

## 2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.2>

## ОБЪЕКТНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Илья Абрамович Головинский

Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)  
igolovinskij@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5182-5868>

**Аннотация. Введение.** Концептуальной основой моделирования и автоматизации управления электрическими сетями служит Общая модель данных (Common Information Model – CIM). Она позволяет строить объектно-ориентированные модели электросетей, однако не располагает достаточными средствами анализа их структуры и состояния. Последний означает прежде всего анализ топологии графов электросетей. Было накоплено большое количество и разнообразие алгоритмов такого анализа; оно нуждалось в систематизации и упрощении. **Цель.** Для анализа структуры и состояния сложной распределенной системы автор вводит понятие структурного графа её объектно-ориентированной модели. Вершины этого графа представляют объекты классов, применяемых в модели, ребра – ассоциации между объектами. Основой анализа сложной системы становится анализ топологии структурного графа её модели. **Материалы и методы.** Данный подход назван объектно-топологическим. Он представляет собой развитие объектно-ориентированного подхода (ООП) путём его дополнения средствами анализа топологии структурных графов объектно-ориентированных моделей. Систематизация и упрощение алгоритмов анализа графов осуществляются на основе выделения минимального набора базисных операций над графами и за счёт выражения алгоритмов через эти операции. Первое означает построение некоторой алгебры графов, второе позволяет интерпретировать алгоритмы топологического анализа как вычисления графов посредством операций данной алгебры. **Результаты и обсуждение.** Рассматриваются примеры применения объектно-топологического подхода и алгебры графов к автоматизации решения задач оперативно-диспетчерского управления: трассировки цепей на схемах, блокировки переключений, управления топологией расчетной модели режима. Их алгоритмы выражаются формулами алгебры графов, удобными для программирования. **Заключение.** Объектно-топологический подход, оснащённый алгеброй графов, позволяет заменить традиционные многословные описания алгоритмов анализа моделей электросетей лаконичными формулами. Это значительно упрощает программирование и верификацию алгоритмов, сокращает сроки и затраты на разработку программ, повышает их надёжность.

**Ключевые слова:** объектно-ориентированное моделирование, модель электрической сети, Общая модель данных, CIM, АСТУ, алгебра графов

**Для цитирования:** Головинский И. А. Объектно-топологическое моделирование электрических сетей // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6 (105). С. 16–26. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.2>

**Конфликт интересов:** доктор технических наук И. А. Головинский является членом редакционной коллегии журнала «Вестник Северо-Кавказского федерального университета». Автору неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 07.10.2024;  
одобрена после рецензирования 11.11.2024;  
принята к публикации 19.11.2024.

Research article

## OBJECT-TOPOLOGICAL MODELING OF ELECTRICAL NETWORKS

Ilya A. Golovinskii

North-Caucasus Federal University (1, Pushkin str., Stavropol, 355017, Russian Federation)  
igolovinskij@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5182-5868>

**Abstract. Introduction.** The Common Information Model (CIM) is the conceptual basis for modeling electrical networks and automating their management. It allows building object-oriented models of electrical networks, but does not provide efficient tools for analyzing their structure and state. This analysis primarily requires the analysis of the topology of electrical network graphs. A large number and variety of algorithms for such analysis were developed; there is necessity to classify and simplify them. **Goal.** To analyze the structure and state of a complex distributed system, the author introduces the concept of a structural graph of its object-oriented model. The vertices of this graph represent objects of the classes used in the model, and the edges represent associations between objects. Analysis of the topology of the structural graph of a model of a complex system becomes the basis for the analysis of its structure and state. **Materials and methods.** This approach is called an object-topological. It supplies the object-oriented approach with tools for analyzing the topology of structural graphs of object-oriented models. Classification and simplification of graph analysis

algorithms is carried out with selection of a minimum set of basic operations on graphs and expression of algorithms through these operations. The first means constructing some graph algebra, the second allows one to interpret topological analysis algorithms as computations of graphs using the operations of this algebra. **Results and discussion.** Examples of applying the object-topological approach and graph algebra to automating the solution of operational dispatch control problems are considered: tracing circuits on diagrams, interlocking switching operations, and managing the topology of the regime computational model. Their algorithms are expressed by graph algebra formulas that are convenient for programming. **Conclusion.** The object-topological approach enhanced by graph algebra allows replacing traditional verbose descriptions of algorithms for analyzing power grid models with laconic formulas. This significantly simplifies programming and verifying of algorithms, reduces the time and cost of program development, and increases the reliability of programs.

**Keywords:** object-oriented modeling, electrical network model, Common Information Model, CIM, SCADA/EMS/DMS, graph algebra

**For citation:** Golovinskii IA. Object-topological modeling of electrical networks. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;6(105):16-26 (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.2>

**Conflict of interest:** IA Golovinskii, Dr. Sci. (Tech.), is a member of the editorial board of the journal "Newsletter of North-Caucasus Federal University". The author is unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript.

The article was submitted 07.10.2024;

approved after reviewing 11.11.2024;

accepted for publication 19.11.2024.

**Введение / Introduction.** В автоматизированном управлении большими распределенными техническими системами, к которым принадлежат электрические сети, используются цифровые модели сложной структуры. Обычно такую структуру описывают графом. Будем называть его *структурным графом* цифровой математической модели. При моделировании электрических сетей вершины структурного графа обозначают электроустановки, ребра представляют их электрические соединения. Вершины структурного графа называют также узлами, рёбра – ветвями.

К узлам структурного графа привязывают наборы атрибутов, описывающих представленные ими устройства. Скажем, узел, представляющий секцию шин, может иметь атрибуты: идентификационный номер устройства, марку оборудования, диспетчерское наименование, номинальное напряжение, величину измеренного напряжения в текущем режиме, рассчитанную величину напряжения согласно оценке состояния сети и т. п.

Разновидностью таких моделей являются модели, в которых наборы атрибутов присваиваются не только узлам, но и ветвям. Это характерно для моделей транспортных сетей, в том числе электрических, где ветви представляют элементы системы, выполняющие функцию переноса ресурса между узлами. Атрибуты ветви описывают её пропускную способность и величину протекающего по ней потока ресурса. Такую модель можно легко преобразовать в модель предыдущего типа. Для этого каждую ветвь заменяют парой ветвей, соединённых через общий узел, и переносят на этот узел набор атрибутов, принадлежавший исходной ветви. В полученной модели атрибутами обладают только узлы, ветви атрибутов не имеют. Для упрощения дальнейшего изложения будем предполагать, что при помощи описанной редукции всякая модель представлена в последней форме.

К узлам, представляющим однотипные элементы системы (например, в модели электросети – секции шин), привязывают однотипные наборы атрибутов. Значения атрибутов определяют индивидуальные свойства элемента. С точки зрения объектно-ориентированного подхода, множество этих однотипных наборов значений образует класс объектов: каждый набор есть объект данного класса. Объектам классов соответствуют вершины (узлы) структурного графа моделируемой системы, ассоциациям между объектами – рёбра (ветви) этого графа. Объектно ориентированная модель предметной области оказывается графом, к вершинам которого привязаны наборы данных. Задачи анализа такой модели требуют в первую очередь анализа топологии её структурного графа.

В российской электроэнергетике объектно-ориентированный подход практически вводится в качестве единой методологической основы моделирования и управления. Это осуществляется посредством серии Национальных стандартов ГОСТ Р 58651, определяющих унифицированную платформу обмена данными в отрасли. Сами стандарты ГОСТ Р 58651 опираются на Общую модель данных (CIM) – систему классов, которая определена стандартами Международной электротехнической комиссии (МЭК) IEC 61970 и IEC 61968.

Однако в CIM отсутствуют инструменты анализа объектно-ориентированных моделей, их структуры и состояния. Это является недостатком методологии CIM. Однако такого рода инструменты были развиты в ряде отечественных исследований и разработок автоматизированных систем технологического управления (АСТУ) как методы анализа графовых моделей электросетей [1–4]. Имея универсально-математический характер, они применимы к структурным графам любых объектно-ориентированных моделей, что позволяет расширить ООП путём его обогащения методами топологического анализа структуры цифровых моделей.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** Понятие объектно-топологического подхода. Предложенное расширение ООП естественно называть *объектно-топологическим подходом*, или *графообъектным подходом* [5]. Он выдвигает на первый план свойства структурных графов моделей. В этом его отличие от обычного ООП, где графы, представляющие ассоциации объектов, вообще не рассматриваются. В объектно-ориентированных моделях объекты могут представлять любые сущности как материальной природы, так и информационной. В объектно-топологическом подходе особое место занимает специальный класс объектов – графы. Структурно-топологический анализ моделей осуществляется посредством операций над графами. По существу, он сводится к вычислениям графов.

Графообъектный подход естественным образом распространяется и на реляционные модели. В качестве объекта класса принимается запись (строка) реляционной таблицы. Классом является описание структуры однотипных записей, принадлежащих одной таблице или множеству таблиц, имеющих одинаковую столбцовую структуру. Ссылки между записями интерпретируются как ассоциации объектов. Таким образом, реляционная база данных оказывается графообъектной моделью. Эта разновидность графообъектной модели называется *графореляционной моделью*. Данная интерпретация позволяет распространить топологические методы графообъектного подхода на реляционные модели – реализовать *графореляционный подход*.

Структурные графы информационных моделей электросетей. Понятие «информационной модели», принятое в российской электроэнергетике, следует отличать от понятия «общей модели данных». Первое означает цифровое описание индивидуального объекта или конкретной системы, его цифровую модель. Второе есть система классов, т. е. язык общих понятий, посредством которых строятся цифровые модели конкретных объектов и систем одной предметной области. В электроэнергетике в качестве общей модели данных принята CIM.

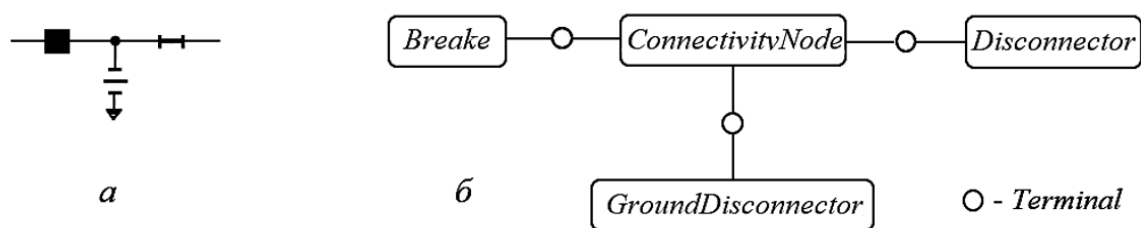


Рис. 1. Соединение устройств в CIM-модели электросети при помощи объектов классов Terminal и ConnectivityNode / Fig. 1. Connecting devices in a CIM power grid diagram using Terminal and ConnectivityNode class objects

В стандарте МЭК [6] предусмотрены специальные классы объектов для описания в цифровых моделях соединений устройств в соответствии с их электрическими соединениями. Это классы *Terminal* и *ConnectivityNode*. Объекты класса *Terminal* представляют полюсы устройств, объекты класса *ConnectivityNode* – узлы соединения смежных устройств между собой. В узле *ConnectivityNode* два или большее число устройств соединяются через их полюсы – объекты класса *Terminal*. На рис. 1 приведён пример соединения выключателя, разъединителя и заземляю-

щего разъединителя. Эти типы устройств описываются в [6] классами *Breaker*, *Disconnecter* и *GroundDisconnecter*. Рис. 1а представляет изображение этого соединения на подробной коммутационной схеме, рис. 1б – схему соединений в СИМ-модели. Маленькие кружки на рис. 1б представляют объекты класса *Terminal*. Из такого рода фрагментов соединений различных устройств строится СИМ-модель всей электросети. Мы интерпретируем её как графообъектную модель.

Структурные графы таких моделей неориентированные. Далее речь идет об анализе топологии только неориентированных структурных графов.

Базисные операции анализа топологии информационных моделей электросетей. Анализ топологической структуры информационных моделей средствами объектно-топологического подхода сводится к вычислениям графов. Это подграфы структурных графов информационных моделей. Когда алгоритмов таких вычислений много, необходимо упорядочить используемые в них операции над графами. Следует выделить среди них минимальный набор основных, базисных операций, через которые будут выражаться все остальные. Иначе говоря, требуется построить определённую алгебру графов.

В примерах, которые рассматриваются далее, вычисления неориентированных графов производятся посредством следующих базисных операций:

$$\begin{aligned}
 A + B & - \text{объединение графов } A \text{ и } B; \\
 A \& B & - \text{пересечение графов } A \text{ и } B; \\
 A - B & - \text{разность графов } A \text{ и } B; \\
 A \wedge B & - \text{простое замыкание графа } A \text{ посредством графа } B; \\
 A \parallel B & - \text{двусвязное замыкание графа } A \text{ посредством графа } B.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

В [2–4] описано использование в объектно-топологическом анализе также других операций над графами.

Первые три из операций (1) стандартны в теории графов. Они применимы также к множествам узлов, которые интерпретируются как графы без рёбер. Над множествами производятся операции объединения, пересечения и разности.

Четвёртая и пятая операции в системе (1) добавлены автором. Они служат для вычисления отношений простой и двойной связности между элементами графов. Операция  $A \wedge B$  определяется как объединение графа  $A$  со всеми теми компонентами связности графа  $B$ , которые имеют с графом  $A$  хотя бы одну общую вершину. Операция  $A \parallel B$  определяется как объединение графа  $A$  со всеми теми компонентами вершинной двусвязности графа  $B$ , которые имеют с графом  $A$  хотя бы одно общее ребро.

Напомним, что связный граф называется вершинно двусвязным, если любые две его вершины можно соединить двумя простыми путями, не имеющими общих вершин, кроме концевых. Вершинную двусвязность графов часто называют просто двусвязностью [7]. Далее в статье будем говорить о двусвязности только вершинной, опуская слово «вершинная».

Двусвязный граф можно наглядно представить как объединение множества простых циклов через их общие рёбра. Сети, графы которых двусвязны, называют закольцованными, поскольку в графе такой сети каждая вершина принадлежит некоторому простому циклу, образованному рёбрами. Компонентой двусвязности графа  $G$  называют такой его двусвязный подграф, который не содержится в большем двусвязном подграфе графа  $G$ .

Результат выполнения каждой из операций (1) над неориентированными графами снова будет неориентированным графом. Это значит, что система операций (1) определяет некоторую алгебру графов. Комбинируя эти операции, можно строить сколь угодно сложные формулы для вычисления графов.

Разработчики АСТУ при анализе топологии сетей используют традиционные методы, которые не выходят за рамки анализа простой связности графов. Применяемые в тех же целях языки запросов графовых и реляционных баз данных тоже не выходят за эти рамки. Однако этим сред-

ствам принципиально недоступны решения задач, требующих анализа двусвязности графов. Но такие задачи тоже необходимо решать при анализе электросетей. Их примеры рассматриваются ниже. В контексте же объектно-топологического подхода методы решения задач обоих типов находят своё естественное место.

Алгебра графов (1) основана на ООП, как и СИМ. Разница в том, что в СИМ классами описываются физические устройства, а в алгебре (1) – неориентированные графы. Операции (1) инкапсулируют (скрывают внутри себя) фрагменты исходного кода, наиболее часто повторяющиеся в программах топологического анализа электрических схем. Они позволяют удобно структурировать и упрощать запись алгоритмов топологического анализа, что облегчает программную реализацию последних. Символы базисных операций (1) выбраны исходя из того, что в языке C++ они допускают «перегрузку», т. е. переопределение смысла. Это дает простой способ их программирования.

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** Как примеры применения объектно-топологического подхода рассмотрим решения трёх задач из области автоматизации оперативно-диспетчерского управления электросетями: трассировку цепей между двумя узлами на схеме, блокировку переключений разъединителей под напряжением, построение и сопровождение топологической части режимной модели.

Автоматизация трассировки цепей на схемах электросетей. Задачи трассировки цепей на схемах электросетей и подстанций состоят в отображении цепей, соединяющих заданные пользователем узлы или группы узлов. Искомые цепи – это простые (не содержащие циклов) пути в графе схемы. В сложных закольцованных схемах диспетчер не может решать такие задачи «в уме» или ручным черчением на компьютере. Решение должно быть полным и точным, а в стрессовых условиях утяжеленных и послеаварийных режимов оно должно быть получено за минимальное время. Этим определяется необходимость автоматизации трассировок [8]. Трассировки цепей, выявленные программой, могут обрабатываться другими автоматическими приложениями.

Теоретически все искомые цепи, входящие в решение той или иной задачи трассировки, можно перечислить, записав их, допустим, в форме таблицы, где каждую строку будет занимать отдельная цепь в виде списка её узлов. Однако в общем случае такая таблица может оказаться необозримой для человека и слишком большой для автоматической обработки. Более рациональный подход к оперированию этой совокупностью цепей состоит в том, чтобы объединить все эти пути в граф, из которого их можно извлекать по необходимости. Этот граф называется графом трассировок.

Если граф анализируемой схемы имеет топологию дерева, то нахождение графа трассировок сводится к выделению в этом дереве наименьшего поддерева, соединяющего заданные узлы. В этом случае алгоритм решения несложен. Сложности возникают в закольцованных схемах, особенно при большой их размерности. Эти сложности преодолеваются с помощью алгебры графов, которая даёт лаконичную запись алгоритмов построения трассировок.

Пусть, например, на схеме электросети нужно выделить все замкнутые цепи, соединяющие два заданных узла  $\alpha$  и  $\beta$ . Пусть  $G$  – граф схемы сети,  $U$  – множество узлов этого графа, представляющих отключённые коммутационные аппараты (КА). Граф  $G-U$  представляет схему, из которой удалены отключённые КА. Идея решения состоит в том, что если известен один простой путь  $p$  от узла  $\alpha$  до узла  $\beta$  в графе  $G-U$ , то для получения всего графа трассировок достаточно объединить этот путь со всеми теми компонентами двусвязности графа  $G-U$ , которые имеют хотя бы одно общее ребро с  $p$ . Такое решение обосновано в [4]. Смысл его в том, что добавление к пути  $p$  всех компонент двусвязности графа  $G-U$  охватывает все возможные «вариации» простого пути от  $\alpha$  до  $\beta$ .

Для реализации этого решения нужно сначала найти в графе  $G-U$  какой-нибудь простой путь  $p$  от  $\alpha$  до  $\beta$ . Для этого достаточно построить какое-нибудь остовное дерево графа  $G-U$  и вы-



делить в нём путь от  $\alpha$  до  $\beta$ . Этот путь  $p$  объединим со всеми компонентами двусвязности графа  $G-U$ , имеющими с  $p$  хотя бы одно общее ребро. Искомый граф трассировок выражается простой формулой

$$p \parallel (G-U). \quad (2)$$

Контроль и блокировка переключений разъединителей. Переключения коммутационных аппаратов в электросетях, производимые персоналом, регламентированы системой правил [9, 10]. В правилах указаны условия, которые должны быть выполнены для разрешения включения или отключения КА заданного типа. Многие из этих условий имеют характер ограничений на топологическую конфигурацию схемы. Алгоритмы их автоматической проверки лаконично выражаются на языке алгебры графов.

Пусть, например, поставлена задача перевести присоединение ЛЭП с одной системы шин на другую в распределительном устройстве (РУ) 220 кВ с раздельной работой двух систем шин (рис. 2). Линию Л2 путём переключения её шинных разъединителей нужно перевести с 1СШ на 2СШ без перерыва электроснабжения потребителей, без её отключения от РУ. Это возможно, если между 1СШ и 2СШ на время выполнения переключений шинных разъединителей создаётся перемычка для выравнивания напряжений между шинами.

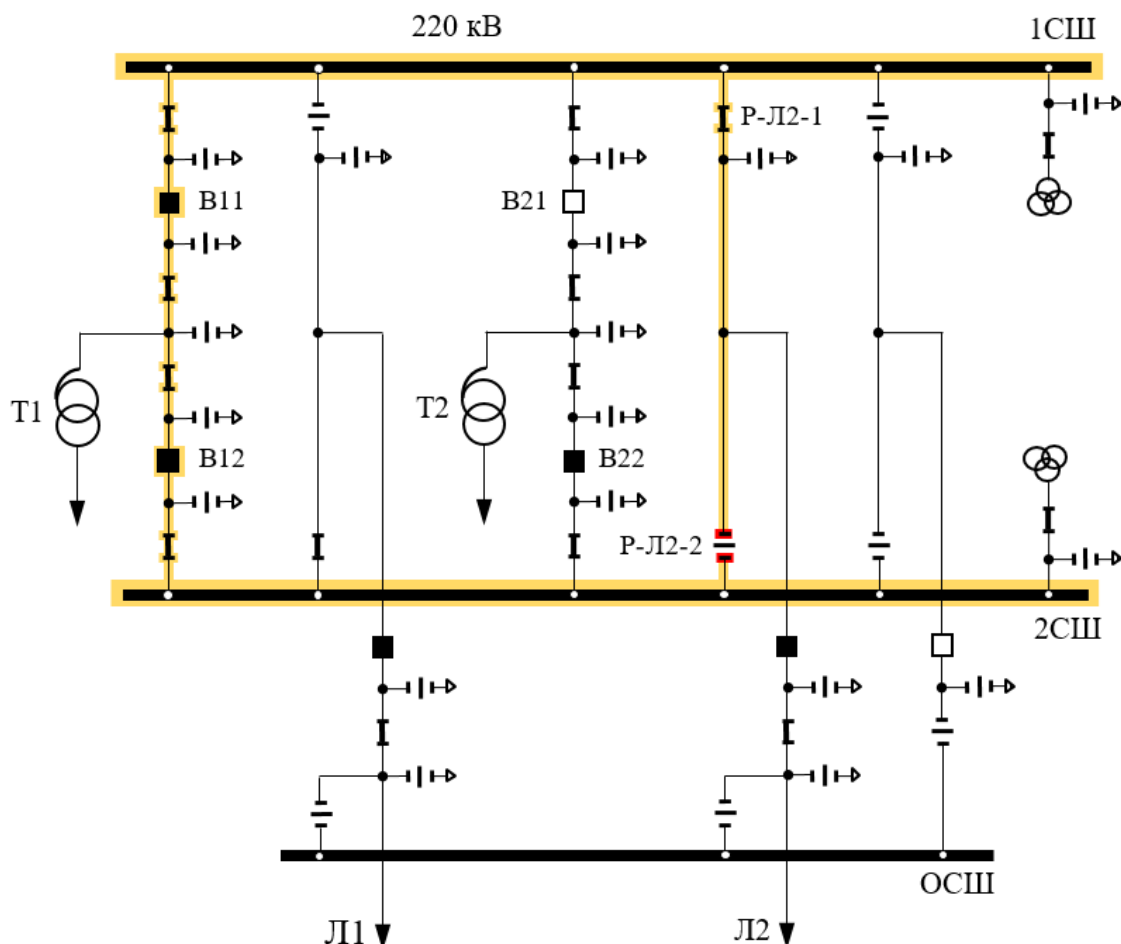


Рис. 2. Трассировка цепи между полюсами отключённого разъединителя P-Л2-2 через замкнутую перемычку между шинами / Fig. 2. Tracing the circuit between the poles of the opened disconnector P-Л2-2 through a closed jumper between the buses

Для переключения разъединителя, оба полюса которого находятся под напряжением, необходимо наличие обходной (шунтирующей) цепи с незначительным сопротивлением, соединяющей эти полюсы. Такая цепь предотвратит возникновение дуги при включении и отключении разъединителя. Необходимо также исключить возможность непреднамеренного размыкания шунтирующей цепи во время операций с разъединителями. Это обеспечивается отключением оперативного тока на приводах включенных выключателей и разъединителей в шунтирующей цепи.

На рис. 2 показана конфигурация рассматриваемого РУ, но не для исходного нормального режима, а для определённого промежуточного состояния в процессе переключений. Включённые выключатели изображены закрашенными квадратами, отключённые – незакрашенными. Изображённое состояние отличается от исходной нормальной схемы включённым положением выключателя В12 в присоединении трансформатора Т1. Он включён для создания замкнутой перемычки между шинами 1СШ и 2СШ. В исходной схеме трансформатор Т1 (при отключённом В12) и линия Л2 были подключены к 1СШ, а Т2 и Л1 – к 2СШ. Данное РУ не имеет шиносоединительного выключателя, который устанавливают специально для замыкания перемычек между шинами. Однако наличие пар выключателей в присоединениях трансформаторов Т1 и Т2 тоже позволяет такие перемычки создавать.

Перевод присоединения линии Л2 с 1СШ на 2СШ осуществляется включением разъединителя Р-Л2-2 и последующим отключением разъединителя Р-Л2-1. Полюсы обоих разъединителей находятся под напряжением. Переключаемый разъединитель в течение операции должен иметь замкнутую обходную цепь, соединяющую его полюсы. Для разъединителя Р-Л2-2 обходная цепь и её элементы выделены на рис. 2 жёлтой подсветкой, а концевые узлы этой цепи – красной. Во время включения разъединителя Р-Л2-2 все КА в этой цепи должны быть включены, а цепи питания их приводов – отключены.

Алгебра графов позволяет автоматически проверить не только наличие в РУ замкнутой цепи, соединяющей полюсы отключённого разъединителя. Её формулами можно представить совокупность всех таких цепей, а также множества выключателей и разъединителей в этих цепях. Это позволяет автоматизировать проверку надёжности включённого положения КА в шунтирующих цепях.

Пусть в структурном графе  $G$  информационной модели РУ полюсы разъединителя Р-Л2-2 представлены вершинами  $\alpha$  и  $\beta$ , а сам этот разъединитель представлен вершиной  $\gamma$ . При отключённом положении данного разъединителя граф всех замкнутых цепей в схеме РУ выражается формулой  $G-U-\gamma$ , где  $U$  – множество всех вершин графа  $G$ , представляющих отключённые КА. Связная компонента графа замкнутых цепей  $G-U-\gamma$ , содержащая полюс  $\alpha$ , выражается формулой

$$\alpha \wedge (G - U - \gamma). \quad (3)$$

Замкнутая цепь в РУ между полюсами разъединителя Р-Л2-2 при его отключённом положении существует тогда и только тогда, когда граф (3) содержит вершину  $\beta$ .

Для проверки отсутствия оперативного тока на приводах КА в цепях, шунтирующих разъединитель Р-Л2-2, построим граф трассировок замкнутых цепей, соединяющих полюсы разъединителя. Сначала найдем граф трассировок (простых путей) от узла  $\alpha$  до узла  $\beta$  в графе  $G-U$ , т. е. при включённом положении разъединителя Р-Л2-2. Один из этих простых путей проходит через вершину  $\gamma$ . Он выражается формулой  $(\alpha, \gamma) + (\gamma, \beta)$ . Из формулы (2) получаем граф всех простых путей от  $\alpha$  до  $\beta$  в графе  $G-U$ :

$$((\alpha, \gamma) + (\gamma, \beta)) \parallel (G - U). \quad (4)$$

Если из этого графа удалить путь  $(\alpha, \gamma) + (\gamma, \beta)$ , проходящий через  $\gamma$ , то получится граф всех замкнутых цепей от  $\alpha$  до  $\beta$ , обходящих контакт разъединителя Р-Л2-2. Для получения искомого графа достаточно вычесть из графа (4) вершину  $\gamma$ . Вместе с ней из графа (4) будут удалены инцидентные ей рёбра  $(\alpha, \gamma)$  и  $(\gamma, \beta)$ :

$$(((\alpha, \gamma) + (\gamma, \beta)) \parallel (G - U)) - \gamma. \quad (5)$$

Это и есть искомый граф обходных цепей, соединяющих полюсы разъединителя Р-Л2-2. Если включить также выключатель В21 в присоединении трансформатора Т2, то возникнет вторая перемычка между 1СШ и 2СШ. Граф (5) будет содержать и её.

Чтобы обеспечить надёжность и безопасность переключения разъединителя Р-Л2-2, нужно выбрать из графа (5) вершины всех выключателей и разъединителей и проверить отключённое положение цепей питания их приводов. Пусть  $B$  – множество узлов всех выключателей в схеме РУ. Из (5) следует, что множество выключателей в цепях, шунтирующих разъединитель  $\gamma$ , будет выражаться формулой

$$(((\alpha, \gamma) + (\gamma, \beta)) \parallel (G - U)) - \gamma \& B. \quad (6)$$

Аналогично, если  $D$  – множество узлов всех разъединителей схеме РУ, то множество разъединителей в цепях, шунтирующих разъединитель  $\gamma$ , выражается формулой

$$(((\alpha, \gamma) + (\gamma, \beta)) \parallel (G - U)) - \gamma \& D. \quad (7)$$

Формулы (3), (6) и (7) дают полное решение задачи автоматической проверки наличия и надёжности цепей, шунтирующих переключаемый разъединитель. Изложенный метод применим без изменений к контролю отключения разъединителя Р-Л2-1. Он применим точно так же к контролю переключений любых разъединителей под напряжением.

Построение и сопровождение топологической схемы режимной модели. В современных АСТУ схема узлов и ветвей для расчётов режима строится на базе подробной коммутационной модели. Первая получается из второй путём стягивания её графа. При переключениях КА топологическая схема режимной модели корректируется. Все эти преобразования должны выполняться автоматически.

Стандарт МЭК [6] определяет узлы топологической схемы режимной модели электросети как объекты класса *TopologicalNode*. Объект этого класса есть множество таких объектов класса *ConnectivityNode* (узлов соединения в подробной коммутационной модели), которые соединены между собой цепями с незначительным сопротивлением.

Для построения топологической основы расчётной модели множество всех объектов класса *ConnectivityNode* в подробной коммутационной модели электросети нужно разбить на непересекающиеся подмножества, внутри которых элементы будут соединены цепями с пренебрежимо малым сопротивлением. А между элементами разных подмножеств электрические связи должны иметь существенное или бесконечное сопротивление. Эти связи – ЛЭП, обмотки трансформаторов и отключённые КА. Каждое из полученных подмножеств узлов *ConnectivityNode* стягивается в соответствующий узел *TopologicalNode*.

При переключениях КА распределение узлов *ConnectivityNode* по узлам *TopologicalNode* в общем случае меняется. Узлы *TopologicalNode* могут разделяться или сливаться. При каждом переключении КА необходимо анализировать топологию соответствующего участка подробной коммутационной модели и, если нужно, корректировать топологию расчётной схемы. Алгоритмы этого анализа и преобразований сводятся к вычислению компонент простой связности графа замкнутых цепей в подробной коммутационной модели. Поскольку такие вычисления приходится выполнять во многих задачах АСТУ, то их программную реализацию целесообразно оформить как библиотечную функцию. Её применение равнозначно использованию операции  $A \wedge B$  – простого замыкания графа  $A$  посредством графа  $B$ . С помощью этой и других операций алгебры графов запись алгоритмов получается более простой и прозрачной.

Пусть  $G$  – структурный граф подробной коммутационной модели электросети в CIM-формате,  $L$  – множество узлов ЛЭП в этой модели (объектов класса *ACLineSegment*),  $T$  – множество концов трансформаторов (объектов класса *TransformerEnd*),  $U$  – множество узлов отключённых КА в схеме. Граф  $G-L-T-U$  есть граф цепей с незначительным сопротивлением в подробной ком-



мутационной схеме. Стягивание последней для получения узлов расчётной схемы режима сводится к вычислению компонент простой связности графа  $G-L-T-U$ .

На самом деле узел расчётной схемы как объект класса *TopologicalNode* представляет не только некоторое множество узлов *ConnectivityNode*. Он представляет всю компоненту связности графа  $G-L-T-U$ , содержащую определённое множество узлов *ConnectivityNode*. Для наглядности будем называть эту компоненту «площадкой» соответствующего узла расчётной схемы как объекта *TopologicalNode*. Эта «площадка», как граф, однозначно определяется любым содержащимся в ней узлом подробной коммутационной схемы.

«Площадку», содержащую вершину  $\sigma \in G$ , обозначим  $A(\sigma)$ . Она выражается формулой

$$A(\sigma) = \sigma \wedge (G - L - T - U). \quad (8)$$

Если в модели необходимо учесть сопротивления не только ЛЭП и трансформаторов, но также устройств других типов, то в формуле (8) из графа  $G$  нужно вычитать не только множества  $L$ ,  $T$  и  $U$ , но также и множества узлов, представляющих устройства этих типов.

Формула (8) устанавливает соответствие между узлами подробной коммутационной модели и узлами расчётной схемы. По формуле (8) легко определяется множество всех объектов класса *ConnectivityNode*, образующее тот объект класса *TopologicalNode*, которому принадлежит заданный узел  $\sigma$  подробной коммутационной схемы, не обязательно принадлежащий классу *ConnectivityNode*. Это множество выражается формулой  $A(\sigma) \& C$ , где  $C$  – множество всех узлов класса *ConnectivityNode* в структурном графе подробной коммутационной модели.

При включении КА может не происходить слияния двух узлов класса *TopologicalNode*, а при отключении КА может не происходить разделения узла *TopologicalNode*. Два узла расчётной схемы сливаются в один при включении КА, если до включения полюсы КА принадлежали этим двум разным узлам. А разделение узла расчётной схемы на два при отключении КА происходит в том случае, когда после отключения между полюсами этого КА не будет ни одной цепи с пренебрежимо малым сопротивлением. Проверку этих условий нужно автоматизировать. Её алгоритм основан на формуле (8).

Пусть  $\pi_1$  и  $\pi_2$  – полюсы некоторого КА. Найдём «площадки»  $A(\pi_1)$  и  $A(\pi_2)$  по формуле (8). Они либо совпадают, что выражается равенством графов

$$A(\pi_1) = A(\pi_2), \quad (9)$$

либо не пересекаются:

$$A(\pi_1) \& A(\pi_2) = \emptyset. \quad (10)$$

При включённом положении КА всегда имеет место (9), а при отключённом возможно как (9), так и (10).

Два узла расчётной схемы сливаются в один тогда и только тогда, когда до включения КА имело место (10). Один узел расчётной схемы разделяется на два тогда и только тогда, когда после отключения КА имеет место (10). Таковы математические выражения условий корректировки топологии расчётной схемы.

**Заключение / Conclusion.** Создание АСТУ требует разработки большого числа алгоритмов анализа топологии схем. Обычно эти алгоритмы выражаются многословными описаниями, при этом их система остаётся в целом слабо упорядоченной. Это негативно влияет на сроки разработки и качество АСТУ. Изложенный в статье объектно-топологический подход позволяет выявить и систематизировать базисные операции над графами, к которым сводятся алгоритмы топологического анализа. Он даёт принципиальное упрощение записи алгоритмов, их программирования и верификации, позволяет сократить сроки программирования и затраты на него, повысить надёжность программ.

В статье даны примеры применения объектно-топологического подхода к задачам автоматизации оперативно-диспетчерского управления электрическими сетями. Формулы алгебры

графов, посредством которых записываются алгоритмы топологического анализа, инвариантны относительно топологии электрических схем. Их применение к конкретным схемам требует только исходных данных о схеме, но не требует адаптации алгоритмов.

В современных АСТУ функции анализа топологии объединены в топологическом процессоре. Возрастает его роль как одного из основных компонентов операционного ядра АСТУ. Для реализации неуклонно расширяющегося спектра функций топологического процессора объектно-топологический подход предоставляет унифицированную методологию и математический аппарат.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Любарский Ю. Я. Интеллектуальные информационные системы. М.: Наука, 1990. 232 с.
2. Головинский И. А. Объектно-ориентированный подход к разработке программ анализа коммутационных схем электрических сетей // Известия РАН. Энергетика. 2001. № 2. С. 46–56.
3. Головинский И. А. Методы анализа топологии коммутационных схем электрических сетей // Электричество. 2005. № 3. С. 10–18.
4. Головинский И. А. Построение графов простых путей в транспортных сетях. I. Общие решения и примеры // Известия РАН. Теория и системы управления. 2021. № 1. С. 124–159.
5. Головинский И. А., Дьяченко М. Ю., Лондер М. И., Тумаков А. В. Топологические блокировки оперативных переключений // Электрические станции. 2018. № 7. С. 29–37.
6. IEC 61970-301. Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 301: Common information model (CIM) base. Ed. 7.0, 2020. 558 p.
7. Дистель Р. Теория графов. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2002. 336 с.
8. Головинский И. А. Автоматизация топологической трассировки цепей на схемах электрических сетей и подстанций // Релейная защита и автоматизация. 2024. № 3(56). С. 20–29.
9. ГОСТ Р 55608-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Переключения в электроустановках. Общие требования. М.: Росстандарт. 2018. 77 с.
10. Правила переключений в электроустановках / Минэнерго России. М., 2018. 160 с.

#### REFERENCES

1. Lyubarsky YuYa. Intelligent information systems. Moscow: Nauka; 1990. 232 p. (In Russ.).
2. Golovinskii IA. Object-oriented approach to development of programs for analysis of switching circuits of electrical networks. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2001;(2):46-56. (In Russ.).
3. Golovinskii IA. Methods of analysis of topology of switching circuits of electrical networks. Electricity. 2005;(3):10-18. (In Russ.).
4. Golovinskii IA. Construction of Simple Path Graphs in Transport Networks: I. General Solutions and Examples. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2021;(1): 124-159.
5. Golovinsky IA, Dyachenko MYu, Lander MI, Tumakov AV. Topological blocking of operational switches. Electric stations. 2018;(7):29-37.
6. IEC 61970-301. Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 301: Common information model (CIM) base. Ed. 7.0, 2020. 558 p.
7. Diestel R. Graph Theory, 6th ed. Heidelberg: Springer, 2024. 470 p.
8. Golovinskii IA. Automation of topological tracing of circuits in electrical network and substation diagrams. Relay protection and automation. 2024;3(56): 20-29. (In Russ.).
9. GOST R 55608-2018. National standard of the Russian Federation. Unified energy system and isolated energy systems. Operational dispatch control. Switching in electrical installations. General requirements. Moscow: Rosstandart; 2018. 77 p. (In Russ.).
10. Rules for switching in electrical installations. Ministry of Energy of Russia. Moscow; 2018. 160 p. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Илья Абрамович Головинский** – доктор технических наук, главный специалист по математическому моделированию в электроэнергетике кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения факультета нефтегазовой инженерии Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 15127079800, Researcher ID: LTD-0932-2024.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Илья А. Golovinskii** – Dr. Sci. (Tech.), Chief Specialist in Mathematical Modeling in the Electric Power Industry, Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 15127079800, Researcher ID: LTD-0932-2024.