла необходимость провести следующий ряд дополнительных исследований, которые, благодаря собранным статистическим данным, выполнены на примере реальной теплосети:

- анализ этапов жизненного цикла участка;
- моделирование потока повреждений с помощью вероятностного распределения;
- построение функции $S(T)$;
- определение комплексного технико-экономического показателя состояния участка и оптимального времени его замены с помощью полученной функции $S(T)$.

Жизненный цикл участка состоит из трех повторяющихся этапов: диагностики, летней и зимней эксплуатации, и завершается капитальным ремонтом. В функции $S(T)$ необходимо учесть затраты на перечисленных этапах. В табл. 1 приведены виды затрат на каждом этапе.

Таким образом, для построения функции $S(T)$ необходимо по имеющейся статистике повреждений спрогнозировать зависимость от времени для следующих величин: общее количество повреждений, общее количество ЛВР, общая длина ЛВР, общее количество свищей и разрывов, произошедших в период зимней эксплуатации. В рамках ЦД, статистика повреждений накапливается в журнале событий в составе оперативной информации, а алгоритмы прогнозирования величин и вычисления функции $S(T)$ образуют соответствующую математическую модель.

Таблица 1. Виды затрат на каждом этапе жизненного цикла

№ п/п	Этап жизненного цикла	Виды затрат на этапе
1	Диагностика	Затраты на различные виды контактной и бесконтактной диагностики
2	Летняя эксплуатация	Затраты на проведение ремонтных работ повреждений, выявленных на этапе диагностики: ремонт разрывов, свищей, проведение локально-вставочного ремонта (ЛВР)
3	Зимняя эксплуатация	Затраты на проведение ремонтных работ повреждений, которые не были выявлены на этапе диагностики

Анализ статистики показал, что вероятность возникновения аварии на теплопроводах описывается распределением Вейбулла достаточно точно, и графики зависимости общего количества повреждений, общего количества ЛВР и общей длины ЛВР от времени, построенные в логарифмических шкалах, хорошо аппроксимируются прямой линией. Для ряда участков с существенными отклонениями от прямой выявлены причины отклонений. В результате построены алгоритмы предварительной фильтрации точек и аппроксимации всех зависимостей, необходимых для вычисления $S(T)$.

Например, для одного из реально существующих участков теплопровода зависимость удельных затрат от времени $S_y(T)$, где T измеряется в годах, $S_y(T)$ – в руб./год, выглядит следующим образом:

$$S_y(T) = \frac{77484070 + 32625 \cdot T + 73.86 \cdot T^{4.05} + 11704 \cdot T^{2.24} - 14 \cdot T^{3.08} - 13.11 \cdot T^{3.75}}{T}$$

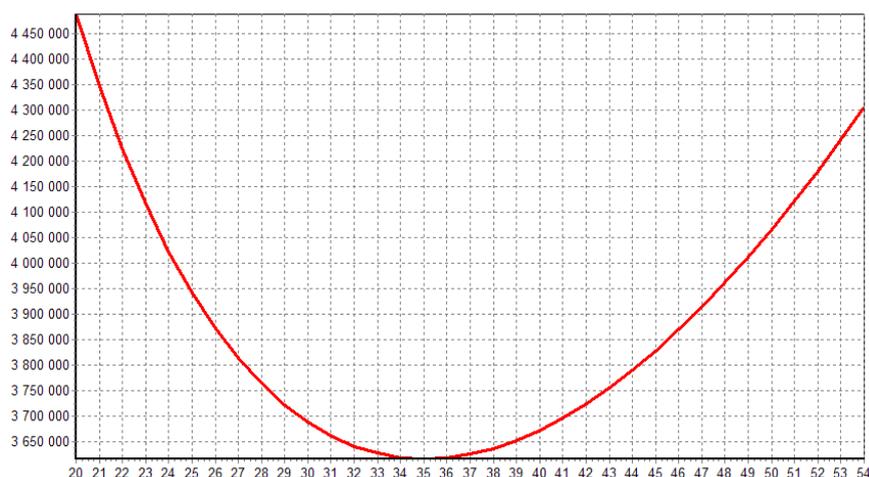


Рис. 5. График зависимости удельных затрат от времени замены участка

На рис. 5 показан график этой зависимости. Из него видно, что минимум функции $S_y(T)$ достигается при $T_0 = 35$.

Комплексный показатель состояния участка $\omega = \omega(T)$ вычисляется по следующей формуле:

$$\omega(T) = \begin{cases} 1, & T < T_0 \\ \frac{S_y(T_0)}{S_y(T)}, & T \geq T_0 \end{cases}$$

Этот показатель имеет следующий физический смысл: при $\omega(T) < 1$ величина $1/\omega(T)$ показывает, во сколько раз больше расходуется средств на обслуживание участка, если его заменить в момент T , по сравнению с его заменой в оптимальный момент T_0 .

6 Методы реконфигурации сетей на основе предельных графов

На базе ЦД также реализуется ряд математических методов управления технологической инфраструктурой, основанных на графовой модели сети ресурсоснабжения. Сеть описывается ориентированным графом, вершинами которого служат технологические объекты и единицы оборудования (т.е. подклассы онтологического класса верхнего уровня $\{Ресурс\}$), а ребра представляют физические соединения в рамках сети. Согласно онтологической иерархии подклассов, множество V всех вершин графа разбивается на четыре попарно непересекающихся множества

(типа): $V = S \cup P \cup C \cup U$, где S – множество объектов генерации, P – множество объектов потребления, C – множество коммутаторов (запорно-регулирующая арматура, коммутационные аппараты), U – множество всех остальных вершин. Основные задачи управления сетью направлены на поддержание (суб)оптимальных, по тем или иным критериям, потоков энергоносителей от вершин типа S к вершинам типа P .

К числу управляющих воздействий, оказываемых на сеть, относятся реконфигурации – переключения состояний вершин типа C . Конфигурация сети задается разбиением $C = C^+ \cup C^-$, где C^+ – множество открытых коммутаторов, пропускающих поток энергоносителя через себя, C^- – множество закрытых коммутаторов, перекрывающих поток. Реконфигурация – это последовательность переносов вершин типа C из множества C^+ в C^- и наоборот, переводящая исходную конфигурацию в целевую. Графом конфигурации называется подграф графа сети, полученный путем исключения множества вершин C^- и инцидентных к ним ребер. Граф конфигурации называется разрешающим, если в нем в каждую вершину типа P существует путь хотя бы из одной вершины типа S ; разрешающий граф конфигурации называется предельным, если ни один его собственный подграф конфигурации уже не является разрешающим. Разработан алгоритм нахождения множества всех предельных графов, которые можно получить путем реконфигураций заданного графа сети. Также разработан алгоритм, который для заданного целевого предельного графа и заданной исходной конфигурации сети определяет вариант реконфигурации с минимальным количеством переключений.

Например, перед проведением ремонтных работ тепловой сети (как аварийных, так и плановых), необходимо отключить ремонтируемый объект от теплосети. При этом некоторые объекты потребления могут остаться без теплоснабжения. Ввиду наличия резервных путей передачи тепловой энергии, часто возможна реконфигурация сети, обеспечивающая теплоснабжение по временной схеме на период проведения ремонтных работ. Здесь требуется найти вариант (варианты) реконфигурации, удовлетворяющий следующим оптимизационным критериям (в порядке убывания приоритета) [9]:

- количество объектов потребления, оставшихся без теплоснабжения, минимально;
- суммарная по всем объектам генерации недопоставка тепловой энергии (разность между генерируемой мощностью и нужной потребителям мощностью) минимальна по абсолютной величине;
- количество переключений запорно-регулирующей арматуры (относительно конфигурации сети, непосредственно предшествующей ремонту) минимально.

Метод решения этой задачи состоит из следующих шагов:

1. Исключение из графа сети вершины, соответствующей ремонтируемому объекту, всех ближайших к ней вершин типа C , и инцидентных им ребер. Исключение из полученного графа всех вершин типа P , к которым не существует пути ни из одной вершины типа S , и инцидентных им ребер.

2. Нахождение для полученного графа множества всех предельных графов, которые можно получить путем реконфигураций. Расчет недопоставки тепловой энергии для каждого графа из этого множества. Выбор одного или нескольких предельных графов с минимальным значением недопоставки.

3. Нахождение вариантов реконфигурации с минимальным количеством переключений для каждого из выбранных предельных графов.

Преимуществом данного метода является существенное сокращение количества анализируемых вариантов реконфигурации сети по сравнению с прямым перебором.

Рассмотрим пример реконфигурации теплосети, граф которой изображен на рис. 6 вместе с состояниями элементов запорно-регулирующей арматуры (вершин типа C), задающими исходную конфигурацию. Предположим, что проводятся ремонтные работы на объекте, обозначенном вершиной $U16$. На шаге 1 вышеописанного метода необходимо удалить из графа вершины $U16$, $C7$, $C8$, $C11$, $C13$. Кроме того, из графа удаляется вершина $P6$, поскольку она, в отличие от всех остальных вершин типа P , теперь недостижима ни из одной вершины типа S . Путем реконфигураций получившегося графа можно получить ровно три различных предельных графа. У двух из них недопоставка тепловой энергии равна нулю. Один из предельных графов с нулевой недопоставкой можно получить, выполнив всего два переключения: это перевод в состояние «открыто» вершин коммутаторов $C9$ и $C12$. Легко проверить, что так получается оптимальный (минимальный по количеству переключений) вариант реконфигурации при ремонте объекта $U16$: он состоит в переводе в состояние «закрыто» элементов запорно-регулирующей арматуры, соответствующих вершинам $C7$,

C8, C13, а в состояние «открыто» – элементов C9 и C12. В результате такой реконфигурации в сети устанавливаются пути доставки теплоносителя от объектов генерации к объектам потребления, показанные на рис. 6 жирными линиями.

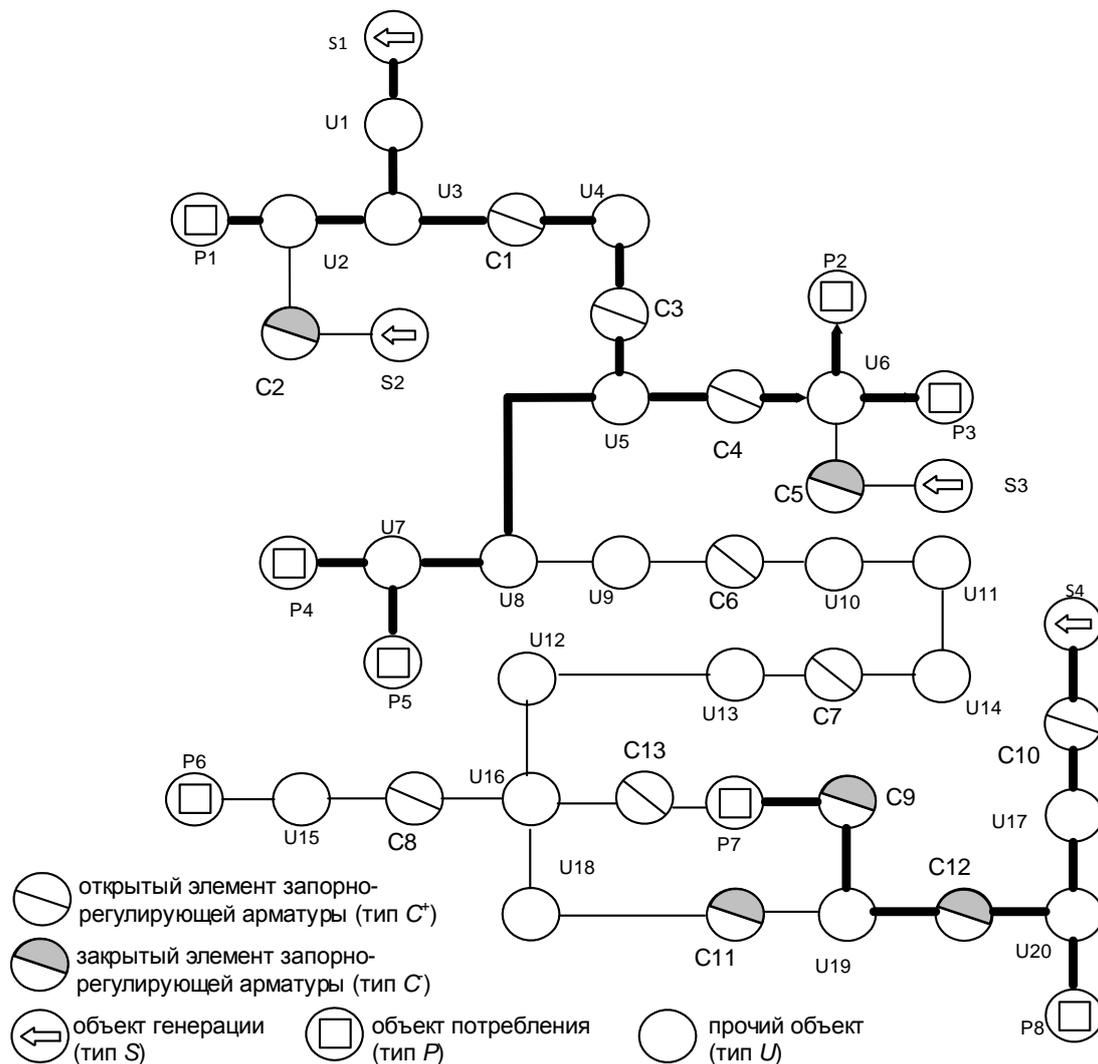


Рис. 6. Пример графа теплосети

Задачи реконфигурации актуальны также для распределительных электрических сетей [10]. Во многих исследованиях по структурной оптимизации, в качестве оптимальной конфигурации сети в нормальном режиме принимается конфигурация, обладающая наибольшей устойчивостью по напряжению, оцениваемой с использованием индекса устойчивости по напряжению VSI (voltage stability index) [11]. Для расчета этого индекса выполняется моделирование распределения потоков мощности с учетом потерь. Индекс устойчивости L рассчитывается согласно следующей формуле:

$$L = 4 \cdot \sqrt{(P_R^2 + Q_R^2) \cdot (r_{eq}^2 + x_{eq}^2)}.$$

В этом выражении r_{eq} , x_{eq} – эквивалентные активное и реактивное сопротивления сети:

$$r_{eq} = \frac{P_1}{P_S^2 + Q_S^2}, x_{eq} = \frac{Q_1}{P_S^2 + Q_S^2}, \text{ где } P_1, Q_1 \text{ – потери активной и реактивной мощности в}$$

линиях, P_S, Q_S – суммарная активная и реактивная мощность генерации, P_R, Q_R – активная и реактивная мощность принимающей шины эквивалентной двухшинной системы. Чем ближе значение индекса L к единице, тем ближе сеть находится к критической точке, определяющей границу устойчивости по напряжению.

В случае распределительных электрических сетей для моделирования распределения потоков мощности удобен быстрый и простой двухэтапный итерационный процесс (метод обратного/прямого

хода, backward/forward method). На первом этапе находятся потери мощности в передающих линиях начиная от нагрузок шин, расположенных на конце каждого фидера, при заданном начальном распределении напряжений на шинах. На втором этапе для расчета напряжений в узлах (модуля и угла между векторами напряжений) используются значения мощности, рассчитанные на первом этапе. Затем выполняется следующая итерация: повторяется первый этап вычисления потерь при напряжениях, рассчитанных на втором этапе предыдущей итерации, и т.д. Так продолжается до сходимости решения – до момента, когда результат очередной итерации отличается от результата предыдущей менее чем на заданную небольшую величину. Сходимость наступает, как правило, через 2-5 итераций.

При поиске конфигурации заданной распределительной электрической сети, оптимальной с точки зрения устойчивости по напряжению, аналогично оптимизации числа переключений, строится множество всех предельных графов, которые можно получить путем реконфигураций; далее для них рассчитывается индекс VSI. Метод выбора лучшего варианта состоит из следующих шагов:

1. Генерация множества вариантов реконфигурации сети путем построения предельных графов.
2. Моделирование распределения потоков мощности в сети для каждого варианта реконфигурации.
3. Расчет индекса устойчивости VSI для каждого варианта реконфигурации по результатам моделирования потокораспределения.
4. Выбор вариантов, имеющих минимальное значение VSI.

В рамках ЦД, реконфигурации сети задаются в журнале событий в составе оперативной информации как последовательности событий переключения коммутаторов, а алгоритмы построения и анализа графовой модели сети ресурсоснабжения оформляются как математические модели. Эффект, вызванный реконфигурацией, количественно определяется по показаниям счетчиков расхода энергоносителей, входящим в состав оперативной информации.

7 Генетический алгоритм выявления множеств минимальных отказов

Поиск подграфов типа (не)разрешающих в графовой модели актуален также при анализе уязвимости сети, т.е. устойчивости к отказам ее элементов. Анализ уязвимости проводится в целях повышения безопасности функционирования технологической инфраструктуры, которое достигается как путем назначения высокого приоритета процессам поддержки в рабочем состоянии объектов, отказ которых приводит к наибольшему ущербу для ресурсоснабжения, так и путем резервирования – строительства новых объектов, дублирующих такие.

В основе анализа уязвимости лежит выявление минимальных по мощности множеств объектов, одновременный отказ которых приводит к прекращению ресурсоснабжения всех ключевых потребителей, подключенных к рассматриваемой сети. Традиционно для этого используются моделирование физических процессов распределения энергии или методы топологического анализа сети [12]. Эти методы имеют определенные недостатки, связанные со сложностью применения при большой размерности. Поэтому разработан генетический алгоритм на базе графовой модели сети, который, по сравнению с традиционными и переборными, более прост в реализации и требует меньше вычислительных ресурсов.

Генетический алгоритм описывается такими понятиями как особи, популяции, гены и функции приспособленности, которые при анализе уязвимости сетевой инфраструктуры определяются следующим образом.

Особь θ – множество вершин графовой модели сети, обозначающих отказавшие объекты. Мощность особи выбирают по числу одновременно происходящих отказов (одиночные отказы, двойные, тройные и т.д.), влияние которых на инфраструктуру требуется оценить. Особи инициализируются случайными выборками данной мощности из множества V .

Популяция $P = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}$ – конечное множество особей, среди которых производится выбор наилучших. Мощность популяции k фиксирована и определяется размерностью графа сети n (обычно составляет 5-15 % от n).

Ген – любая вершина графа сети.

Функция приспособленности $F(\theta)$ – критерий оценки особи при оптимизации. Поскольку сеть предназначена для доставки энергии потребителям, функцией приспособленности служит количество путей в графе сети, имеющих длину не более заданного максимального значения m и разрывающихся при одновременном отказе всех элементов, входящих в особь. Для вычисления количества путей применяется матрица достижимости $E^* = E \vee E^2 \vee \dots \vee E^m$, где E – матрица смежности графа сети: $E =$

$(e(i, j))_{i, j = 1, \dots, n}$, $e(i, j) = 1$, если в графе имеется ребро, соединяющее вершину i с j , и $e(i, j) = 0$ в противном случае. Количество путей в графе, имеющих длину не более m , равно

$$S(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e^*(i, j).$$

где $e^*(i, j)$ – элементы матрицы достижимости E^* . Для проверки восприимчивости инфраструктуры к отказу особи θ , все строки и столбцы матрицы смежности, соответствующие входящим в θ вершинам, обнуляются. Получается матрица, которую мы обозначим через E_θ . Функция приспособленности задается следующим выражением:

$$F(\theta) = S(E) - S(E_\theta).$$

Был построен генетический алгоритм поиска особей, имеющих максимальное значение данной функции приспособленности. Для найденной им особи производится проверка наличия путей от заданных объектов генерации (некоторых вершин типа S) до заданных объектов потребления (некоторых вершин типа P), например, посредством алгоритма Флойда-Уоршелла. В случае отсутствия таких путей расчет заканчивается (особь является одним из множеств минимальных отказов), а в противном случае ищется другая особь путем повторного вызова генетического алгоритма.

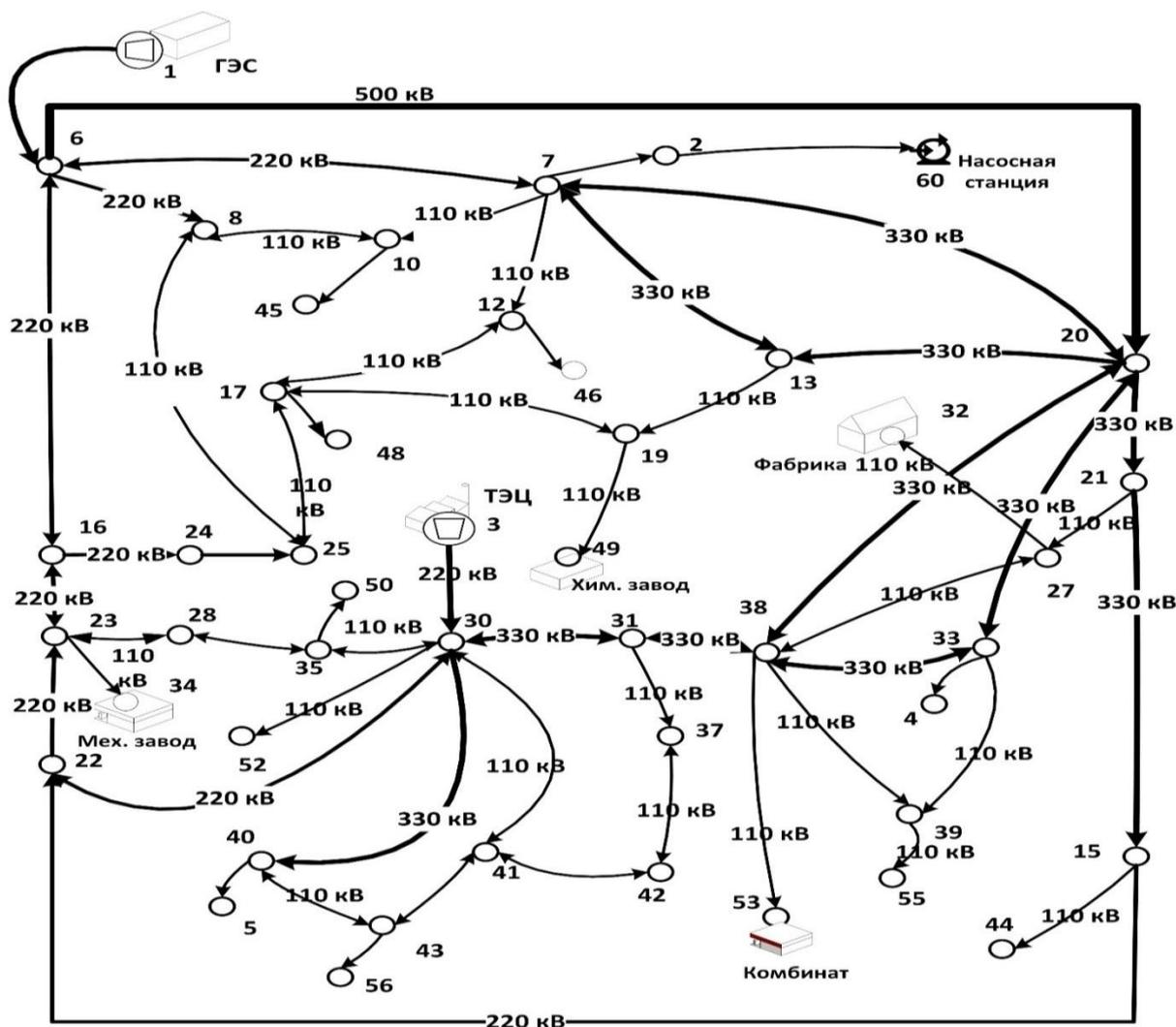


Рис. 7. Пример фрагмента электросети для анализа уязвимости

Проверка алгоритма проводилась на фрагменте электрической сети, представленном на рис. 7. Выполнялся поиск наборов вершин, одновременный отказ которых прекращает поставку электроэнергии пяти крупным объектам потребления (№ 32, 34, 49, 53, 60) от двух объектов

генерации (№ 1, 3). Были выявлены одно двухэлементное множество минимальных отказов {6, 30} и четыре пятиэлементных: {7, 17, 20, 23, 31}, {7, 20, 23, 25, 31}, {7, 19, 20, 23, 38}, {7, 20, 23, 25, 38}.

В рамках ЦД, эволюционный алгоритм обрабатывает ту же графовую модель сети ресурсоснабжения, что и алгоритмы реконфигурации из предыдущего раздела. Такое многократное использование одной и той же модели из ЦД для различных задач управления гарантирует взаимную согласованность их решений.

Заключение

Технологии высокоавтоматизированного управления технологической инфраструктурой на базе ЦД обладают большим потенциалом для повышения эффективности и безопасности ее функционирования. Как показывают приведенные в докладе результаты, адекватный ЦД строится путем интеграции разнородных моделей на базе общей онтологии. В ходе дальнейших исследований предполагается обогащать ЦД новыми видами данных и моделями.

Литература

1. *Steindl G., Stagl M., Kasper L., Kastner W., Hofmann R.* Generic digital twin architecture for industrial energy systems // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. – P. 8903.
2. *Ковалёв С. П.* Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем // *Системы и средства информатики*. 2020. Т. 30, № 1. – С. 66–81.
3. *Ковалев С.П.* Методы теории категорий в модельно-ориентированной системной инженерии // *Информатика и ее применения*. 2017. Т. 11. Вып. 3. – С. 42–50.
4. *Ковалёв С.П.* Применение онтологий при разработке распределенных автоматизированных информационно-измерительных систем // *Автоматрия*. 2008. Т. 44, № 2. – С. 41–49.
5. *Hartmann D., Van der Auweraer H.* Digital twins. arXiv.org, 2020. – arXiv:2001.09747v1 [cs.CY].
6. *Гаврилова Т.Н., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
7. *Калянов Г.Н.* Концептуальная модель DFD-технологии // *Открытое образование*. 2017. № 4. – С.21–26.
8. *Крыгин А.А.* Оптимизация графиков плановых ремонтов совокупности участков инженерных сетей // *Автоматика и телемеханика*. 2010. № 9. – С. 83–102.
9. *Гребенюк Г.Г., Крыгин А.А.* Алгоритмы оптимизации числа переключений при реконфигурации сетей теплоснабжения // *Автоматика и телемеханика*. 2007. № 12. – С. 101–112.
10. *Гребенюк Г.Г., Крыгин А.А.* Предельные графы в структурной оптимизации режимов распределительных сетей // *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 12. – С. 147–162.
11. *Kayal P., Chanda S., Chanda C.K.* Determination of voltage stability in distribution network using ANN technique // *Int. J. Electric. Engineer. Inform.* 2012. Vol. 4, № 2. – P. 347–360.
12. *Grebenyuk G.G., Nikishov S.M.* Blocking of energy and resource supply of target objects in network infrastructures // *Automation and Remote Control*. 2018. Vol. 79(3). – P. 535–544.