

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.1>



СТАНДАРТИЗАЦИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА АСТУ В СООТВЕТСТВИИ С ОБЩЕЙ МОДЕЛЬЮ ДАННЫХ (СИМ)

Илья Абрамович Головинский^{1*}, Иван Иванович Надтока², Светлана Сергеевна Костюкова³

^{1, 2, 3} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ igolovinskij@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5182-5868>

² ii_nadtoka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3505-9312>

³ smakarova@ncfu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5062-7066>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Топологический процессор (ТоП) является одним из основных компонентов операционного ядра автоматизированных систем технологического управления (АСТУ). Развитие АСТУ обуславливает необходимость стандартизации данных при информационном обмене между ТоП и прикладными задачами, поскольку функции ТоП определяются требованиями отраслевых нормативно-технических документов. Цель. Разработка и описание концепции СИМ-стандартизации входных и выходных данных топологического процессора для обеспечения интероперабельности программных компонентов АСТУ. Материалы и методы. Исследование основано на анализе функциональной архитектуры АСТУ, стандартов в области управления электрическими сетями и методологии СИМ (Common Information Model). Результаты и обсуждение. Рассмотрены задачи топологического анализа: построение моделей в офлайне, корректировка моделей при переключении коммутационных аппаратов, распознавание коммутационного состояния, топологические блокировки, трассировки и послеаварийное восстановление электроснабжения. Определены классы СИМ для входной и выходной информации при обмене данными между ТоП и прикладными компонентами. Показано, что СИМ обеспечивает построение необходимого «моста» между языком электроэнергетики и языком математики (теории графов). Заключение. СИМ-стандартизация входных и выходных данных ТоП позволяет разрабатывать топологический процессор отдельно от прикладных задач и поставлять его в готовом виде для использования в различных управляющих комплексах. Такой подход возможно распространить на другие программные компоненты АСТУ, обеспечивая их «бесшовную» интеграцию в единую управляющую систему.

Ключевые слова: топологический процессор, СИМ, стандартизация данных, автоматизированные системы управления, электрические сети

Для цитирования: Головинский И. А., Надтока И. И., Костюкова С. С. Стандартизация входных и выходных данных топологического процессора АСТУ в соответствии с общей моделью данных (СИМ) // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 6(111). С. 9–19. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.1>

Конфликт интересов: доктор технических наук И. А. Головинский и доктор технических наук И. И. Надтока являются членами редакционной коллегии журнала «Вестник Северо-Кавказского федерального университета». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 21.10.2025;

одобрена после рецензирования 24.11.2025;

принята к публикации 28.11.2025.

Research article

STANDARDIZATION OF INPUT AND OUTPUT DATA OF SCADA/EMS TOPOLOGY PROCESSOR ACCORDING TO THE COMMON INFORMATION MODEL (CIM)

Il'ya A. Golovinsky^{1*}, Ivan I. Nadtoka, Svetlana S. Kostyukova³

^{1, 2, 3} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin str., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ igolovinskij@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5182-5868>

² ii_nadtoka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3505-9312>

³ smakarova@ncfu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5062-7066>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. The topology processor is one of the main components of the SCADA/EMS operating core. The evolution of SCADA/EMS requires data standardization for information exchange between the topology processor and application tasks, as the functions of the

topology processor are defined by the requirements of industry regulatory and technical documents. **Goal.** The outlines for the CIM standardization of the topology processor input and output data that ensure interoperability of software components. **Materials and methods.** This study is based on an analysis of the functional architecture of SCADA/EMS, standards in the field of electric power grid management, and the Common Information Model (CIM) methodology. **Results and discussion.** Topology analysis tasks are considered: models offline building, model updating after switching operations, switching state recognition, topological interlocks, topological tracing, and post-failure power supply restoration. CIM classes are proposed for input and output data exchange between topology processor and applied components. It is shown that CIM provides a necessary "bridge" between the power engineering language and mathematics (graph theory). **Conclusion.** CIM standardization of input and output data for the topology processor allows the latter to be developed separately from application modules and delivered ready-to-use for the variety of control systems. This approach can be spread on the other SCADA/EMS software components to ensure their seamless imbedding into integrated control systems.

Keywords: topology processor, CIM, SCADA/EMS, electric power grid, data standardization

For citation: Golovinsky IA, Nadtoka II, Kostyukova SS. Standardization of input and output data of SCADA/EMS topology processor according to the common information model (CIM). Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;6(111):9-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.1>

Conflict of interest: I. Golovinskii, Dr. Sci. (Techn.) and I. Nadtoka, Dr. Sci. (Techn.) are member of the editorial board of the journal "Newsletter of North-Caucasus Federal University". Authors are unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript

The article was submitted 21.10.2025;

approved after reviewing 24.11.2025;

accepted for publication 28.11.2025.

Введение / Introduction. Топологический процессор (ТоП, процессор топологии) является одним из основных компонентов операционного ядра автоматизированных систем технологического управления (АСТУ). Двумя другими базовыми компонентами являются подсистема сбора и хранения данных и подсистема отображения [1, п. 4. 1, с. 16].

Развитие АСТУ обуславливает расширение и усложнение функций ТоП. При этом каждая компания, разрабатывающая АСТУ, сейчас создаёт и развивает свой собственный процессор топологии. Однако функции ТоП во всех АСТУ в основном однотипны: они определяются кругом решаемых прикладных задач и требованиями отраслевых нормативно-технических документов. Это позволяет предположить, что в перспективе ТоП как типовой функциональный модуль, относительно самостоятельный и специфический, может разрабатываться отдельно от прикладных задач, которые будут пользоваться им как сервером. Такой модуль ТоП может поставляться разработчикам АСТУ в готовом виде для использования его в различных управляющих комплексах. При этом, разумеется, должна быть решена задача согласования форматов данных при информационном обмене между ТоП и прикладными задачами, которые его используют.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Специфичность ТоП, его обособленный характер относительно прикладных задач электроэнергетики определяется тем, что он, по сути, производит чисто математические операции – анализ и преобразования графов. В то же время функции, для выполнения которых прикладные программы обращаются к ТоП, формулируются на языке электроэнергетики. Построение необходимого «моста» (bridge) между языком электроэнергетики и языком математики (теории графов) обеспечивает СИМ.

С помощью ТоП решаются две группы задач: 1) первоначальное построение в офлайне и сопровождение в режиме онлайн обобщённых оперативных моделей электросети; 2) анализ моделей. Во второй группе можно выделить следующие подгруппы:

- определение оперативного коммутационного состояния оборудования;
- топологические блокировки переключений коммутационных аппаратов (КА) в первичных и вторичных цепях;
- топологические трассировки цепей на схемах электросетей и подстанций;
- послеаварийное восстановление электроснабжения в распределительных сетях.

Программные модули, обеспечивающие решение этих прикладных задач, обращаются к топологическому процессору для математического анализа соответствующих графов. Схема этого взаимодействия показана на рисунке 1. Стрелками показаны потоки данных.

Программный модуль, который на рисунке 1 обозначен как «Топологический процессор», можно понимать, как ТоП в узком смысле. В состав ТоП в широком смысле можно включить все программные компоненты, представленные на рисунке 1. ТоП в узком смысле выполняет только математические операции над графиками; ТоП в широком смысле реализует весь спектр прикладных задач управления электросетями, основанных на анализе топологии схем. Требования к ТоП в нормативно-технических документах допускают оба толкования. Далее под «Топологическим процессором» понимается ТоП только в узком смысле.



Рис. 1. Использование топологического процессора прикладными компонентами АСТУ /

Fig. 1. Use of the topology processor by applied SCADA/EMS components

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by authors

Графы, которыми оперирует ТоП в узком смысле, представляют собой структуру СИМ-моделей. Вершины такого графа представляют объекты классов, принадлежащие СИМ-модели, рёбра – ассоциации между объектами классов. Любая СИМ-модель содержит (можно сказать также: порождает) такого рода структурный график. Все эти структурные графы являются объектами оперирования для ТоП в узком смысле [2].

Функции прикладных программных компонентов, которые на рисунке 1 окружают ТоП и взаимодействуют с ним, формулируются на языке электроэнергетики. В то же время сам ТоП производит только математические операции – над графиками. Прикладные программные компоненты, указанные на рисунке 1, получают запросы на решение электроэнергетических задач от человека или от других программ. Эти задачи трансформируются рассматриваемыми компонентами в математические задачи над графиками, сводятся к задачам над графиками. Для решения таких задач указанные прикладные компоненты обращаются к ТоП. Редукция электроэнергетических задач к графовым выражается специальными алгоритмами, подчас довольно сложными. Этим и определяется необходимость в прикладных компонентах, представленных на рисунке 1.

Примерно такой подход к организации взаимодействия топологического процессора с другими программными компонентами реализован в АСУ ТП КОТМИ-14, разработанной в ООО «ДЕЦИМА» [3]. СИМ-унификация данных в КОТМИ-14 выражается в применении СИМ-методологии при построении базы данных и при доступе к ней. При этом, в соответствии с принципами метамодели СИМ, используются такие категории, как «класс», «атрибут», «ассоциация» и др. Состав и содержание системы классов в КОТМИ-14 соответствуют Канонической модели СИМ частично.

СИМ-стандартизация обмена данными с топологическим процессором в принципе не требует введения новых классов. В излагаемой ниже концепции один новый класс всё же упоминается. Это

класс эквивалентных коммутационных аппаратов *EquivalentSwitch*. Объект этого класса представляет последовательную цепочку КА, содержащую не более одного выключателя. Эквивалентные КА используются в обобщённых коммутационных схемах, называемых также схемами с коммутационными связями [4]. Класс *EquivalentSwitch* дополняет ряд классов, определённых в стандарте [5] для описания эквивалентных моделей электроустановок: *EquivalentEquipment*, *EquivalentBranch* и т. п. В данной статье он упоминается для полноты и цельности изложения, поскольку схемы с коммутационными связями рассматриваются здесь наравне с другими оперативными схемами.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Рассмотрим более подробно программные модули, изображенные на рисунке 1.

Построение моделей в офлайне. На рисунке 2 показана схема последовательного порождения моделей электросетей разных уровней обобщения, для решения которых используется ТоП. Эти преобразования выполняются в офлайне. Все они входят в состав показанного на рисунке 1 программного компонента «Оффлайновое построение оперативных моделей электросетей».

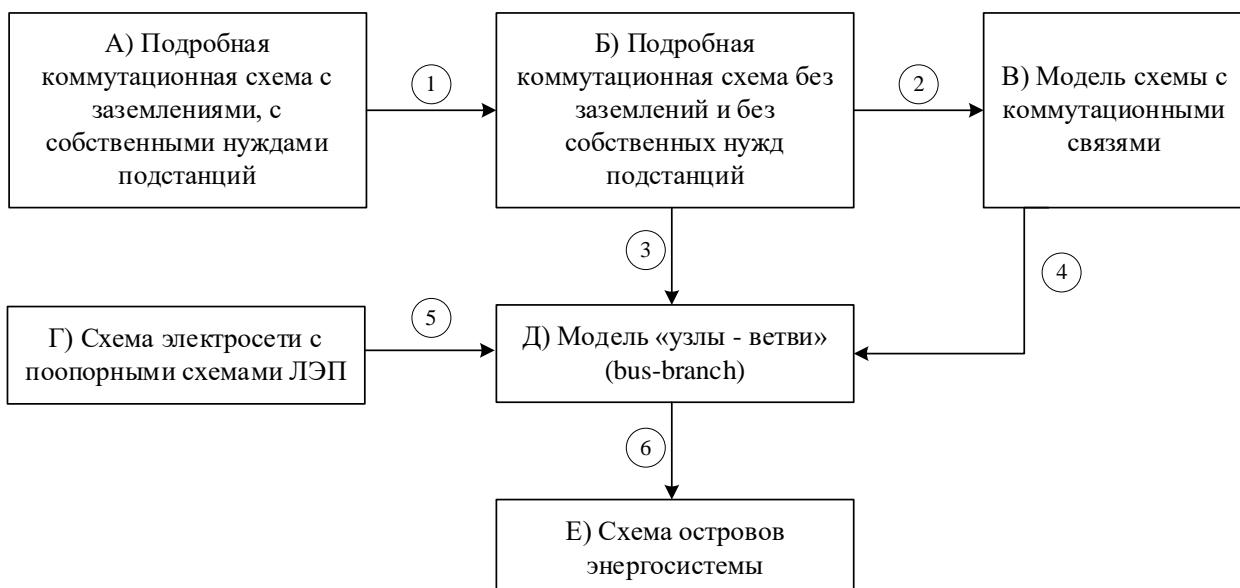


Рис. 2. Порядок построения офлайновых моделей электрических сетей с помощью топологического процессора /

Fig. 2. The procedure for offline construction of electrical network models using the Topology processor

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by authors

Модели на рисунке 2 помечены буквенными идентификаторами А – Е. Стрелки на рисунке 2 помечены номерами задач преобразования моделей. Под этими номерами задачи преобразования моделей приведены в таблице 1. Самые модели в таблице 1 указываются с их буквенными идентификаторами А – Е.

В столбцах 4 и 5 таблицы 1 указаны классы СИМ входной и выходной информации для топологического процессора (в узком смысле). Это информация, которой ТоП обменивается с прикладным компонентом «Оффлайновое построение оперативных моделей электросетей». Входная и выходная информация ТоП – это по существу графы. Вершины этих графов представляют объекты классов СИМ, рёбра графов – ассоциации между объектами классов.

Состав СИМ-классов входной и выходной информации ТоП при информационном обмене с программами построения моделей дан в таблице 1 ориентировочно, в целом неполно. Он подлежит уточнению на этапе проработки спецификаций информационного обмена для ТоП.

Представленные в таблице 1 данные включают следующие пункты (далее описание по строкам):

1. Из исходной схемы удаляются элементы собственных нужд и заземляющих устройств. Такое преобразование производится, в частности, на стороне собственника оборудования перед передачей им своих схем на Портал СИМ Системного оператора ЕЭС. Могут удаляться также участки сетей низших классов напряжения.

2. Для построения схем с коммутационными связями (с эквивалентными выключателями) предложено ввести новый класс *EquivalentSwitch*.

3–4. Топологическая схема «узлы – ветви» (*bus-branch*) для расчётов задач может формироваться как из подробных коммутационных схем, так и из схем с коммутационными связями (с эквивалентными выключателями). Алгоритм преобразования в обоих случаях один и тот же.

5. Пролёты между опорами, описанные как объекты класса *ACLineSeriesSection*, объединяются в объекты класса *ACLineSegment*, которые затем преобразуются в объекты класса *Branch*. Класс *ACLineSeriesSection* не принадлежит канонической модели СИМ, он определён в российском профиле моделей данных по ЛЭП и электросетям [6].

6. Объекты класса *TopologicalIsland* получаются стягиванием связных фрагментов модели «узлы – ветви».

Таблица 1 / Table 1

Построение моделей / Building models

<i>№ n/n</i>	<i>Входная модель</i>	<i>Выходная модель</i>	<i>Классы объектов входных данных ТоП</i>	<i>Классы объектов выходных данных ТоП</i>
1	А) Подробная коммутационная схема с заземлениями, с собственными нуждами подстанций	Б) Подробная коммутационная схема без заземлений и без собственных нужд подстанций	<i>ConnectivityNode, Conducting Equipment</i>	<i>ConnectivityNode, Conducting Equipment</i>
2	Б) Подробная коммутационная схема без собственных нужд подстанций и без заземлений	В) Модель схемы с коммутационными связями	<i>ConnectivityNode, Conducting Equipment</i> без объектов класса <i>EquivalentSwitch</i>	<i>ConnectivityNode, Conducting Equipment</i> с объектами класса <i>Switch</i> принадлежащими только подклассу <i>EquivalentSwitch</i>
3	Б) Подробная коммутационная схема без собственных нужд подстанций и без заземлений	Д) Модель «узлы – ветви» (<i>bus-branch</i>)	<i>ConnectivityNode, Conducting Equipment</i> без объектов класса <i>EquivalentSwitch</i>	<i>TopologicalNode, ConnectivityNode, Branch, EquivalentBranch</i>
4	В) Модель схемы с коммутационными связями	Д) Модель «узлы – ветви» (<i>bus-branch</i>)	<i>ConnectivityNode, Conducting Equipment</i> с объектами класса <i>Switch</i> принадлежащими только подклассу <i>EquivalentSwitch</i>	<i>TopologicalNode, ConnectivityNode, Branch, EquivalentBranch</i>
5	Г) Схема электросети с поопорными схемами ЛЭП	Д) Модель «узлы – ветви» (<i>bus-branch</i>)	<i>ConnectivityNode, ACLineSeriesSection, Conducting Equipment</i>	<i>TopologicalNode, ConnectivityNode, Branch, EquivalentBranch</i>
6	Д) Модель «узлы – ветви» (<i>bus-branch</i>)	Е) Схема островов энергосистемы	<i>TopologicalNode, ConnectivityNode, Branch, EquivalentBranch</i>	<i>TopologicalIsland</i>

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Когда какая-либо модель электросети преобразуется в модель более высокого уровня обобщения, параметры объектов выходной модели образуются путём агрегирования параметров объектов входной модели. Для каждого параметра задаётся свой алгоритм агрегирования. Например, если несколько узлов нагрузки сливаются в один узел, то нагрузка результирующего узла получается суммированием нагрузок исходных узлов. Если последовательность пролётов ЛЭП объединяется в один участок класса *ACLineSegment*, то сопротивление результирующего участка определяется как сумма сопротивлений исходных отрезков.

Нечисловые параметры тоже подвергаются агрегированию, но по иным правилам. Так, для именования узлов *TopologicalNode* вводится приоритизация секций шин в пределах каждого распределустройства. При объединении нескольких секций шин в один узел *TopologicalNode* последнему присваивается имя секции шин, имеющей высший приоритет в данной группе секций шин. Поэтому при разделении и слиянии узлов *TopologicalNode* их наименования изменяются. Этот алгоритм описан в стандарте [7]. Для него специально введён класс *BusNameMarker*.

В схемах типа (В) наименования коммутационных связей должны формироваться на основании приоритетов входящих в них коммутационных аппаратов. Наивысший приоритет должен присваиваться выключателю, если он имеется в цепочке КА, образующей коммутационную связь. При переключениях КА наименования коммутационных связей не изменяются, что отличает эти схемы от схем bus-branch.

Агрегирование параметров не входит в функции ТоП в узком смысле, но входит в функции ТоП в широком смысле, поскольку должно выполняться программным компонентом «Оффлайновое построение оперативных моделей электросетей», показанным на рисунке 1.

Определение коммутационного состояния оборудования. При переключениях коммутационных аппаратов может потребоваться обновление всех оперативных схем. Оно осуществляется в реальном времени, в темпе производственного процесса. При этом в схемах А, Б и Г, указанных на рисунке 2, изменяется просто изображение текущего состояния коммутационного аппарата. В схемах В, Д и Е, где состояния коммутационных аппаратов отображаются косвенно, через более крупные графические элементы, информация для определения этих изображений должна формироваться на основе анализа схемы (рисунок 3).

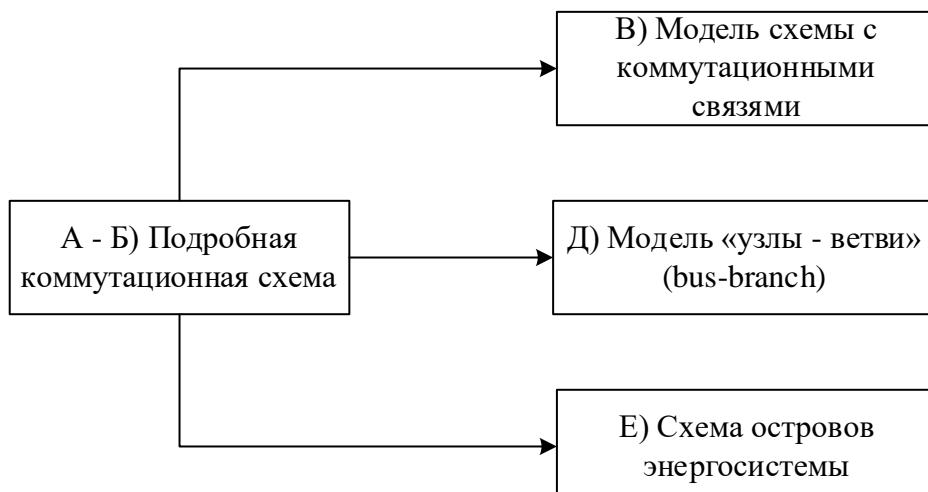


Рис. 3. Обновление оперативных моделей электрической сети при переключении коммутационного аппарата /

Fig. 3. Updating operational models of the electrical network when switching the switching device

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by authors

В схеме с коммутационными связями (В) новое состояние эквивалентного КА определяется по правилу дорасчёта обобщённых телесигналов: он включён, если включены все КА в цепочке, которую он представляет; иначе он отключён.

В моделях Д и Е новое состояние схемы определяется при помощи топологического процессора. В модели «узлы – ветви» Д программа оперативной корректировки модели *определяет*:

– при отключении КА – произошло ли разделение узла, содержавшего отключившийся КА; если разделение произошло, то как ветви, которые были инциденты разделившемуся узлу, распределяются между двумя возникшими узлами;

– при включении КА – слияние двух узлов, содержащих полюсы включившегося КА.

В схеме островов Д программа оперативной корректировки модели *определяет*:

– при отключении КА – произошло ли разделение острова, содержавшего отключившийся КА;
– при включении КА – слияние двух островов, содержащих полюсы включившегося КА.

Состав классов СИМ на входе и на выходе ТоП при информационном обмене с программами оперативной корректировки моделей при переключениях КА тот же самый, что и при обмене с программами первоначального оффлайнового построения моделей. Ориентировочно этот состав указан в таблице 1. Он должен уточняться при разработке спецификаций информационного обмена для ТоП.

Таблица 2 содержит перечень задач распознавания оперативного коммутационного состояния оборудования на основе анализа топологии схемы. Оно соответствует стандартам [8, п. 7.9.1] и [1, п. 5.3]. В таблице 2 также приведён ориентировочный состав СИМ-классов входной и выходной информации ТоП при информационном обмене с этими задачами.

Таблица 2 / Table 2

Задачи анализа моделей / Model analysis problems

<i>№ n/n</i>	<i>Задача</i>	<i>Модель</i>	<i>Классы объектов входных и выходных данных ТоП</i>
1	Определение состояний «под напряжением» / «без напряжения» / «наличие напряжения под вопросом (недостоверные данные)» – для всего оборудования, описанного моделью сети	A) Подробная коммутационная схема с заземлениями, с собственными нуждами подстанций	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment</i>
		B) Модель схемы с коммутационными связями	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment с объектами класса Switch принадлежащими только подклассу EquivalentSwitch</i>
2	Определение состояний «заземлено», «в ремонте», «в резерве» и др. для всего оборудования, описанного моделью сети	A) Подробная коммутационная схема с заземлениями, с собственными нуждами подстанций	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment</i>
		B) Модель схемы с коммутационными связями	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment с объектами класса Switch принадлежащими только подклассу EquivalentSwitch</i>
3	Определение статуса связности с секциями шин для всего оборудования в модели сети	A) Подробная коммутационная схема с заземлениями, с собственными нуждами подстанций	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment</i>
		B) Модель схемы с коммутационными связями	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment с объектами класса Switch принадлежащими только подклассу EquivalentSwitch</i>
4	Определение состояний «под напряжением и нагрузкой» / «под напряжением, но без нагрузки» для всего оборудования, описанного моделью сети	A) Подробная коммутационная схема с заземлениями, с собственными нуждами подстанций	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment</i>
		B) Модель схемы с коммутационными связями	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment с объектами класса Switch принадлежащими только подклассу EquivalentSwitch</i>
5	Обнаружение выделенных, изолированных участков сети	A) Подробная коммутационная схема с заземлениями, с собственными нуждами подстанций	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment</i>
		B) Модель схемы с коммутационными связями	<i>ConnectivityNode, ConductingEquipment с объектами класса Switch принадлежащими только подклассу EquivalentSwitch</i>
		D) Модель «узлы – ветви» (bus-branch)	<i>TopologicalNode, ConnectivityNode, Branch, EquivalentBranch</i>
		E) Схема островов энергосистемы	<i>TopologicalIsland</i>

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by authors

В задачах 1–4 входной и выходной информацией является одна и та же схема, но на выходе обработанные элементы схемы выделяются разным стилем (цветом), представляющим то или иное оперативное коммутационное состояние.

Топологические блокировки. Топологические блокировки – это такие блокировки переключений коммутационных аппаратов в первичных и вторичных цепях электрических сетей, которые определяются положением и состоянием элементов сети, связанных тем или иным образом с переключаемым КА. В современных электросетях топологические блокировки всё чаще реализуются при помощи программируемых контроллеров. Это позволяет внедрять централизованные блокировки универсального характера, основанные на анализе топологии схемы [9]. Такие блокировки не нуждаются в привязке к конкретной схеме при их размещении на энергообъектах. Они используют модель сети и выполняют её топологический анализ.

Входными данными задачи (кроме модели сети) служат идентификатор переключаемого КА и то положение, в которое его нужно переключить – включен / отключён. Выходом служит булевская константа: если она TRUE, то переключение разрешено, если FALSE, то запрещено. При анализе топологии схемы программа блокировки запрашивает функции топологического процессора.

Каждый тип команд на переключение КА контролируется определённым набором правил блокировки. Например, команда «включить выключатель» контролируется одним набором правил, команда «отключить разъединитель» – другим набором и т.п. Программа блокировок проверяет поочерёдно каждое правило из такого списка для поступившей команды. Выполнение команды разрешается, если его разрешают все правила из списка; в противном случае переключение блокируется.

Строго говоря, каждое из правил блокировки требует обследования не всей области сети, которая представлена в модели, а только некоторого её фрагмента. Для разных правил блокировки этот фрагмент имеет разную «протяжённость». Он может быть ячейкой присоединений (*Bay*), распределительным устройством (*VoltageLevel*), подстанцией (*Substation*) или даже группой подстанций и потребителей, связанных линиями электропередачи, районом электросетей (*SubGeographicalRegion*). Перечисленные классы образуют иерархию классов, производных от класса контейнеров оборудования *EquipmentContainer*. Соответствие им областей, на которые простирается контроль в правилах блокировки, подтверждает адекватность этой иерархии.

Программный модуль топологических блокировок может разрабатываться независимо от других компонентов АСТУ. С последними он может обмениваться данными в формате СИМ.

Топологические трассировки. Топологической трассировкой называется выделение на схеме электросети цепей, соединяющих заданные пользователем узлы или группы узлов. Топологические трассировки, как и топологические блокировки, относятся к группе задач топологического анализа схем. Для их полного решения требуется расширение математического аппарата топологического процессора по сравнению с его традиционными возможностями. Для решения почти всех рассмотренных выше задач анализа топологии схем достаточно вычислять компоненты простой связности неориентированных графов. В то же время для полного построения трассировок требуется анализ двусвязности графов [10]. Он необходим для построения трассировок в закольцованных сетях.

Согласно [8, п. 7.9.1], процессор топологии в составе АСТУ Центров управления сетями (ЦУС) должен обеспечивать решение следующих задач трассировок:

- определение запитанных радиально по определенному маршруту элементов сети (сетевых колец);
- определение расположения элемента сети по отношению к источнику питания;
- определение всех элементов сети в исходящем направлении по отношению к выбранному элементу участка сети.

Типичными задачами трассировок являются также запросы на отображение следующих множеств электрических связей на схемах:

- от выбранного узла до центра питания;
- между двумя указанными узлами сети;
- до всех узлов, запитанных от того же центра питания, что и выделенный узел;
- от силового устройства до технологически связанных с ним устройств защиты, с возможностью выделения переключаемых ими коммутационных аппаратов в сторону источников и в сторону потребителей;
- при проверке корректности топологии схемы – от выбранного узла до всех соединенных с ним узлов определенного типа, и т. п.

Как и модуль блокировок, программный модуль топологических трассировок может разрабатываться независимо от других компонентов АСТУ. С последними он может обмениваться данными в формате СИМ.

Входными данными модуля топологических трассировок в общем случае являются (помимо самой модели сети) группы узлов, которые требуется попарно соединить цепями в схеме. Эти вычисляемые множества путей трассировки в графе анализируемой схемы используются управляющим комплексом как для визуализации при отображении трассировок, так и для решения аналитических задач. В больших закольцованных схемах множество путей трассировки в графе схемы может оказаться слишком большим, необозримым для человека и непригодным для машинной обработки. Поэтому было предложено совокупность всех путей трассировок, находимых при решении той или иной задачи, не рассматривать как множество, а образовать объединение этих путей как графов [10]. Полу-

чаемый граф называется *графом трассировок*. Именно он должен рассматриваться в качестве выходной информации модуля построения трассировок.

С точки зрения управления электросетями граф трассировок есть часть схемы, на которой проводятся трассировки. Поэтому он будет состоять из части тех элементов, из которых состоит сама анализируемая схема. Это объекты CIM-классов модели оборудования *ConductingEquipment*, *ConnectivityNode*, *Terminal* и т. д. Когда эти элементы вычислены при помощи графа трассировок, по ним строится отображение трассировок на графической схеме. Таким образом, выходом модуля трассировок является часть исходной схемы, описываемая теми же классами, что и анализируемая схема. Этим обеспечивается возможность CIM-стандартизации выходных данных модуля трассировок.

Послеаварийное восстановление электроснабжения. Автоматизированное восстановление электроснабжения после аварии в распределительной сети производится средствами комплексов САВС/FLISR (САВС – система автоматического восстановления электроснабжения; FLISR – Fault Location, Isolation and Service Restoration). Такой комплекс может функционировать автономно либо быть встроенным в АСТУ. В любом случае он должен обмениваться данными с другими программными агентами.

Послеаварийное восстановление электроснабжения осуществляется в два этапа. На первом производится включение избыточно погашенных участков сети, с последующим переводом оставшихся погашенными потребителей (вообще говоря – не всех) на альтернативные источники питания. Эти операции выполняются частично или полностью автоматикой, после чего производится анализ оптимальности полученной временной схемы электроснабжения. Если схема оказывается неоптимальной при текущих условиях, то производится её реконфигурация вручную.

Второй этап восстановления состоит из следующих шагов:

- 1) точное определение мест повреждений и их изоляция отключением ближайших разъединителей или выключателей нагрузки;
- 2) выявление тех оставшихся погашенными потребителей, которые могут быть запитаны от альтернативных источников по временной схеме на период ремонта повреждённого оборудования, и ручное подключение этих потребителей к альтернативным схемам питания;
- 3) планирование ремонтов повреждённого оборудования;
- 4) выполнение ремонтов повреждённого оборудования с восстановлением нормальной схемы сети.

На обоих этапах восстановления приходится выполнять анализ топологии той области сети, где произошли аварийные отключения. После восстановления питания избыточно погашенных потребителей может оказаться, что при тех же временных послеаварийных условиях можно сконфигурировать схему, более выгодную по показателям потерь электроэнергии и нагрузок на передающее оборудование. Для выявления альтернативных вариантов целесообразно использовать трассировки по неповреждённым цепям от погашенных потребителей к центрам питания. Сами же трассировки означают анализ топологии схемы [10].

При планировании очередности ремонтов и восстановления питания потребителей, которые не могут быть запитаны без ремонта повреждённого оборудования, целесообразно использовать схему островов аварийной области электросети [11]. Она будет особенно полезна в ситуации одновременного повреждения электросети в нескольких местах. Каждый остров является объектом класса *TopologicalIsland*. Комплекс САВС/FLISR может получать систему этих объектов от топологического процессора на разные моменты второго этапа процесса восстановления, что облегчит планирование очередности ремонтов и полного восстановления питания потребителей.

Заключение / Conclusion. Рассмотрение внешних информационных связей топологического процессора и примыкающих к нему прикладных программ подводит к мысли трактовать аналогичным образом и другие программные компоненты АСТУ. Если такой компонент обладает определённой функциональной спецификой и относительной самостоятельностью, то его может поставлять специализированный разработчик. Если такие программно-функциональные компоненты будут CIM-стандартизированы по входным и выходным данным, их можно «бесшовно» компоновать друг с другом для формирования комплекса АСТУ, включая в него только те компоненты, которые функционально необходимы для данного комплекса. Это сделает процесс создания автоматизированных систем управления подобным процессу монтажа подстанций из готовых типовых элементов оборудования. В то время как возможности сопряжения электротехнического оборудования обеспечиваются едиными стандартами на напряжение и частоту переменного тока, возможности интеграции про-

граммных модулей в составе управляющего комплекса будут обеспечены СИМ-стандартизацией входных и выходных данных этих модулей.

Важный вывод из материала работы состоит в том, что истинными агентами информационного обмена являются не энергокомпании, а используемые ими экземпляры программных модулей. Энергокомпании, входящие в информационный пул, нуждаются в едином СИМ-языке для информационного обмена только тогда и лишь по той причине, когда у них работают приложения, использующие данные друг друга, но не обладающие интероперабельностью, т.е. совместимостью по внешним данным, по интерфейсам. Общий СИМ-язык является по сути языком коммуникаций между программными модулями, а не между энергокомпаниями.

Ещё одно важное наблюдение состоит в том, что обмениваться данными программные агенты могут не только напрямую (путём передачи параметров), но и через общую базу данных. Комбинированный способ обмена состоит в передаче в виде параметров адреса и границ области базы данных (например, диапазона классов напряжения) от одного программного модуля к другому для совместной обработки этой области. Всё это наблюдается на примере комплекса топологического процессора с примыкающими к нему прикладными программными компонентами. Однако такой обмен требует СИМ-стандартизации уже не только передаваемых между модулями параметров, но и самого содержащего базы данных. А это означает СИМ-моделирование уже самой предметной области, а не только информации, передаваемой напрямую между агентами. Тем самым осуществляется принципиальный переход от концепции СИМ как языка коммуникаций между агентами к концепции СИМ как языка моделирования предметной области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СТО 56947007-25.040.05.267-2019. Типовые технические требования к ПТК АСДТУ ЦУС для организации функций удаленного управления ПС из центров управления. ПАО «ФСК ЕЭС», 2019. 159 с.
2. Головинский И. А. Объектно-топологическое моделирование электрических сетей // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6. С. 16–26.
3. АСУ ТП КОТМИ. Новое поколение АСУД, АСДУ и АСОДУ. URL: <https://kotmi.ru/platforma-kotmi/> (дата обращения: 20.10.2025).
4. СТО 59012820.27.010.001-2022. АО «СО ЕЭС». Правила отображения технологической информации. 188 с. Available from: <https://informproekt.ru/>
5. IEC 61970-301. Energy management system application program interface (EMS-API)/ Part 301: Common information model (CIM) base. Ed. 7.0, 2020. 558 р.
6. ГОСТ Р 58651.3-2020. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Информационная модель электроэнергетики. Профиль информационной модели линий электропередачи и электросетевого оборудования напряжением 110–750 кВ. М.: Стандартинформ, 2020. 46 с.
7. IEC 61970-456. Energy management system application program interface (EMS-API) / Автоматизированные системы технологического управления Центров управления сетями сетевых организаций. Условия создания. Нормы и требования. Дата введения: 29.12.2022. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 32 с.
8. Топологические блокировки оперативных переключений / И. А. Головинский, М. Ю. Дьяченко, М. И. Лондер, А. В. Тумаков // Электрические станции. 2018. № 7. С. 29–37.
9. Головинский И. А. Автоматизация топологической трассировки цепей на схемах электрических сетей и подстанций // Релейная защита и автоматизация. 2024. № 3. С. 20–29.
10. Головинский И. А. Возможности автоматического восстановления электроснабжения в распределительной сети при группе одновременных повреждений // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2021. № 4. С. 7–16.

REFERENCES

1. STO 56947007-25.040.05.267-2019. Standard Technical Requirements for the ASU PC Software Package of the Grid Control Center for Organizing Remote Control Functions of Substations from Control Centers. FGC UES PJSC, 2019. 159 p. (In Russ.).
2. Golovinskii I. Object-topological modeling of electrical networks. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;(6):16-26. (In Russ.).
3. ASU TP KOTMI. A new generation of SCADA, DMS and OMS. Available from: <https://kotmi.ru/platforma-kotmi/> [Accessed 20 October 2025]. (In Russ.).
4. STO 59012820.27.010.001-2022. JSC "SO UES". Rules for Displaying Process Information. 188 p. (In Russ.).

5. IEC 61970-301. Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 301: Common information model (CIM) base. Ed. 7.0, 2020. – 558 p.
6. GOST R 58651.3-2020. National Standard of the Russian Federation. Unified Energy System and Isolated Power Systems. Information Model of the Electric Power Industry. Profile of the Information Model for Power Transmission Lines and Grid Equipment with Voltage of 110-750 kV. Moscow: Standartinform; 2020. 46 p. (In Russ.).
7. IEC 61970-456. Energy management system application program interface (EMS-API) – Part 456: Solved power system state profiles. (In Russ.).
8. Topological blocking of operational switches / I. A. Golovinsky, M. Y. Dyachenko, M. I. Londer, A.V. Tumakov // Electric stations. 2018. No. 7. pp. 29-37.
9. Golovinskii I. Automation of topological tracing of circuits in electrical network and substation diagrams. Relay protection and automation. 2024;(3):20-29. (In Russ.).
10. Golovinskii I. Possibilities of automatic recovery of power supply in distribution network in case of multiple simultaneous faults. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2021;(4):7-16. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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.

Иван Иванович Надтока – доктор технических наук, профессор, Scopus ID: 56872932800, ResearcherID: ABG-6307-2020

Светлана Сергеевна Костюкова – ассистент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения факультета нефтегазовой инженерии, факультета нефтегазовой инженерии Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57191171319, Researcher ID: OFN-4011-2025..

ВКЛАД АВТОРОВ

Илья Абрамович Головинский

Формирование научной концепции исследования, разработка методологического подхода, научное редактирование, контроль соответствия международным стандартам.

Иван Иванович Надтока

Анализ и систематизация нормативной документации; подготовка разделов, связанных с архитектурой CIM.

Светлана Сергеевна Костюкова

Сбор исходных материалов, подготовка текстовых разделов, разработка иллюстраций и табличного материала.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya A. Golovinskii – Dr. Sci. (Techn.), 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.

Ivan I. Nadtoka – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Scopus ID: 56872932800, ResearcherID: ABG-6307-2020

Svetlana S. Kostyukova – Assistant at the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Faculty of Oil and Gas Engineering; Senior Researcher of the same department; Scopus ID: 58029421300, ResearcherID: OFN-4011-2025.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ilya A. Golovinskii

Formation of a scientific research concept, development of a methodological approach, scientific editing, monitoring of compliance with international standards.

Ivan I. Nadtoka

Analysis and systematization of regulatory documentation; preparation of sections related to the CIM architecture.

Svetlana S. Kostyukova

Collection of source materials, preparation of text sections, development of illustrations and tabular material.