

УДК 621.314

EDN PHNVYH

О ЦИФРОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДСТАНЦИИ 10/0,4 кВ

А.В. Иванов

ORCID: 0000-0001-7360-5930 e-mail: iv_anton95@mail.ru

НТЦ ЕЭС Информационные комплексы

Москва, Россия

Е.Н. Соснина

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Переход от традиционной к интеллектуальной электрической сети (ИЭС) связан с интеграцией электрической и информационной сетей и требует решения проблемы обеспечения информационного взаимодействия интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) и систем автоматизированного управления. Статья посвящена решению проблемы информационного взаимодействия ИЭУ на примере автоматизированного проектирования высокоавтоматизированной подстанции (ВАПС). ВАПС – электротехнический комплекс ИЭС, где для организации управления технологическими процессами используются стандартизированные МЭК информационные модели и цифровой информационный обмен. Разработан алгоритм унифицированного представления однолинейной схемы ВАПС. При этом выявлена необходимость в создании методики расширения стандартизированной Международной электротехнической комиссией (МЭК) *CIM*-модели (*CIM* – *Common Information Model*). Дано краткое описание *CIM*-модели как технологии, реализующей информационное взаимодействие. Рассмотрены подходы к расширению *CIM*-модели, виды расширений и основные правила.

Ключевые слова: высокоавтоматизированная подстанция, *CIM*-модель, SCL, цифровое проектирование, алгоритм, интеллектуальная электрическая сеть

Для цитирования: Иванов А.В., Соснина Е.Н. К вопросу цифрового проектирования высокоавтоматизированной подстанции 10/0,4 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 112-121. EDN PHNVYH

ABOUT DIGITAL DESIGN OF HIGHLY AUTOMATED 10/0,4 kV SUBSTATION

A.V. Ivanov

ORCID: 0000-0001-7360-5930 e-mail: iv_anton95@mail.ru

STC UPS Information complexes

Moscow, Russia

E.N. Sosnina

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A digital substation (DS) is an electrotechnical component of a Smart Grid. The transition to a Smart Grid involves the integration of electrical and information networks, which necessitates addressing the issue of interoperability between intelligent electronic devices (IEDs) and automation systems. To this end, the authors set out to develop an algorithm for the unified representation of the DS single-line diagram. During the development of this algorithm, the need for a methodology to extend the Common Information Model (CIM), standardized by the International Electrotechnical Commission (IEC), was identified. The article provides a brief overview of the CIM as a technology for enabling interoperability. It also outlines possible approaches to extending the CIM, the types of extensions, and the key rules for their implementation.

Keywords: digital substation, CIM, SCL, digital design, algorithm, smart grid.

For citation: A.V. Ivanov and E.N. Sosnina, “About digital design of highly automated 10/0,4 kV substation”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 112-121, 2025. EDN PHNVYH

I. Введение

Одним из приоритетных направлений научно-технологического развития России является высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика. Для данного направления критически важными технологиями являются высокоэффективные системы генерации, распределения и хранения энергии [1]. Сама электроэнергетическая система должна трансформироваться из централизованной в централизованно-распределенную и объединить на базе цифровизации технологическую, управляющую и рыночную системы [2].

На уровне энергообъектов трансформация может быть представлена как переход от электрических подстанций (ПС) традиционной электрической сети к высокоавтоматизированным электрическим подстанциям (ВАПС) интеллектуальной электрической сети (ИЭС). Одной из главных

особенностей ИЭС является интеграция электрической и информационной сетей [3]. Для перехода к ИЭС должна быть сформирована единая цифровая информационная среда, объединяющая множество интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) и систем автоматизированного управления [4]. Если не использовать единые подходы к организации информационного взаимодействия, то сложность объединения с каждым добавляемым в информационную среду ИЭУ или с системой кратно возрастает. Поэтому вопросы структурирования данных, формата их представления и организации передачи необходимо учитывать уже на стадии проектирования.

Для информационной совместимости ИЭУ и систем автоматизации необходимо использовать стандартизированные подходы. Подходы по организации информационного взаимодействия приведены в серии стандартов МЭК 61850 и сериях 61970 и 61968, описывающих *CIM*-модель (*Common Information Model*) – это общая информационная модель, описывающая ключевые элементы энергосистемы, их характеристики и взаимосвязи [5, 6].

ВАПС – подстанция, на которой для организации управления технологическими процессами и реализации взаимодействия вторичных систем используются стандартизированные МЭК информационные модели и цифровой информационный обмен. При организации проектирования ВАПС типовым проектным документом является ее однолинейная схема. Согласно требованиям МЭК 61850 для представления данных об однолинейной схеме ВАПС (единицы электрооборудования и их гальванические соединения) должен использоваться язык разметки *SCL* (*System Configuration Language*) [7], благодаря которому данные однолинейной схемы могут быть обработаны автоматически.

Однако, в соответствии с [8], в основе цифровой информационной модели ИЭС лежит *CIM*-модель, где для возможности автоматической обработки данных об однолинейной схеме используется *RDF/XML* (*RDF* – *Resource Description Framework* – структура описания ресурсов; *XML* – *eXtensible Markup Language* – расширяемый язык разметки) [9].

Для учета требований [7-9] была поставлена цель: разработать алгоритм унифицированного представления однолинейной схемы ВАПС для информационного обмена в составе проектной системы ВАПС.

На рис. 1 дано схематичное представление связи проектной системы ВАПС с информационными моделями МЭК 61850 и *CIM*-модели.

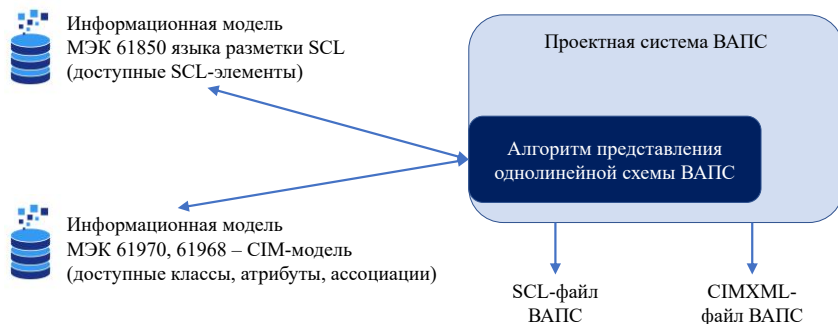


Рис. 1. Схематичное представление связи проектной системы ВАПС с информационными моделями МЭК 61850 и CIM-модели

Fig. 1. Schematic representation of the relation between the digital substation design system and the IEC 61850 and CIM

При разработке алгоритма представления однолинейной схемы ВАПС (рис. 2) возникла необходимость в методике расширения стандартной CIM-модели [4] (здесь и далее под словосочетанием «стандартная CIM-модель» будет подразумеваться CIM-модель, разработанная МЭК. Соответственно содержащиеся в ней классы, атрибуты и ассоциации также считаются «стандартными»).

Было выявлено, что используемый в рамках ГОСТ подход к расширению CIM-модели отличается от подхода, принятого МЭК. Расширения, сделанные в рамках ГОСТ, редактируют стандартную CIM-модель, что недопустимо. В результате существенно усложняется задача автоматизированного обновления версии используемой в российских системах автоматизации стандартной CIM-модели (при выпуске МЭК обновленной версии стандартной CIM-модели).

II. Краткое описание CIM-модели

CIM-модель – стандартизированная МЭК семантическая информационная модель, описывающая данные, используемые автоматизированными системами для управления и анализа состояния электроэнергетической системы (например, расчет установившихся режимов). Термин «семантическая» означает, что информационная модель, помимо структурирования данных, также регламентирует их смысл.

CIM-модель использует объектно-ориентированный подход, т.е. фактически является совокупностью классов, их атрибутов и связывающих их ассоциаций, которые описывают:

- электроустановки и электрооборудование (электрические ПС, трансформаторы, линии электропередачи и др.);
- электрические аппараты (выключатели, разъединители и др.);

- электрические соединения;
- электроустановки и электрооборудование (электрические ПС, трансформаторы, линии электропередачи и др.);
- электрические аппараты (выключатели, разъединители и др.);
- электрические соединения и др.

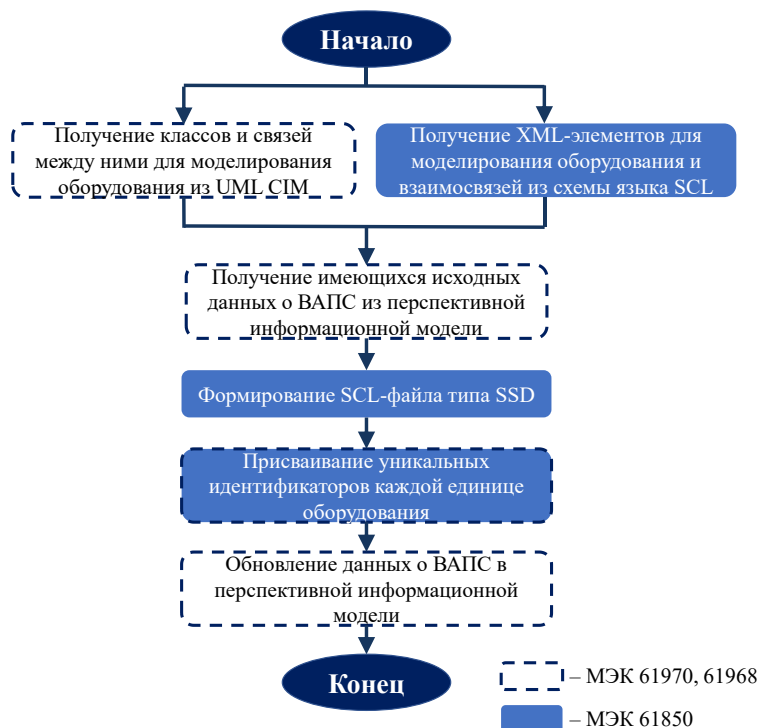


Рис. 2. Алгоритм представления однолинейной схемы ВАПС с учетом требований МЭК 61850, 61970 и 61968

Fig.2. Algorithm for representing the digital substation single-line diagram considering the requirements of IEC 61850, 61970, and 61968

Для визуального представления *CIM*-модели используется *UML*-диаграммы классов (*UML-Unified Modeling Language* – унифицированный язык моделирования).

На рис. 3 в качестве примера представлена часть стандартной *CIM*-модели: классы *Substation* и *VoltageLevel* и связь между ними. С помощью класса *Substation* может быть представлена ПС, а с помощью *VoltageLevel* – распределительные устройства (РУ). Связь показывает, что при цифровом

моделировании у ПС может быть указано множество РУ, а у каждого РУ – должна быть указана ПС. Класс *VoltageLevel* содержит два атрибута – *highVoltageLimit* и *lowVoltageLimit*, используемые для хранения максимально и минимально допустимого для РУ напряжения.

Как видно из приведенного примера, смысл (семантика) данных задается через наименования классов, наименования атрибутов, расположения атрибутов и связи между классами.

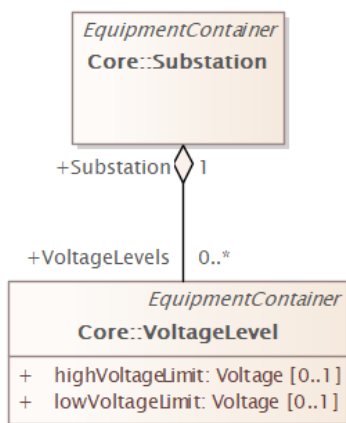


Рис. 3. Часть стандартной CIM-модели
(классы *Substation* и *VoltageLevel*)

Fig. 3. Part of standard CIM (Substation and VoltageLevel classes)

III. Подходы к расширению стандартной CIM-модели

Виды расширений

При разработке расширений они должны быть явно отделены от стандартной CIM-модели и идентифицированы собственным, уникальным пространством имен. Это необходимо для обеспечения «модульности» и, как результат, возможности автоматизировано перенести расширения в обновленную версию стандартной CIM-модели. Можно выделить два подхода к расширению: через мультинаследование и через ввод нового подкласса. При первом подходе вводится новый класс, где содержится новый атрибут или с которым связана новая ассоциация. От этого нового класса наследуется стандартный класс (рис. 4).

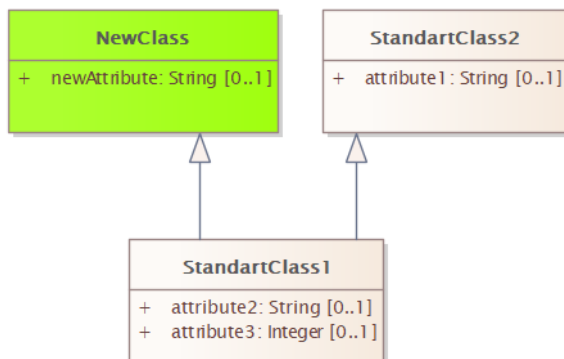


Рис. 4. Пример расширения CIM-модели через мультинаследование

Fig. 4. An example of CIM extension through multiple inheritance

При втором подходе через наследование от стандартного класса водится новый подкласс. Данный подкласс содержит новый атрибут или связан с новой ассоциацией (рис. 5).

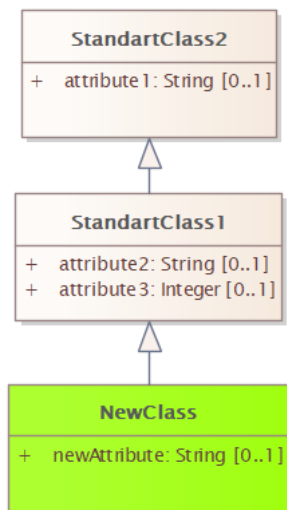


Рис. 5. Пример расширения CIM-модели через ввод нового подкласса

Fig. 5. An example of CIM extension through sub-typing class

При втором подходе создается риск конфликта при будущих расширениях, поэтому предпочтительным является первый подход.

Виды расширений и правила сведены в табл. 1.

Таблица 1.
Виды расширений и правила

Table 1.
Types of extensions and rules

Вид расширения	Мультинаследование	Основные правила
Ввод нового класса	Не требуется	Новый класс должен быть закреплен за отдельным пространством имен
Ввод ассоциации между новым и стандартным классом	Не требуется	Ассоциация должна быть направлена от нового класса к стандартному классу
Ввод нового атрибута в стандартный класс	Требуется	Новый (расширяющий) класс должен быть закреплен за отдельным пространством имен.
Ввод новой ассоциации между стандартными классами	Требуется	Новый (расширяющий) класс должен иметь такое же наименование, как и стандартный класс

IV. Выводы

При проектировании ВАПС должны учитываться требования международных стандартов МЭК 61850, 61970 и 61968. Это необходимо для обеспечения единой цифровой информационной среды ИЭС. Из-за разности используемых МЭК 61850 и CIM-моделью форматов представления данных об однолинейной схеме становится актуальной разработка унифицирующего алгоритма. Алгоритм должен опираться на имеющиеся в CIM-модели классы, атрибуты и ассоциации, предназначенные для моделирования электрооборудования и электроустановок.

Особенности российской электроэнергетики требуют разработки расширения стандартной CIM-модели. Но добавление новых классов, атрибутов и ассоциаций должно выполняться так, чтобы расширения могли быть легко перенесены в обновленную версию стандартной CIM-модели.

Выделены виды расширений. Для каждого вида указаны используемые подходы и основные правила выполнения. Дальнейшие исследования направлены на практическое применение рассмотренных подходов и правил.

Поступила в редакцию 12.05.2025

Принята к публикации 10.06.2025

Received 12.05.2025

Accepted 10.06.2025

Библиографический список

- [1] Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/>
- [2] Подковальников С.В. Смена парадигмы управления электроэнергетическими системами // *Электричество*. 2024. №3. С. 4-15. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-4-15
- [3] Наумов В.А., Матисон В.А., Федоров Ю.Г. Новые направления развития стандартизации в процессе цифровой трансформации электроэнергетики // *Энергия единой сети*. 2022. № 3-4 (64-65). С. 20-29.
- [4] Иванов А.В., Соснина Е.Н. Об информационной составляющей интеллектуальной электрической сети а // *Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: сборник материалов XVI Всероссийской научно-техн. конф.* – Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2025 (в печати).
- [5] Головинский И.А. Объектно-топологическое моделирование электрических сетей // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2024. № 6 (105). С. 16 – 26. DOI: 10.37493/2307-907X.2024.6.2
- [6] Черкасский П., Попов С. Риски применения электротехнических комплексов на основе СИМ-модели (МЭК 61970, МЭК 61968) в сетевом комплексе России // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2023. № 4 (31). С. 36 – 41.
- [7] ГОСТ Р МЭК 61850-6–2009. Изм. 1. Сети и системы связи на подстанциях – Часть 6: Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях. Введ. 2018-06. МЭК: 2018. – 274 с.
- [8] Федеральный закон от 11.06.2022 № 174-ФЗ. «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/>
- [9] МЭК 61970-552. Интерфейс прикладных программ систем энергетического менеджмента (EMS-API) – Ч. 552: Обмен моделями в формате CIMXML. Введ. 2016-09. МЭК: 2016. – 76 с.

References

- [1] Order of the President of the Russian Federation dated June 18, 2024 no. 529 “*Ob utverzhdenii prioritetnykh napravlenij nauchno-tehnologicheskogo razvitiya i perechnya vazhnejshih naukoemkih tekhnologij* [On approval of priority directions of scientific and technological development and the list of the most important science-intensive technologies]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/> (in Russian).
- [2] S.V. Podkovaľnikov, “A shift of the electric power system control paradigm”, *Electricity*, no. 3, pp. 4-15, Jan. 2024. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-3-4-15

- [3] V.A. Naumov, V.A. Matison and Y.G. Fedorov, “Novye napravleniya razvitiya standartizacii v processe cifrovoj transformacii elektroenergetiki [New directions of standardization development in the process of digital transformation of the electric power industry]”, *Energiya edinoj seti [Energy of a single grid]*, no. 3-4 (64-65), pp. 20-29, 2022 (in Russian).
- [4] A.V. Ivanov and E.N. Sosnina, “Ob informacionnoj sostavlyayushchej intelektual'noj elektricheskoy seti [On the information component of the smart grid]”, in proc. *Dinamika nelinejnyh diskretnyh elektrotekhnicheskikh i elektronnyh sistem [Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems]: collection of materials XVI All-Russian Scientific and Technical Conf.*, Cheboksary, Russia, 2025. (in Russian).
- [5] I.A. Golovinskii, “Object-topological modeling of electrical networks”, *Newsletter of North-Caucasus Federal University*, no. 6 (105), pp. 16-26, 2024. DOI: 10.37493/2307-907X.2024.6.2
- [6] P. Cherkassky and S. Popov, “Riski primeneniya elektrotekhnicheskikh kompleksov na osnove CIM-modeli (MEK 61970, MEK 61968) v setevom komplekse Rossii [Risks of application of electrical complexes based on CIM-model (IEC 61970, IEC 61968) in the network complex of Russia]”, *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution]*, no. 4 (31), pp. 36-41, 2023 (in Russian).
- [7] Substation communication networks and systems - Part 6: Configuration description language for communication between intelligent electronic devices in electrical substations, GOST R MEC 61850-6-2009, June 2018.
- [8] Federal Law No. 174-FZ dated 11.06.2022. “O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon «Ob elektroenergetike» i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii. [On Amendments to the Federal Law «On Electric Power Industry» and Certain Legislative Acts of the Russian Federation]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/> (in Russian).
- [9] Energy Management Systems Application Program Interface (EMS-API) - Part. 552: Model Exchange in CIMXML Format, IEC 61970-552, September 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Антон Валерьевич, старший аналитик НТЦ ЕЭС «Информационные комплексы», Москва, Российская Федерация.

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton V. Ivanov, senior analyst of STC UPS Information complexes, Moscow, Russian Federation.

Elena N. Sosnina, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.