

УДК 621.314.2+620.22

Захаров Даниил Алексеевич, студент 2 курса, Санкт–Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Ганьшин Юрий Анатольевич Кандидат технических наук, доцент
Санкт–Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ
И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Аннотация

Настоящий доклад посвящен комплексному анализу инновационных материалов для трансформаторных подстанций, которые определяют развитие энергетической инфраструктуры в 2025 году. В работе рассмотрены ключевые drivers изменений в отрасли, включая переход к возобновляемой энергетике, цифровизацию, ужесточение экологических стандартов и импортозамещение. Проведен детальный анализ современных магнитных материалов (аморфные и нанокристаллические сплавы, высокопроницаемые ферриты), инновационных изоляционных систем (твердые диэлектрики с наномодификаторами, биоразлагаемые жидкости, синтетические эфиры), функциональных и smart материалов с сенсорными свойствами. Особое внимание уделено сравнительным характеристикам материалов, представленных в табличной форме для наглядной оценки преимуществ и ограничений каждого решения. Рассмотрено влияние новых материалов на конструктивные особенности трансформаторных подстанций, включая уменьшение габаритов, повышение КПД, увеличение срока службы и

улучшение экологических показателей. Проанализировано состояние российского рынка в условиях импортозамещения и перспективные направления развития материаловедения в энергетике. Доклад предназначен для специалистов в области энергетического оборудования, материаловедения, проектировщиков трансформаторных подстанций, а также представителей государственных структур, формирующих техническую политику в области энергетики.

Annotation

This report is devoted to a comprehensive analysis of innovative materials for transformer substations, which determine the development of energy infrastructure in 2025. The work considers key drivers of changes in the industry, including the transition to renewable energy, digitalization, tightening of environmental standards, and import substitution. A detailed analysis of modern magnetic materials (amorphous and nanocrystalline alloys, high-permeability ferrites), innovative insulation systems (solid dielectrics with nanomodifiers, biodegradable fluids, synthetic esters), and functional smart materials with sensor properties has been conducted. Special attention is paid to comparative characteristics of materials presented in tabular form for a clear evaluation of the advantages and limitations of each solution. The impact of new materials on the structural features of transformer substations is considered, including size reduction, increased efficiency, extended service life, and improved environmental performance. The state of the Russian market under import substitution conditions and promising directions for materials science development in the energy sector are analyzed. The report is intended for specialists in the field of energy equipment, materials science, transformer substation designers, as well as representatives of government bodies forming technical policy in the energy sector.

1. Введение

Трансформаторные подстанции являются критически важными компонентами современных энергетических систем, обеспечивая

преобразование, распределение и передачу электрической энергии. В условиях растущей нагрузки на энергетическую инфраструктуру, перехода к возобновляемым источникам энергии и ужесточения требований к энергоэффективности, материалы, используемые в трансформаторных подстанциях, претерпевают значительные изменения. В 2025 году отрасль демонстрирует активный переход к инновационным решениям, которые повышают надежность, эффективность и экологичность оборудования. Современные материалы должны не только отвечать повышенным техническим требованиям, но и соответствовать новым экологическим стандартам и принципам устойчивого развития.

Современные вызовы и drivers инноваций. Энергетическая отрасль сталкивается с несколькими ключевыми вызовами, которые стимулируют развитие новых материалов для трансформаторных подстанций:

Рост нагрузки на энергетические сети due to увеличения потребления электроэнергии и подключения новых объектов. Переход к возобновляемым источникам энергии, которые требуют более гибких и устойчивых к перепадам нагрузок решений. Ужесточение экологических норм и требований энергоэффективности по всему миру, включая стандарты ЕС EcoDesign Directive Tier 2. Необходимость интеграции цифровых технологий для создания интеллектуальных энергетических сетей (smart grid). Стратегия импортозамещения в России, стимулирующая развитие отечественных технологий. Эти факторы collectively способствуют ускоренному внедрению инновационных материалов, способных удовлетворить растущие требования к трансформаторному оборудованию.

Инновационные магнитные материалы

Нанокристаллические и аморфные сплавы

Современные магнитопроводы трансформаторов претерпели значительную эволюцию. Традиционная электротехническая сталь

постепенно заменяется нанокристаллическими и аморфными сплавами, которые демонстрируют существенно улучшенные характеристики.

Параметр	Традиционная электротехническая сталь	Аморфные сплавы	Нанокристаллические сплавы	Высокопроницаемые ферриты
Потери холостого хода, Вт/кг	0.9-1.5	0.2-0.3	0.1-0.2	0.3-0.5 (при 20 кГц)
Магнитная индукция насыщения, Тл	2.0-2.1	1.5-1.6	1.2-1.3	0.4-0.5
Температура Кюри, °С	740-750	350-410	560-600	200-300
Толщина ленты, мкм	300-350	25-30	18-22	-
Стоимость относительно традиционной стали	1.0х	1.8-2.2х	2.5-3.5х	2.0-2.5х

Применение Силовые трансформаторы общего назначения
Высокоэффективные распределительные трансформаторы
Высокочастотные трансформаторы, измерительные трансформаторы
Импульсные трансформаторы, ВЧ устройства.

Аморфные металлы позволяют снизить потери холостого хода до 70% по сравнению с традиционными материалами, что значительно повышает энергоэффективность трансформаторов. Эти материалы имеют неупорядоченную атомную структуру, что уменьшает гистерезисные потери при перемагничивании.

Нанокристаллические сплавы предлагают еще более впечатляющие характеристики – они сочетают высокую магнитную проницаемость с низкими потерями и excellent температурной стабильностью. Эти материалы особенно перспективны для высокочастотных трансформаторов, используемых в преобразовательной технике для возобновляемой энергетики.

Высокопроницаемые ферриты. Для высокочастотных применений в силовой электронике активно развиваются ферритовые материалы с улучшенными характеристиками. Современные ферриты демонстрируют повышенную индукцию насыщения и уменьшенные потери при высоких частотах, что позволяет создавать более компактные и эффективные трансформаторы.

Перспективные изоляционные материалы. Изоляционные материалы являются critical компонентом трансформаторов, обеспечивая их надежность и длительный срок службы. В последние годы произошли значительные advancements в этой области.

Твердые изоляционные материалы. Целлюлозно-бумажные изоляции с улучшенными свойствами. Современная изоляционная бумага подверглась значительным усовершенствованиям. Бумага с нанопокрытиями – повышение диэлектрической прочности и теплопроводности. Бумага с добавлением синтетических волокон – улучшение механической прочности и стойкости к старению. Пропитанная бумага с специальными составами – enhanced dielectric properties

Материал	Диэлектрическая прочность, кВ/мм	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Влагопоглощение, %	Термостойкость, °C	Стоимость
Традиционная электрокартонная бумага	8-12	0.05-0.08	6-8	90-105	Низкая
Бумага с арамидными волокнами	12-18	0.10-0.15	3-4	180-220	Высокая
Бумага с нанопокрытием SiO ₂	15-25	0.15-0.25	1-2	130-150	Средняя
Эпоксидные компаунды с наполнителями	20-30	0.35-0.50	0.1-0.3	130-155	Средняя
Силиконовые изоляторы	15-22	0.20-0.30	0.05-0.1	180-200	Высокая

Прессшпан и изоляционные плиты. Современные прессшпаны обладают улучшенными механическими и электрическими характеристиками. Использование новых пропиток и добавок позволяет significantly повысить их стойкость к увлажнению и thermal aging. Полимерные и композитные изоляторы. Эпоксидные смолы с наполнителями – используются в литых трансформаторах, обеспечивая excellent влагостойкость и механическую прочность. Силиконовые изоляторы – высокая heat resistance и стабильность параметров. Нанокompозитные материалы – сочетание полимерной матрицы с неорганическими нанонаполнителями для улучшения диэлектрических и тепловых характеристик.

Жидкие диэлектрики. Биоразлагаемые масла на основе растительных эфиров. Традиционные минеральные масла постепенно заменяются экологичными alternatives. Натуральные эфирные масла демонстрируют высокую температуру воспламенения (более 300°C), хорошую биоразлагаемость (до 98%), excellent изоляционные свойства, улучшенные характеристики старения.

Синтетические жидкости. Синтетические esters и другие advanced жидкости предлагают improved performance в экстремальных условиях эксплуатации, особенно при низких температурах и высоких нагрузках.

Наноулучшенные диэлектрики. Добавление наночастиц (например, оксида титана, оксида кремния) в традиционные трансформаторные масла позволяет significantly улучшить их диэлектрическую прочность и теплопроводность.

Тип жидкости	Температура воспламенения, °C	Биоразлагаемость, %	Диэлектрическая прочность, кВ/мм	Вязкость при 40°C, мм²/с	Стойкость к старению	Стоимость относительно минерального масла
Минеральное масло	160-180	20-30	30-40	8-12	Средняя	1.0x
Силиконовые жидкости	300	5-10	35-45	20-30	Высокая	5.0-6.0x
Натуральные эфиры	300	95	45-55	25-35	Высокая	2.5-3.0x
Синтетические эфиры	250-280	80-90	50-60	18-25	Очень высокая	3.5-4.5x
Наноулучшенное минеральное масло	170-190	20-30	45-65	8-12	Высокая	1.8-2.2x

Материалы для систем охлаждения. Эффективное охлаждение является critical для повышения мощности и надежности трансформаторов. Современные материалы позволяют создать более эффективные системы теплоотвода. Теплопроводящие керамические покрытия – для улучшения heat transfer между обмотками и системой охлаждения. Усовершенствованные алюминиевые сплавы – для радиаторов с improved thermal conductivity. Наноструктурированные тепловые интерфейсы – для уменьшения теплового сопротивления между компонентами. Микроканальные конструкции – созданные с помощью additive manufacturing для увеличения поверхности теплообмена.

Материал/ технология	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная стоимость	Эффективность теплоотвода	Срок службы, лет	Применение
Традиционный алюминий	160-180	1.0x	Средняя	25-30	Радиаторы, теплоотводы
Алюминиевые сплавы с повышенной теплопроводностью	200-220	1.3-1.5x	Высокая	30-35	Высокоэффективные радиаторы
Медные теплоотводы	380-400	2.5-3.0x	Очень высокая	35-40	Critical области
Керамические теплопроводящие покрытия	15-25 (слой)	0.8-1.2x (за обработку)	Умеренная	15-20	Интерфейсы теплоотвода
Углеродные наноматериалы	1000-1500	8.0-12.0x	Экстремально высокая	20-25 (экспериментально)	Локальный теплоотвод в hot spots

Функциональные и smart материалы. Современные трансформаторные подстанции increasingly оснащаются системами мониторинга и диагностики, что требует интеграции функциональных материалов.

Материалы с сенсорными свойствами. Оптоволоконные sensors – встраиваются в обмотки для измерения temperature в реальном времени. Наносенсоры – для мониторинга частичных разрядов и degradation изоляции. Пьезоэлектрические материалы – для monitoring вибраций и механических напряжений.

Тип сенсора/ материала	Измеряемый параметр	Точность	Стоимость внедрения	Преимущества	Недостатки
Оптоволоконные датчики	Температура, деформация	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 5 \mu\text{e}$	Высокая	Нечувствительность к ЭМП, долговечность	Сложность установки
Пьезоэлектрические сенсоры	Вибрация, механическое напряжение	$\pm 2\%$	Средняя	Высокая чувствительность, простота	Восприимчивость к температуре
Наносенсоры на основе графена	Частичные разряды, газовый состав	$\pm 1\%$	Очень высокая	Высокая чувствительность, миниатюрность	Стабильность, стоимость
Электрохромные материалы	Температура, электрическое поле	$\pm 5\%$	Низкая	Визуальный контроль без питания	Низкая точность
RFID метки с сенсорами	Множество параметров	$\pm 3-5\%$	Средняя	Беспроводной мониторинг, простота	Ограниченный срок службы батарей

Самовосстанавливающиеся материалы. Разрабатываются изоляционные материалы с способностью к самозалечиванию повреждений, которые могут возникать в течение срока службы трансформатора. Эти материалы содержат микрокапсулы с healing agents, которые высвобождаются при возникновении повреждений.

Фотонные и электрохромные материалы. Для визуализации состояния оборудования используются материалы, изменяющие цвет в зависимости от

temperature или электрического поля, что позволяет визуально определять перегрев или аномальные поля.

Материалы для корпусов и внешней защиты. Корпуса трансформаторных подстанций также подвергаются усовершенствованиям. Антивандальные и коррозионностойкие покрытия – для увеличения срока службы в агрессивных средах. Огнестойкие композиты – особенно важны для indoor установок. Шумопоглощающие материалы – для снижения акустического воздействия на окружающую среду. Терморегулирующие покрытия – для уменьшения теплового нагрева от солнечной радиации.

Материал	Стойкость к коррозии	Огнестойкость	Шумопоглощение, дБ	Срок службы, лет	Стоимость	Применение
Оцинкованная сталь	Средняя	Низкая	3-5	15-20	Низкая	Стандартные КТП
Нержавеющая сталь	Высокая	Средняя	3-5	25-30	Высокая	Агрессивные среды
Алюминиевые композиты	Высокая	Низкая	5-8	20-25	Средняя	Легкие конструкции
Стеклопластик	Очень высокая	Средняя	8-12	25-30	Средняя	Коррозионные среды
Огнестойкие полимерные композиты	Высокая	Очень высокая	10-15	20-25	Высокая	Внутренние установки

Направления цифровизации и Industry 4.0 в производстве материалов. Производство материалов для трансформаторных подстанций increasingly использует цифровые технологии. Цифровые двойники (digital twins) – для моделирования поведения материалов в различных условиях. Искусственный интеллект – для оптимизации состава и структуры материалов. Аддитивные технологии – для создания сложных структур изоляционных компонентов. Роботизированная сборка – для обеспечения высокой повторяемости и качества. Влияние инновационных материалов на конструкцию трансформаторных подстанций.

Внедрение новых материалов приводит к значительным изменениям в конструкции трансформаторных подстанций. Уменьшение габаритов при той же мощности due to повышения эффективности материалов. Увеличение срока службы с 25 до 40+ лет благодаря improved стойкости к старению. Снижение эксплуатационных расходов за счет reduced потерь и extended интервалов

технического обслуживания. Повышение экологической безопасности через использование biodegradable материалов и reduced риск утечек.

Российский рынок и импортозамещение. В России развитие материалов для трансформаторных подстанций идет в рамках стратегии импортозамещения. Развитие отечественных производств ключевых материалов (например, нанокристаллических сплавов, изоляционных бумаг). Создание новых производственных мощностей (например, завод в Щелково по производству трансформаторных подстанций). Адаптация международных стандартов к российским условиям. Государственная поддержка исследований и разработок в области энергетических материалов.

Производитель	Ключевые продукты	Используемые инновационные материалы	Доля на рынке РФ	Экспортный потенциал
ПО «СТЭЛЗ»	Трансформаторы, КТП	Нанокристаллические магнитопроводы, эпоксидная изоляция	~25%	Средний
ООО «МТК»	Масляные и сухие трансформаторы	Экологичные изоляционные жидкости, smart материалы для мониторинга	~15%	Низкий
СВЭЛ	Измерительные трансформаторы	Материалы с литой изоляцией, компаунды на основе эпоксидных смол	~20%	Высокий
ЭНЕРГОПРОМАЛЬЯНС	КТП различного назначения	Огнестойкие корпусные материалы, стойкие покрытия	~10%	Средний
Трансформер	Силовые трансформаторы	Аморфные сплавы, современные изоляционные жидкости	~18%	Высокий

Перспективы и тренды будущего развития. Направления развития материалов для трансформаторных подстанций на ближайшие 5-10 лет. Многофункциональные композиты – сочетающие изоляционные, теплопроводящие и механические свойства. Материалы с адаптивными свойствами – изменяющие характеристики в зависимости от условий эксплуатации. Биовдохновленные материалы – с структурами, природные аналоги (например, honeycomb структуры для улучшения прочности при снижении веса). Квантовые материалы – с принципиально новыми свойствами для сверхпроводящих трансформаторов. Полностью перерабатываемые материалы – для создания circular economy в энергетическом оборудовании. К 2030 году ожидается коммерциализация трансформаторов на основе высокотемпературной сверхпроводимости, которые потребуют принципиально новых материалов для криогенных систем и изоляции.

Материал/технология	Ожидаемые преимущества	Текущий статус	Ожидаемый срок коммерциализации	Потенциальное воздействие на отрасль
Высокотемпературные сверхпроводники	Снижение потерь на 90-95%, уменьшение габаритов в 3-5 раз	Лабораторные образцы	2030-2035	Революционное
Самовосстанавливающаяся изоляция	Увеличение срока службы в 1.5-2 раза, снижение затрат на ТО	Прототипы	2026-2028	Высокое
Графеновые добавки в масла	Увеличение диэлектрической прочности на 50-70%	Испытания	2025-2027	Среднее
Биовдохновленные структурные материалы	Снижение веса на 40-50% при сохранении прочности	НИОКР	2028-2030	Высокое
Квантовые сенсоры для мониторинга	Высокоточный мониторинг в реальном времени	Ранние исследования	2030+	Среднее

Заключение

Инновационные материалы revolutionize трансформаторные подстанции, обеспечивая повышение эффективности, надежности и экологической безопасности. Современные магнитные материалы с reduced потерями, advanced изоляционные материалы с улучшенными диэлектрическими характеристиками, и functional материалы для мониторинга состояния активно внедряются в новое оборудование.

Развитие материалов идет в направлении multifunctionality, adaptability и экологической устойчивости. Цифровизация производства и применения материалов позволяет оптимизировать их свойства под конкретные условия эксплуатации и прогнозировать поведение в течение всего жизненного цикла.

Для российских производителей key challenge является ускоренное развитие отечественных технологий в рамках импортозамещения, при сохранении соответствия международным стандартам качества и эффективности. Успешное внедрение инновационных материалов потребует тесного сотрудничества между научными институтами, производителями материалов и оборудования, и энергетическими компаниями.

Дальнейшие исследования в области наноматериалов, smart материалов и экологичных изоляционных жидкостей будут способствовать созданию

next-generation трансформаторных подстанций, отвечающих требованиям энергетического перехода и цифровой трансформации отрасли.

Литература

1. Zavod-96.ru – Инновации в производстве трансформаторов STELZ.
2. NPCElectric.com – The Development Trend of Industrial Transformers in 2025.
3. Zavod-96.ru – Сколько стоит трансформаторная подстанция в 2025 году.
4. Trans-mtk.com – Тренды трансформаторного рынка в 2025 году.
5. Zoliov.com – Insulation Materials in Transformers: Key Types and Applications.
6. Svel.ru – Новый технический каталог 2025 по измерительным трансформаторам.
7. Electra.cigre.org – Mechanical properties of insulation materials for power transformers.
8. Epatrade.ru – Комплектные трансформаторные подстанции (КТП).
9. Ruscable.ru – Новое производство трансформаторных подстанций в Щелково.
10. LinkedIn.com – Detailed Electrical Insulation Materials for Transformer Market Trend Analysis.