

УДК 621.315.687.22

EDN XWGVAI

**РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ЯЧЕЙКИ  
КОМПЛЕКТНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО  
УСТРОЙСТВА НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ  
С ТВЕРДОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

**Д.И. Ковалев**

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm1@mpei.ru  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

**А.А. Нестеренко**

ORCID: 0009-0003-1522-3530 e-mail: nesterenkoala@mpei.ru  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

**Д.А. Кругликов**

ORCID: 0009-0008-4376-535X e-mail: kruglikovdma@mpei.ru  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

**С.В. Граудынь**

ORCID: 0009-0009-1449-5167 e-mail: graudynsv@mpei.ru  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

Проведено расчетное моделирование распределения напряженности электрического поля в элементах ячейки комплектного распределительного устройства напряжением 10 кВ с твердой экранированной изоляцией. Рассмотрены силовые элементы первичной цепи (шинный модуль и трехпозиционный выключатель-разъединитель); разработаны и упрощены их 3D-модели, выполнены расчеты методом конечных элементов. Проведен параметрический анализ влияния толщины изоляции и диаметра шин на максимальные значения напряженности в объеме изоляции, по результатам сформулированы рекомендации по снижению локальных максимумов электрического поля в критических зонах сопряжения металл-изоляция-воздух.

**Ключевые слова:** высоковольтное оборудование; твердая изоляция; электрическая прочность; электрическое поле; ячейка КРУТ.

**Для цитирования:** Ковалев Д.И., Нестеренко А.А., Кругликов Д.А., Граудынь С.В. Расчетное моделирование распределения электрического поля в элементах ячейки комплектного распределительного устройства напряжением 10 кВ

с твердой экранированной изоляцией // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 2. С. 124-138. EDN XWGVAI

## COMPUTATIONAL MODELING OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN COMPONENTS OF 10 kV SOLID INSULATED SWITCHGEAR WITH GROUNDED SHIELD

**D.I. Kovalev**

ORCID: 0009-0009-0920-5129 e-mail: kovalevdm@mpei.ru

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**A.A. Nesterenko**

ORCID: 0009-0003-1522-3530 e-mail: nesterenkoala@mpei.ru

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**D.A. Kruglikov**

ORCID: 0009-0008-4376-535X e-mail: kruglikovdma@mpei.ru

H National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**S.V. Graudyn**

ORCID: 0009-0009-1449-5167 e-mail: graudynsv@mpei.ru

National Research University «MPEI»

*Moscow, Russia*

**Abstract.** This paper presents computational modeling of electric field distribution in key components of a 10 kV solid insulated switchgear with a grounded shield. The primary-circuit power components under study include a busbar module and a three-position switch-disconnector. Detailed 3D CAD models were developed and subsequently simplified to reduce computational cost while preserving the field-forming geometry. Electric field calculations were performed using the finite element method. A parametric study was conducted to quantify the effect of solid insulation thickness and busbar diameter on the peak electric field strength within the insulation volume. Based on the obtained dependencies, practical recommendations are proposed to mitigate local electric-field maxima in critical regions associated with metal–insulation–air interfaces and electrode edges.

**Keywords:** high-voltage equipment; solid insulation; dielectric strength; electric field; solid insulated switchgear with grounded shield.

**For citation:** D.I. Kovalev, A.A. Nesterenko, D.A. Kruglikov and S.V. Graudyn, “Computational modeling of electric field distribution in components of 10 kV solid

insulated switchgear with grounded shield”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 124-138, 2026. EDN XWGVAI

## I. Введение

Современные исследования в области электротехники и энергетики направлены на повышение надежности, безопасности и экологичности оборудования среднего и высокого напряжения [1-5]. Особое значение приобретает в настоящее время применение комплектных распределительных устройств (КРУ) с твердой изоляцией, позволяющих отказаться от использования элегаза ( $SF_6$ ) и снизить габариты оборудования при сохранении или повышении его рабочих характеристик [6]. Одним из ключевых факторов надежности и долговечности КРУ является уровень электрической напряженности в объеме изоляции. Превышение допустимых значений приводит к развитию частичных разрядов, деградации материала и в конечном итоге – к отказу оборудования. Поэтому уже на этапе проектирования необходимо проводить моделирование распределения электрического поля с целью определения безопасных и эффективных конструктивных решений [7].

В последние годы значительное внимание уделяется численному моделированию электрических полей в распределительных устройствах среднего напряжения. В [2, 3] рассматриваются современные тенденции развития КРУ, включая переход к экологически безопасным изоляционным решениям и отказ от элегаза. В [8, 9] представлены результаты расчетов электрических полей в моноблочных ячейках с твердой изоляцией, где показано существенное влияние геометрии токоведущих элементов на локальные максимумы напряженности. Вместе с тем, в данных работах недостаточно подробно рассмотрены особенности распределения электрического поля в конструкциях с твердой экранированной изоляцией ( $2SIS$ ), характеризующихся наличием заземленного проводящего экрана и замкнутой изоляционной системы. В частности, ограничено количество работ по параметрической оптимизации геометрии токоведущих элементов по критерию максимальной напряженности в объеме полимерной изоляции.

Настоящая работа, проведенная в продолжение ранее опубликованных исследований, направлена на выполнение трехмерного расчетного моделирования электрического поля в выключателе и шинном модуле ячейки 10 кВ. В ней рассмотрены различные значения толщины твердой полимерной изоляции, а также исследовано влияние внешнего и внутреннего диаметра шины на распределение поля [8, 9].

## II. Сравнительный анализ существующих конструкций комплектных распределительных устройств

Выбор объекта исследования выполнен на основе сопоставления основных технологических подходов, применяемых в КРУ среднего напряжения: с воздушной изоляцией (*AIS*), газовой изоляцией (*GIS*), твердой изоляцией (*SIS*) и твердой экранированной изоляцией (*2SIS*). Сравнение проводилось по ключевым эксплуатационно-конструкторским критериям, определяющим применимость решения в условиях энергетики: габариты и компоновочные возможности, устойчивость к внешним воздействиям, требования к обслуживанию и ремонтпригодности, а также факторы электрической и эксплуатационной безопасности. Обобщенные достоинства и недостатки указанных технологий приведены в табл. 1.

*Таблица 1.*  
Достоинства и недостатки конструкций КРУ

*Table 1.*  
Advantages and disadvantages of switchgear designs

Технология	Достоинства	Недостатки
КРУ с воздушной изоляцией ( <i>AIS</i> )	– простота конструкции; – не высокая стоимость.	– большие габариты; – низкая стойкость к атмосферным явлениям; – возможность возникновения межфазных коротких замыканий; – наличие в шкафу открытых проводников с высоким потенциалом
КРУ с газовой изоляцией ( <i>GIS</i> )	– малые габариты; – защищенность от внешних условий;	– относительно большая стоимость; – сложность эксплуатации и ремонта
КРУ с твердой изоляцией ( <i>SIS</i> )	– компактность и универсальность; – защищенность от внешних условий	– ухудшение отвода тепла; – вынос потенциала за твердую изоляцию, к воздушным промежуткам
КРУ с твердой экранированной изоляцией ( <i>2SIS</i> )	– минимальные габариты; – высокая безопасность; – отсутствие открытых токоведущих частей; – не требует обслуживания; – защищенность от внешних условий	– сложность разработки технических решений по облегчению тепловых режимов и повышению надежности работы изоляции

Независимо от типа изоляционной системы (*AIS*, *GIS*, *SIS*, *2SIS*) в распределительных устройствах напряжением 6-35 кВ в настоящее время преимущественно применяются вакуумные выключатели как коммутационные аппараты. Вакуумная дугогасительная камера обеспечивает высокую коммутационную стойкость, экологическую безопасность и длительный ресурс эксплуатации [10]. Вместе с тем, применение вакуумной коммутационной техники сопровождается рядом особенностей: возможностью возникновения коммутационных перенапряжений при отключении индуктивных нагрузок, повышенными требованиями к координации изоляции, а также необходимостью оптимизации распределения электрического поля в зонах сопряжения токоведущих элементов с твердой изоляцией. Эти факторы особенно актуальны для конструкций с твердой экранированной изоляцией, где локальные максимумы напряженности могут определять ресурс изоляционной системы [10].

Анализ данных табл. 1 показывает, что *AIS* характеризуется простой и сравнительно низкой стоимостью, однако уступает по габаритам и уровню защищенности: открытые проводники и воздушные промежутки повышают чувствительность к атмосферным факторам и увеличивают риск межфазных перекрытий. *GIS*, напротив, обеспечивает компактность и высокую защищенность от внешних воздействий, но сопровождается повышенной стоимостью и усложнением эксплуатации и ремонта. *SIS* как класс решений сочетает компактность и универсальность, однако для твердой изоляции актуализируются ограничения по тепловому режиму, а также требования к управлению распределением потенциала и напряженности поля в зонах сопряжения «металл-изоляция-воздух». Наиболее выраженные преимущества по совокупности критериев демонстрирует *2SIS*: минимальные габариты, высокая безопасность за счет отсутствия открытых токоведущих частей, сниженные требования к обслуживанию и высокая защищенность от внешних условий. При этом ключевым ограничением *2SIS* является повышенная сложность конструкторской проработки, направленной на обеспечение допустимых тепловых режимов и надежной работы изоляции с исключением поверхностных (настильных) разрядов.

Под твердой экранированной изоляцией (*2SIS* – *Shielded Solid Insulated System*) в настоящей работе понимается изоляционная система, в которой токоведущие элементы полностью заключены в объем твердого полимерного диэлектрика, а поверх изоляционного слоя размещен заземленный проводящий экран.

Наличие экрана обеспечивает формирование контролируемого распределения потенциала и локализацию электрического поля внутри объема изоляции, что исключает вынос потенциала в воздушные промежутки и наличие открытых токоведущих частей.

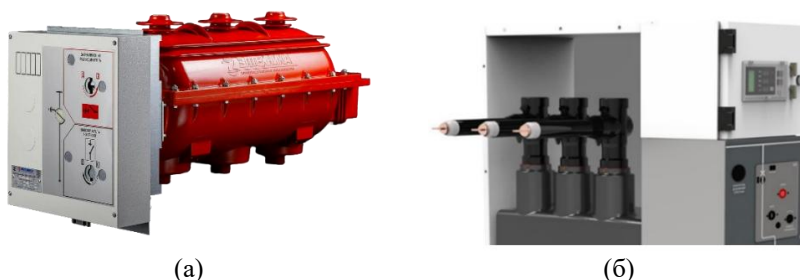
В отличие от систем с твердой неэкранированной изоляцией (*SIS*), экранированное исполнение позволяет управлять конфигурацией электрического поля и снижать вероятность развития поверхностных и частичных разрядов.

Таким образом, выбор ячейки КРУ 10 кВ с твердой экранированной изоляцией как объекта исследования обусловлен ее преимуществами по компактности и безопасности при одновременной актуальности задач расчетной оценки и оптимизации распределения электрического поля в критических зонах, определяющих электрическую прочность и ресурс изоляционной системы.

### III. Формирование расчетных моделей элементов ячейки 10 кВ

Элементы ячейки 10 кВ были выбраны, исходя из актуальности применяемых технических решений в сегменте КРУ среднего напряжения, распространенности конструктивных исполнений на российском рынке и доступности базовых моделей/габаритных чертежей, достаточных для последующего построения параметризованных 3D-моделей и проведения численного анализа [11-16]. При формировании составной модели учитывались прежде всего элементы первичной цепи, определяющие геометрию токоведущих частей и характер их взаимного расположения: именно эти факторы, задают уровни и локальные максимумы напряженности электрического поля в объеме твердой изоляции и в воздушных зазорах, а также формируют «критические» зоны у кромок электродов и в областях сопряжения металл-изоляция-воздух.

К основным элементам ячеек КРУ, оказывающим наибольшее влияние на конфигурацию электрических полей, в рамках настоящего исследования отнесены и шинный модуль (рис. 1).



**Рис. 1.** Силовые элементы рассматриваемой ячейки:  
(а) трехпозиционный выключатель; (б) шинный модуль

**Fig. 1.** Power elements of the considered 10 kV cell:  
(a) three-position switch; (b) busbar module

За основу шинного модуля принята компоновка *Systeme Electric* как серийное модульное решение, ориентированное на применение унифицированных узлов стыковки и крепления. Такой подход обеспечивает воспроизводимую геометрию токоведущих частей и стабильность электрических зазоров в зоне шинных соединений, что принципиально важно для корректного сравнения вариантов при численном анализе электрического поля. Унификация облегчает последующую параметризацию 3D-модели, что повышает эффективность оптимизационных расчетов и переносимость полученных рекомендаций на серийное исполнение. В качестве аппарата на базе  $SF_6$  для 10 кВ выбран трехпозиционный выключатель-разъединитель *ESQ FLN36-12D/630-20*, обеспечивающий положения «включено-отключено-заземлено» и тем самым упрощающий безопасное обслуживание присоединения [14]. Дополнительно выбор обусловлен применением аппарата в типовых решениях производителя «Элтехника», что снижает риски интеграции и упрощает комплектование и обслуживание.

Для выполнения расчетов для каждого из выбранных элементов были разработаны трехмерные модели. Высокая детализация разработанных геометрий приводит к росту вычислительной трудоемкости, что обусловлено необходимостью построения конечно-элементной сетки (КЭС) повышенной плотности и увеличением времени численного решения при моделировании методом конечных элементов (МКЭ).

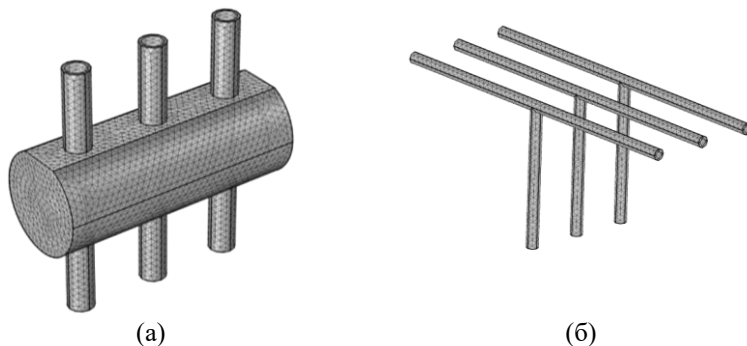
С целью снижения требований к вычислительным ресурсам выполнена геометрическая оптимизация моделей всех рассматриваемых элементов. Оптимизация заключалась в удалении конструктивных деталей и узлов, оказывающих незначительное влияние на распределение электрического поля и итоговые расчетные показатели.

Корректность подготовки геометрии и возможность генерации КЭС были проверены в расчетной постановке МКЭ: после импорта геометрических объектов сетка была построена без ошибок. Модели с построенной КЭС приведены на рис. 2.

#### **IV. Расчетное моделирование распределения напряженности электрического поля в отдельных элементах ячеек 10 кВ**

Расчеты для элементов ячейки 10 кВ выполнены при задании тока  $I = 2,5$  кА и действующего значения напряжения  $U = 8,57$  кВ ( $U = 10,5 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$  кВ).

Для наглядного представления результатов рассмотрено распределение напряженности электрического поля в поперечном сечении токоведущей шины. Максимальные значения напряженности ЭП в объеме изоляции сведены в табл. 2.



**Рис. 2. Модели отдельных элементов ячейки:**  
(а) вакуумный выключатель; (б) шинный модуль

**Fig. 2. Models of individual cell elements:**  
(a) vacuum circuit breaker; (b) busbar module

**Таблица 2.**

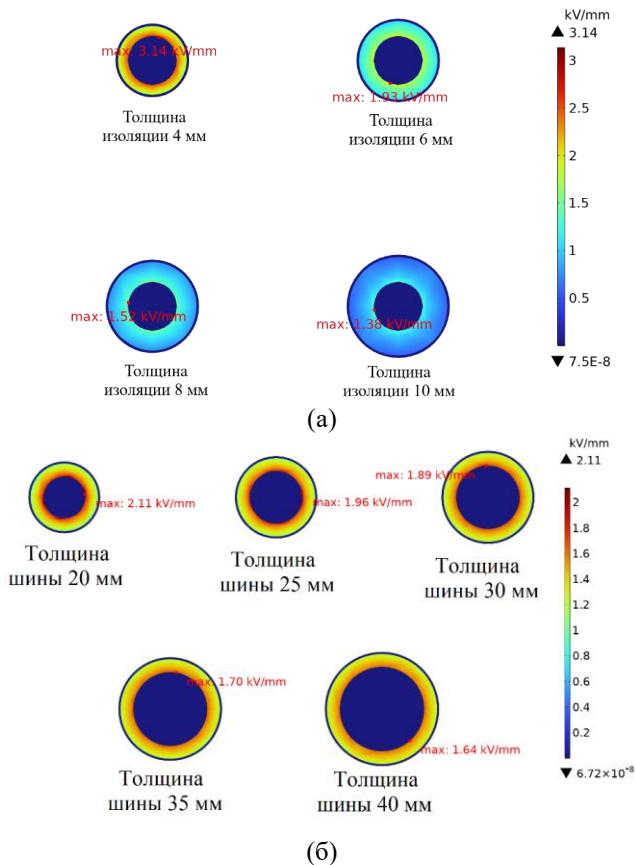
**Распределение напряженности ЭП в шинах ячейки 10 кВ**

**Table 2.**

**Electric field strength distribution in the busbars of a 10 kV cell**

Толщина изоляции, мм	Максимальное значение напряженности ЭП в объеме изоляции, кВ/мм
4	3,14
6	1,93
8	1,52
10	1,38
Диаметр шины, мм	Максимальное значение напряженности ЭП в объеме изоляции, кВ/мм
20	2,11
25	1,96
30	1,89
35	1,70
40	1,64

При варьировании толщины изоляции и диаметра шины получены максимальные значения напряженности электрического поля в объеме твердой изоляции, представленные на рис. 3.



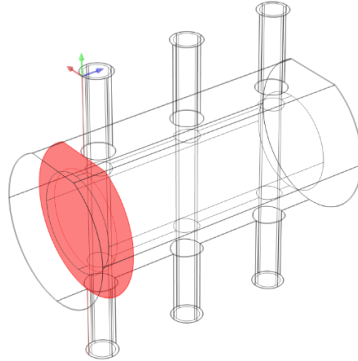
**Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля в сечении шины ячейки 10 кВ в зависимости от:**

(а) толщины изоляции; (б) диаметра шины при толщине изоляции 6 мм

**Fig. 3. Electric field strength distribution in the busbar cross-section of a 10 kV cell depending on:**

(a) insulation thickness; (b) busbar diameter at an insulation thickness of 6 mm

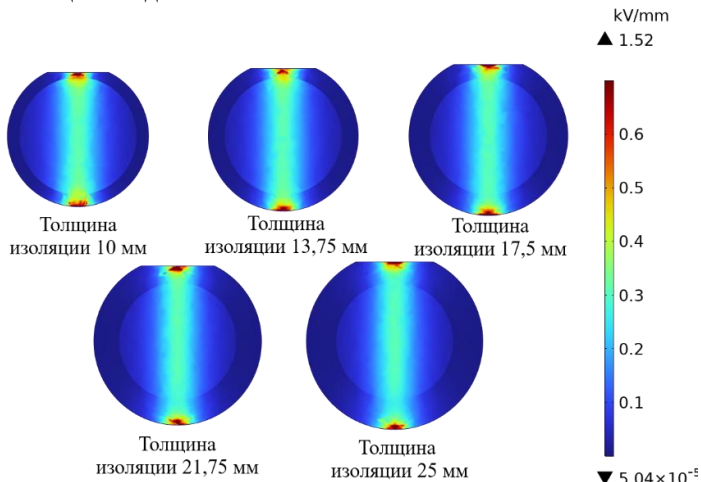
Для визуализации распределения напряженности электрического поля в выключателе ячейки 10 кВ рассмотрим поперечное сечение по секущей плоскости, показанной на рис. 4.



**Рис. 4. Секущая плоскость, вдоль которой проводился расчет распределения напряженности электрического поля в выключателе ячейки 10 кВ**

**Fig. 4. Cutting plane used to calculate the electric field strength distribution in the 10 kV cell circuit breaker**

Результаты расчета распределения напряженности электрического поля в выключателе ячейки 10 кВ при изменении толщины изоляционного слоя приведены на рис. 5. Максимальные значения напряженности ЭП в объеме изоляции сведены в табл. 3.



**Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля в выключателе ячейки 10 кВ при изменении толщины изоляции**

**Fig. 5. Electric field strength distribution in the 10 kV cell circuit breaker when changing insulation thickness**

**Таблица 3.**  
**Распределение напряженности ЭП в выключателе**

**Table 3.**  
**Electric field strength distribution in the circuit breaker**

Толщина изоляции, мм	Максимальное значение напряженности ЭП в объеме изоляции, кВ/мм
10	1,52
13,75	0,978
17,5	1,51
21,75	1,09
25	1,13

Полученные значения максимальной напряженности электрического поля в выключателе изменяются немонотонно при варьировании толщины изоляции. Минимальное значение 0,978 кВ/мм соответствует толщине 13,75 мм. При дальнейшем увеличении толщины наблюдается рост локальных максимумов напряженности, что связано с перераспределением поля в области сопряжения токоведущего элемента и экранирующей поверхности.

В отличие от шинного модуля, обладающего близкой к цилиндрической симметрии, конструкция выключателя характеризуется пространственной неоднородностью и наличием краевых эффектов. Именно геометрическая сложность приводит к возникновению локальных концентраций поля, чувствительных к изменению толщины изоляционного слоя.

Таким образом, для выключателя 10 кВ увеличение толщины изоляции не всегда приводит к монотонному снижению максимальной напряженности электрического поля; существует оптимальный диапазон толщин, обеспечивающий минимальные значения локальных максимумов.

### V. Выводы

Расчетное моделирование электрического поля показало, что для шинного модуля ключевым параметром снижения максимальной напряженности в объеме изоляции является толщина изоляционного слоя: для 10 кВ напряженность уменьшается с 3,14 до 1,38 кВ/мм при увеличении толщины с 4 до 10 мм. Увеличение диаметра токоведущей шины дополнительно снижает напряженность поля, однако эффект выражен слабее по сравнению с влиянием толщины изоляции: при фиксированной толщине изоляции 6 мм увеличение диаметра с 20 до 40 мм снижает напряженность с 2,11 до 1,64 кВ/мм.

Для выключателя 10 кВ максимальная напряженность электрического поля в объеме изоляции по результатам расчетов находится в диапазоне 0,978-1,52 кВ/мм; минимальное значение 0,978 кВ/мм получено при толщине внешней изоляции 13,75 мм, при толщине 10 мм напряженность составляет 1,52 кВ/мм.

По результатам выполненных расчетов электрического поля наиболее предпочтительные геометрические параметры соответствуют верхним границам рассмотренных вариантов по толщине изоляции: для шинного модуля толщина изоляции 10 мм обеспечивает минимальную напряженность 1,38 кВ/мм (против 3,14 кВ/мм при 4 мм). В серии расчетов по диаметру минимальная напряженность для шинного модуля достигается при диаметре 40 мм и составляет 1,64 кВ/мм (при фиксированной толщине 6 мм).

Полученные результаты подтверждают применимость выбранного подхода к параметрической оптимизации геометрии элементов ячейки КРУ 10 кВ по критерию максимальной напряженности электрического поля в твердой изоляции. На следующем этапе целесообразно выполнить расчеты в составе сборной модели ячейки с учетом взаимного влияния элементов и электростатического экранирования, а также сопоставить расчетные максимумы с допустимыми значениями для конкретных материалов и условий эксплуатации.

*Работа выполнена в рамках проекта «Оптимизация конструкций высоковольтных ячеек 10-35 кВ» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.*

*The work was carried out within the framework of the project “Optimization the design of a 10-35 kV switchgear cubicles” with the support of a grant from the National Research University “MPEI” of the scientific research program “Priority 2030: Technologies of the Future” in 2024-2026.*

© Ковалев Д.И., 2026  
© Нестеренко А.А., 2026  
© Кругликов Д.А., 2026  
© Граудынь С.В., 2026

*Поступила в редакцию 27.01.2026*

*Принята к публикации 13.02.2026*

*Received 27.01.2026*

*Accepted 13.02.2026*

### Библиографический список

- [1] Ковалев Д.И. Исследование распределения электрических и магнитных полей промышленной частоты в распределительных устройствах напряжением 6-110 кВ: автореф. дис. канд. техн. наук, НИУ «МЭИ», Москва, 2019. – 21 с.
- [2] Varivodov V.N., Kovalev D.I., Khrenov S.I., Mirzabekyan G.Z., Krupenin N.V. The current state and possibilities for development of switchgears for a voltage of 6-35 kV // Russian Electrical Engineering. 2017. № 88 (8). С. 503-508. DOI: 10.3103/S1068371217080120

- [3] Seeger M., Macedo F., Riechert U., Bujotzek M., Hassanpoor A., Häfner J. Trends in high voltage switchgear research and technology // IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2025. № 20 (3). P. 322-338. DOI: 10.1002/tee.24244
- [4] Kieffel Y., Biquez F. SF6 Alternative Development for High Voltage Switchgear // 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), June 07-10, 2015, Seattle, WA, USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ICACACT.2014.7223577
- [5] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Крупенин Н.В., Хренов С.И. Развитие распределительных устройств высокого и сверхвысокого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 1 (40). С. 98-104.
- [6] Вариводов В.Н., Ковалев Д.И., Голубев Д.В. Полимеры в технике высоких напряжений. М.: МЭИ, 2022. – 280 с.
- [7] Борисов Р.К., Ковалев Д.И. Исследование электрических полей сложных конфигураций в комплектных распределительных устройствах классом напряжения 10 кВ // XXIII Всерос. конф. с межд. уч. «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)», Январь 01 – Декабрь 31, 2015, Москва, Россия. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2015. С. 345-352.
- [8] Поляков Р.А., Елфимов С.А., Нестеренко А.А., Кругликов Д.А. Расчет электрических полей в моноблоке высоковольтной ячейки RM-6 // Электричество. 2024. № 12. С. 67-73.
- [9] Поляков Р.Н., Кругликов Д.А., Нестеренко А.А., Граудынь С.В. Совершенствование конструкции высоковольтной ячейки с твердой экранированной изоляцией напряжением 35 кВ // Электричество. 2025. № 12. С. 50-57. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-12-50-57
- [10] CIGRÉ Working Group A3.29. Switching phenomena for vacuum circuit breakers // Technical Brochure. № 602. Paris: CIGRÉ, 2014. P. 128.
- [11] Каталог комплектных распределительных устройств КРУ // АО «Группа «СВЭЛ». [Электронный ресурс]. URL: <https://svel.ru/catalog/komplektnye-raspredeletelnye-ustroystva/> (дата обращения 15.10.2025).
- [12] The Next Generation of Medium Voltage Switchgear // Shielded Solid Insulated System (2SIS). [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.se.com/infrastructure-and-grid/power-management-metering-monitoring-power-quality/2018/03/15/shielded-solid-insulated-system-2sis-the-next-generation-of-medium-voltage-switchgear/> (дата обращения 15.10.2025).
- [13] Premset Insulated Switchgear. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.se.com/id/en/product-range/61301-premset/?selected-node-id=13805364353#documents> (дата обращения 15.10.2025).
- [14] Трехпозиционные коммутационные аппараты с элегазовой изоляцией серии SL-10 кВ // Элтехника. [Электронный ресурс]. URL: <https://elteh.ru/products/trehpozitsionnye-elegazovye-vykylyuchateli-serii-sl/trehpozitsionnye-kommutatsionnye-apparaty-s-elegazovoy-izolyatsiyey-serii-sl-10-kv?ysclid=mkvvhb7te444025627> (дата обращения 15.10.2025).
- [15] КРУ «Волга» 10 кВ // Элтехника. [Электронный ресурс]. URL: <https://elteh.ru/products/kru-volga/kru-serii-volga-10kv?ysclid=mkvg5yda1f273005668> (дата обращения 15.10.2025).

- [16] КРУ СЭЩ-10 // АО «ГК «Электрощит»-ТМ Самара». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/komplektnye-raspredelitelnye-ustroystva/kru-seshch-63-6-10-kv/?ysclid=mkvgerre13421227934> (дата обращения 15.10.2025).

### References

- [1] D.I. Kovalev, “*Issledovanie raspredeleniya elektricheskikh i magnitnykh polei promyshlennoi chastoty v raspredelitelnykh ustroystvakh napryazheniem 6-110 kV [Study of distribution of power-frequency electric and magnetic fields in 6-110 kV switchgear]*”, Cand. of Tech. S. thesis, National Research University “MPEI”, Moscow, Russia, 2019 (in Russian).
- [2] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, N.V. Krupenin, S.I. Khrenov and G.Z. Mirzabekyan, “The current state and possibilities for development of switchgears for a voltage of 6-35 kV”, *Russian Electrical Engineering*, vol. 88, no. 8, pp. 503-508, 2017. DOI: 10.3103/S1068371217080120
- [3] M. Seeger, F. Macedo, U. Riechert, M. Bujotzek, A. Hassanpoor and J. Häfner, “Trends in high voltage switchgear research and technology”, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 322-338, 2025. DOI: 10.1002/tee.24244
- [4] Y. Kieffel and F. Biquez, “SF6 Alternative Development for High Voltage Switchgear”, in proc. *2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, June 07-10, 2015, Seattle, WA, USA. DOI: 10.1109/ICACACT.2014.7223577
- [5] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev, N.V. Krupenin and S.I. Khrenov, “Development of high voltage and extra high voltage switchgears”, *Electric power. Transmission and distribution*, vol. 1, no. 40, pp. 98-104, 2017.
- [6] V.N. Varivodov, D.I. Kovalev and D.V. Golubev, *Polimery v tekhnike vysokikh napryazhenii [Polymers in high-voltage engineering]*. Moscow: MPEI, 2022 (in Russian).
- [7] R.K. Borisov and D.I. Kovalev, “Influence of local laser pulse on the stripe domains in magnetic films”, in proc. *XXIII All-Russian Conf. Elektromagnitnoe pole i materialy (fundamental'nye fizicheskie issledovaniya) [Electromagnetic Field and Materials (Fundamental Physical Research)]*, January 01 – December 31, 2015, Moscow, Russia, pp. 345-352 (in Russian).
- [8] R.A. Polyakov, S.A. Elfimov, A.A. Nesterenko and D.A. Kruglikov, “Electric field calculation in the RM-6 high-voltage cell monoblock”, *Elektrichestvo*, no. 12, pp. 67-73, 2024. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-12-67-73
- [9] R.N. Polyakov, D.A. Kruglikov, A.A. Nesterenko and S.V. Graudyn, “Optimizing the design of a 35 kV switchgear cubicle with solid shielded insulation”, *Elektrichestvo*, no. 12, pp. 50-57, 2025. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-12-50-57
- [10] “CIGRE Working Group A3.29. Switching phenomena for vacuum circuit breakers”, in proc. *Technical Brochure*, 2014, Paris, pp. 128.
- [11] Каталог комплекных распределительных устройств КРУ [Catalogue of complete switchgear units]. [Online]. Available at: <https://svel.ru/catalog/komplektnye-raspedelitelnye-ustroystva/> [Accessed: Oct. 15, 2025] (in Russian).

- [12] The Next Generation of Medium Voltage Switchgear. [Online]. Available at: <https://blog.se.com/infrastructure-and-grid/power-management-metering-monitoring-power-quality/2018/03/15/shielded-solid-insulated-system-2sis-the-next-generation-of-medium-voltage-switchgear/> [Accessed: Oct. 15, 2025].
- [13] Premset Insulated Switchgear. [Online]. Available at: <https://www.se.com/id/en/product-range/61301-premset/?selected-node-id=13805364353#documents> [Accessed: Oct. 15, 2025].
- [14] Trekhpozicionnye kommutatsionnye apparaty s elegazovoj izolyaciej serii SL-10 kV [Three-position switching devices with SF6 insulation of the SL-10 kV series]. [Online]. Available at: <https://elteh.ru/products/trehpozitsionnye-elegazovyye-vyklyuchateli-serii-sl/trehpozitsionnye-kommutatsionnye-apparaty-s-elegazovoy-izolyatsiy-serii-sl-10-kv/?ysclid=mkvhhb7te444025627> [Accessed: Oct. 15, 2025] (in Russian).
- [15] KRU «Volga» 10 kV [Switchgear "Volga" 10 kV]. [Online]. Available at: <https://elteh.ru/products/kru-volga/kru-serii-volga-10kv/?ysclid=mkvg5yda1f273005668> [Accessed: Oct. 15, 2025] (in Russian).
- [16] KRU SESHCH-10 [Switchgear SESH-10]. [Online]. Available at: <https://www.electroshield.ru/catalog/komplektnye-raspredelitelnye-ustroystva/kru-seshch-63-6-10-kv/?ysclid=mkvgerre13421227934> [Accessed: Oct. 15, 2025] (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ковалев Дмитрий Игоревич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

**Нестеренко Александр Алексеевич**, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

**Кругликов Дмитрий Александрович**, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

**Граудынь Сергей Владимирович**, лаборант-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

**Dmitry I. Kovalev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, head of lab of the National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation.

**Alexander Al. Nesterenko**, research engineer of the National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation.

**Dmitry Al. Kruglikov**, research engineer of the National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation.

**Sergey V. Graudyn**, laboratory research assistant of the National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation.