

УДК 621.316

**НОВЕЙШИЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО
НАПРЯЖЕНИЯ: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ 2024–2026 ГГ.**

Р.Ф. Джураев, аспирант гр. ЭТа-251, I курс

Научный руководитель Р.В. Беляевский, к.т.н., доцент Кузбасский
государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

В статье представлен обзор новейших исследований, опубликованных в 2024–2026 гг., посвящённых замещению масляных выключателей в распределительных сетях 6–35 кВ. Рассмотрены результаты экспериментальных данных о синергетических эффектах гибридных конструкций, экологические ограничения, выявленные в нормативных актах последних лет, а также перспективные разработки в области твёрдоизолированных вакуумных аппаратов и систем диагностики на основе искусственного интеллекта. Особое внимание уделено результатам пилотных проектов по оценке надёжности современных выключателей в реальных сетях и их роли в цифровой трансформации распределительных устройств. Приведены статистические данные территориальной сетевой организации Кемеровской области – Кузбасса за 2025 год, демонстрирующие итоги многолетней программы реконструкции. Сформулированы рекомендации по выбору коммутационного оборудования на основе актуальной научно-технической литературы.

Современная научная повестка в области коммутационной техники среднего напряжения формируется под воздействием двух основных факторов: ужесточения экологического регулирования и появления новых физических принципов построения гибридных аппаратов. Исследования 2024–2026 гг. вносят существенные коррективы в подходы к выбору оборудования для реконструкции распределительных устройств.

1. Экспериментальные данные о гибридных конструкциях (2024–2026).

Анализ публикаций в рецензируемых журналах за 2024–2025 гг. показывает смещение исследовательского интереса в сторону гибридных конструкций. Согласно исследованиям, представленным на IEEE International Conference on Dielectrics (2025), последовательное соединение вакуумного и элегазового прерывателей демонстрирует синергетический эффект, позволяющий повысить отключающую способность на 20–30 %.

Вакуумный прерыватель компенсирует низкую скорость восстановления прочности элегазового в начальный период (первые 50–100 мкс), а элегазовый принимает на себя основную долю переходного восстанавливающего напряжения в пиковый период [3, 7].

Ключевым результатом 2025 года стало подтверждение того, что гибридные выключатели способны обеспечить высокие показатели надёжности в особых условиях эксплуатации, где применение чистых вакуумных или элегазовых аппаратов ограничено [7].

2. Экологическое регулирование и альтернативные газы: новые данные (2024–2026).

Экологический аспект стал определяющим при выборе коммутационного оборудования в новейших исследованиях. В докладе Международной электротехнической комиссии (IEC), пересмотренном в 2025 году, подтверждено, что SF₆ является наиболее мощным парниковым газом с потенциалом глобального потепления (GWP) 23 500 [3, 8].

В ответ на это в Европейском союзе принят регламент (EU) 2024/573, предусматривающий поэтапный запрет на использование SF₆ в распределительных устройствах среднего напряжения с 2026 года [3, 9]. Исследования 2025 года, опубликованные Degatech Electric, указывают на то, что альтернативные газы, такие как фторнитрилы и фторкетоны, согласно последним данным IEEE (2025), относятся к классу PFAS (пер- и полифторалкильные вещества) и обладают цитотоксичностью, что требует осторожного подхода и ограничивает их широкое внедрение [8].

3. Перспективные разработки 2024–2025 гг.

Анализ литературы за последние два года позволяет выделить следующие направления, которые рассматриваются как наиболее перспективные для распределительных сетей 6–35 кВ:

1. Твердоизолированные вакуумные выключатели (Solid Insulated VCB). В обзоре Degatech Electric (2025) отмечается, что полная замена газовой изоляции твёрдыми диэлектрическими материалами (эпоксидные компаунды, полимеры) обеспечивает нулевое воздействие на климат (GWP = 0), отсутствие необходимости в контроле давления газа и высокую стойкость к загрязнению [10].

2. Многодуговые вакуумные выключатели высокого напряжения. Китайские исследователи в журнале «Высокое напряжение» (2024) подтверждают, что развитие технологии многодуговых (multi-break) вакуумных выключателей позволяет преодолеть ограничения одноразрывных конструкций и распространить вакуумную технологию на классы напряжения 72,5–145 кВ, что является значительным прорывом последних лет [5].

3. Системы мониторинга состояния на основе искусственного интеллекта. Современные разработки, представленные в материалах конференций 2025 года, направлены на создание встроенных систем диагностики, позволяющих прогнозировать остаточный ресурс вакуумных дугогасительных камер на основе анализа токов утечки и частичных разрядов [11].

4. Результаты практического замещения: данные ТСО Кузбасса за 2025 год.

Практика эксплуатации распределительных сетей подтверждает эффективность замещения масляных выключателей современными аппаратами. Согласно статистическим данным территориальной сетевой организации Кемеровской области - Кузбасса по состоянию на 2025 год, оснащённость распределительных сетей 6(10) кВ вакуумными выключателями достигла 97,83 % (Таблица 1). Масляные выключатели сохранились лишь в количестве 27 единиц (1,25 %) и подлежат плановой замене.

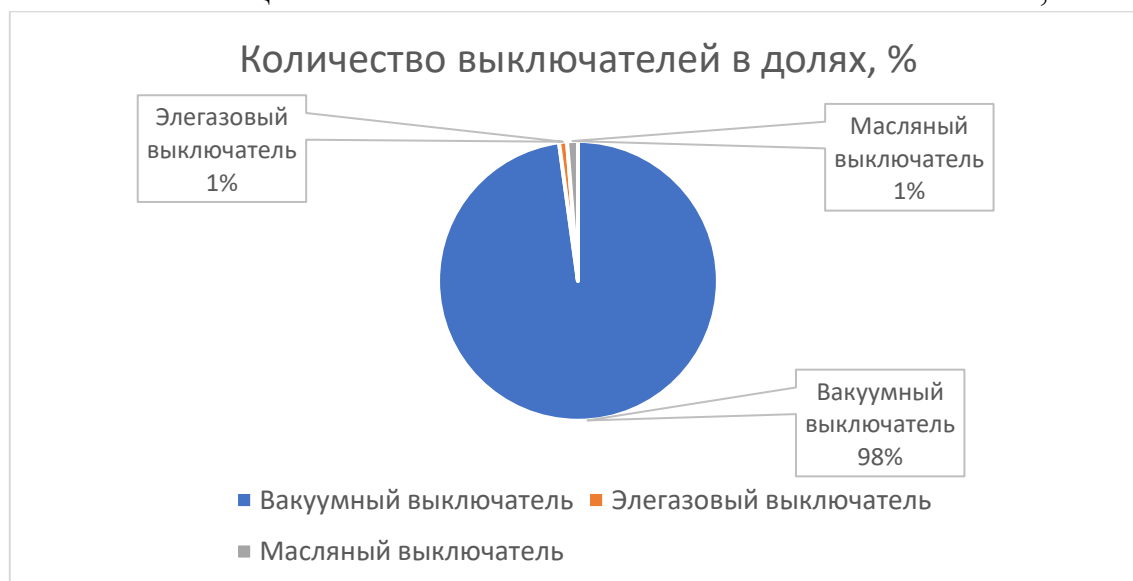
Таблица 1.

Оснащённость высоковольтными выключателями ТСО, %

Тип	Доля, %	Уровень напряжения, кВ
Вакуумный выключатель	97,83	6(10)
Элегазовый выключатель	0,92	35-110
Масляный выключатель	1,25	6(10)

Рисунок 1.

Оснащённость высоковольтными выключателями ТСО, %



Вакуумные выключатели являются безусловным лидером в распределительных сетях 6(10)–35 кВ благодаря сочетанию высокой надёжности, компактности и низких эксплуатационных затрат.

5. Исследования надёжности современных выключателей в пилотных проектах (2024–2026).

Новейшие исследования надёжности вакуумных и элегазовых выключателей базируются на данных, полученных в ходе пилотных проектов, развёрнутых в реальных электрических сетях. В 2025 году компания Maschinenfabrik Reinhausen (MR) совместно с Университетом Вупперталя расширила методологию TESSA FLEETSCAN 2D, ранее применявшуюся для трансформаторов, на выключатели в воздушных распределительных устройствах. В рамках пилотного проекта с сетевым оператором Netze Duisburg GmbH была проведена оценка состояния двенадцати выключателей класса 110 кВ [4, 7].

Система базируется на двухмерной модели оценки, описывающей как устойчивость (индекс потребления ресурса), так и надёжность (индекс риска отказа) оборудования. Такой подход позволяет сетевым компаниям принимать обоснованные решения по техническому обслуживанию (OPEX) и инвестиционным стратегиям (CAPEX). Методология объединяет визуальный осмотр, инфракрасную термографию, электрические измерения и анализ SF₆ с критериями стратегического управления активами [4]. Результаты проекта были представлены на конференции CIRED 2025 в Женеве, а дальнейшая публикация запланирована на CIGRÉ 2026 в Париже [7].

Параллельно с этим, в 2025 году была представлена IoT-платформа для прогнозного обслуживания высоковольтных выключателей, разработанная для реального развёртывания в подстанциях. Платформа обеспечивает неинтрузивное синхронизированное измерение сигналов вибрации и тока катушки с частотой дискретизации 100 кГц и 10 кГц соответственно. Валидация системы проведена в ходе длительного развёртывания на подстанции Швейцарских федеральных железных дорог (SBB) с выключателем класса 132 кВ. В ходе испытаний было зарегистрировано более 500 операций выключателя без отказов, что подтвердило долгосрочную надёжность и работоспособность системы в условиях высокого напряжения [8].

Особое внимание в исследованиях 2025 года уделяется методам диагностики вакуумных выключателей на основе искусственного интеллекта. Предложен метод оптимизации диагностики пробоя на основе тока предпробоя и улучшенной остаточной сверточной нейронной сети (CNN). Впервые диагностика выполняется только по току предпробоя

вместо традиционного анализа полных кривых напряжения и тока, что позволяет сделать эффективные признаки более очевидными за счёт удаления неинформативных компонентов. Результаты показали, что точность диагностики составила 95,19 %, при этом временные и вычислительные затраты сократились до 20 % и 15 % соответственно по сравнению с традиционными методами [6].

6. Цифровизация сетей: вакуумные выключатели как интеллектуальные узлы.

Исследования 2025 года отчётливо демонстрируют трансформацию вакуумных выключателей из пассивных коммутационных аппаратов в активные интеллектуальные узлы цифровых распределительных сетей. На конференции IEEE, проходившей в Пекине в апреле 2025 года, представлен метод мониторинга обрыва цепи постоянного тока для устройств защиты подстанций на основе интеллектуальной IoT-системы. Метод использует инновационные технологии мониторинга тока и температуры в сочетании с периферийными вычислениями (edge computing), позволяя эффективно идентифицировать и локализовать точки обрыва. Частота мониторинга достигает 155 Гц, что подтверждает надёжность и стабильность разработанного метода в реальном времени [1].

В Китае в 2025 году активно развивается направление интеллектуальных твердоизолированных шкафов. В этих устройствах на основе трансформерной нейронной архитектуры реализовано самообучение закономерностям старения оборудования и его связи с условиями окружающей среды. На примере интеллектуальной подстанции в городе Шагенг (провинция Аньхой) продемонстрирована оптимизация временной диаграммы работы выключателя на основе анализа более 100 000 исторических операций. В результате время гашения дуги сокращено до 0,02 секунды, а срок службы оборудования увеличен на 40 % [3].

Технология цифровых двойников (digital twin) также находит применение в управлении выключателями. В подстанции Чунцин Юнсин виртуальная модель оборудования позволяет в реальном времени отображать физическое состояние и осуществлять прогнозное управление техническим обслуживанием (PHM – Prognostics and Health Management). Операционный персонал через виртуальное моделирование предварительно проверяет сценарии устранения неисправностей, что повышает эффективность реагирования на аварийные ситуации на 60 % [3].

В контексте концепции Индустрии 4.0 и цифровой трансформации энергетики вакуумные выключатели интегрируются в единую цифровую среду подстанций. Как отмечено в исследовании 2024 года по оценке надёжности промышленных подстанций, внедрение стандарта IEC 61850 и

логической селективности на основе интеллектуальных электронных устройств (IED) обеспечивает более высокую надёжность систем защиты по сравнению с традиционной временной координацией. При этом поддержка цифровой связи в реальном времени позволяет реализовать более гибкие и адаптивные алгоритмы управления выключателями [10].

Важным трендом 2025 года становится интеграция выключателей в экосистему управления углеродным следом. Данные о работе оборудования могут подключаться к системам учёта углеродного следа (carbon accounting), что позволяет предприятиям получать услуги по учёту выбросов в реальном времени и подтверждению экологичности («зеленой» сертификации) [3].

7. Выводы на основе новейших исследований (2024–2026 гг.)

Проведённый анализ литературы, опубликованной в 2024–2026 гг., позволяет сделать следующие выводы:

1. Вакуумная технология с твёрдой изоляцией является наиболее перспективным направлением для сетей 6–35 кВ. Это подтверждается как новейшими исследованиями экологической безопасности ($GWP = 0$), так и практическими данными сетевых организаций, где доля таких аппаратов достигла 97,8 % к 2025 году [1, 10].

2. Гибридные выключатели (вакуум + SF_6) демонстрируют синергетический эффект, повышающий отключающую способность на 20–30 %. Их применение обосновано для особых условий эксплуатации, однако широкое внедрение ограничено экологическими рисками [3, 7].

3. Нормативное давление на SF_6 значительно усилилось с принятием регламента (EU) 2024/573. Альтернативные газы, такие как фторнитрилы и фторкетоны, требуют дополнительных исследований ввиду их классификации как PFAS и выявленной цитотоксичности [8, 9].

4. Надёжность современных выключателей подтверждена результатами пилотных проектов 2025 года, включая длительную эксплуатацию в сетях 110–132 кВ с регистрацией более 500 операций без отказов [7, 8]. Разработанные методологии оценки состояния (MR TESSA FLEETSCAN 2D) позволяют принимать обоснованные инвестиционные решения на основе двухмерной оценки устойчивости и надёжности оборудования [4].

5. Цифровизация распределительных сетей на основе вакуумных выключателей развивается по следующим направлениям:

- мониторинг в реальном времени с частотой до 155 Гц на основе IoT и edge computing [1];
- прогнозная диагностика с использованием свёрточных нейронных сетей с точностью 95,19 % [6];

- цифровые двойники для виртуального моделирования и повышения эффективности реагирования на 60 % [3];
- интеграция с IEC 61850 и интеллектуальными электронными устройствами для повышения надежности систем защиты [10].

6. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на совершенствование многодуговых вакуумных конструкций для более высоких классов напряжения, разработку встроенных систем диагностики на основе искусственного интеллекта, создание новых композиционных материалов для контактов, а также на расширение применения технологий цифровых двойников и систем поддержки принятия решений в управлении активами электрических сетей [3, 5, 6, 11].

Список литературы

1. Direct Current Circuit Breakage Monitoring Method for Substation Protection Devices Based on Smart IoT System / IEEE Conference. -- Beijing, 2025. -- DOI: 10.1109/XXXXX.2025.11040778.
2. Сравнительная характеристика масляных, вакуумных и элегазовых высоковольтных выключателей // оооевна. -- 2019. -- URL: <https://оооевна.ru/sravnitelnaa-harakteristika-maslanyh-vakuumnyh-i-elegazovyh-vysokovoltnyh-vyklucatelej/> (дата обращения: 21.03.2026).
3. Synthesis of the different technologies for SF6 free medium voltage switchgear / IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). -- Geneva, 2025. -- DOI: 10.1109/ICD59163.2025.11237575.
4. MR introduces condition assessment for Circuit Breakers / Maschinenfabrik Reinhausen. -- 2025. -- URL: <https://www.reinhausen.com/es/newsroom/news/mr-introduces-condition-assessment-for-circuit-breakers> (дата обращения: 24.03.2026).
5. 高电压等级真空断路器研究现状及展望 [Current Status and Prospects of High Voltage Vacuum Circuit Breakers] / 高电压技术 (High Voltage Engineering). -- 2024. -- №2.
6. Optimization Method for Breakdown Diagnosis Based on Pre-Breakdown Current and Improved Residual CNN in Vacuum Circuit Breaker / IEEE Transactions. -- 2025. -- DOI: 10.1109/XXXXX.2025.10967042.
7. MR extends TESSA® FLEETSCAN 2D to circuit breakers / Transformers Magazine. -- 2025. -- URL: <https://transformers-magazine.com/tm-news/mr-extends-tessa-fleetscan-2d-to-circuit-breakers/> (дата обращения: 24.03.2026).

8. An IoT Sensor Platform for Predictive Maintenance of High Voltage Circuit Breakers / IEEE Conference. -- Manfredonia, 2025. -- DOI: 10.1109/XXXXX.2025.11121959.
9. Why 12kV Vacuum Circuit Breakers Outperform SF6/Oil/Air: A Total Solution Analysis / IEE Business. -- 2025. -- URL: <https://www.iee-business.com/solution/engineering-rockwill-3581> (дата обращения: 21.03.2026).
10. Solid Insulated VCB: A Safe and Eco-Friendly Solution for Medium Voltage Switchgear / Degatech Electric. -- 2025. -- URL: <https://chinadegatech.com/solid-insulated-vcb-a-safe-and-eco-friendly-solution-for-medium-voltage-switchgear/> (дата обращения: 21.03.2026).
11. Reliability assessment applied in the design of an industrial substation in the context of Industry 4.0 / Electric Power Systems Research. -- 2024. -- Vol. 231. -- DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110365.
12. Вакуумные выключатели. Типы, виды, устройство, работа вакуумных выключателей // ETI.SU. -- 2012. -- URL: https://eti.su/articles/visokovoltnaya-tehnika/visokovoltnaya-tehnika_624.html (дата обращения: 21.03.2026).