

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ОТРАСЛИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

С.С. Костинский

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия
mirovingen1987@mail.ru

Резюме: Производители и потребители трансформаторов весьма консервативно относятся ко всем новшествам в трансформаторостроении, т.к. силовым распределительным трансформаторам присущи длительный срок эксплуатации, существенная стоимость и закупочный цикл. Прогресс совершенствования конструкции трансформатора в настоящее время в значительной степени определяется созданием новых и совершенствованием используемых проводниковых, магнитных и изоляционных материалов.

В части создания новых проводниковых материалов, применяемых при производстве силовых трансформаторов, можно выделить высокотемпературные сверхпроводники и, соответственно, созданные с их применением ВТСП трансформаторы. Уже изготовлены и тестируются опытные образцы ВТСП трансформаторов с использованием ВТСП ленты 2-го поколения на основе сверхпроводящей керамики GdBCO. Развитие технологии изготовления высоковольтного кабеля позволило создать кабель с изоляцией из поперечно-сшивного полиэтилена (XLPE) и применить его в области трансформаторных технологий при разработке нового кабельного трансформатора.

В части создания новых магнитных материалов особая роль отводится так называемому, нанокристаллическому сплаву, особенности которого легли в основу создания нового типа аморфных трансформаторов. В настоящее время в мире ведутся работы по разработке лент из аморфных сплавов, обладающих улучшенными магнитными свойствами и дешевизной, в частности Fe(Co)SiBPCSi и 2605SA1. Так же наблюдаются тенденции в изменении типа магнитопровода и его шихтовки. Все более широкое применение при изготовлении силовых трехфазных трансформаторов малой и средней мощности находят витые магнитопроводы, шихтовка которых выполнена по технологии UNICORE. Также проявляется интерес к шихтованным магнитопроводам, выполненным из разных типов электротехнических сталей и получившим название "Sandwich".

В части совершенствования используемых изоляционных материалов можно отметить применение элегаза в трансформаторах взамен трансформаторного масла. Такие трансформаторы получили название элегазовые трансформаторы, и их очевидным преимуществом являются экологичность и пожаробезопасность.

Сейчас много говорится о создании так называемых «умных» электросетей (Smart Grid), и их перехода в будущем к наиболее эффективным системам высшего уровня, именуемым сейчас Microgrid. К указанным электросетям предъявляются определенные требования: обеспечение оптимального коэффициента нагрузки и высокого коэффициента мощности. Приведенные требования, на данный момент, могут быть реализованы только новыми полупроводниковыми трансформаторами, такими как "Sen" трансформатор.

Ключевые слова: ВТСП трансформатор, кабельный трансформатор, аморфный трансформатор, элегазовый трансформатор, трансформатор с литой изоляцией, «умная» электрическая сеть, полупроводниковый трансформатор, объединенный регулятор потока мощности, "Sen" трансформатор.

THE REVIEW OF THE CONDITION OF BRANCH OF TRANSFORMER MANUFACTURE AND TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF POWER TRANSFORMERS

S.S. Kostinskiy

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Russia
mirovingen1987@mail.ru

Abstract: *Manufacturers and consumers of transformers rather conservatively concern all innovations in transformer manufacture since in power distributive transformers are inherent long term of the operation, essential cost and a purchasing cycle. Progress of perfection of a design of the transformer is substantially defined now by creation new and perfection used conduction, magnetic and insulating materials.*

Regarding creation new conduction the materials applied by manufacture of mains transformers, it is possible to allocate high-temperature superconducting materials and, accordingly, the HTS transformers created with their application. Pre-production models of HTS transformers with use HTS of a tape of 2nd generation on the basis of superconducting ceramics GdBCO are already made and are tested. Development of manufacturing techniques of the high-tension cable has allowed to create a cable with isolation from cross linked polyethylene (XLPE) and to apply it in the field of transformer technologies by working out of the new dryformer.

Regarding creation of new magnetic materials the special role is taken away so-called, to the nano-crystal alloy which features have laid down in a basis of creation of new type of amorphous core transformers. Now in the world works on working out of tapes from the amorphous alloys possessing improved magnetic properties and cheapness, in particular Fe(Co)SiBPCCu and 2605SA1 are conducted. As tendencies in change of type of the core and its design are observed. More and more wide application at manufacturing of power three-phase transformers small and a mean power is found by the strip-wound cores which design is executed on technology UNICORE. As interest to a design of cores of the electrotechnical steels executed from different types and received the name “Sandwich” is shown.

Regarding perfection of used insulations materials, it is possible to note application of electrotechnical gas (SF₆) in transformers in circuit-breaker oil replacements. Such transformers have received the name gas-insulated transformers, and their obvious advantage are ecological compatibility and fire safety.

Now it is much spoken about creation of so-called Smart Grid, and their transition in the future to the most effective systems of a highest level called now Microgrid. Certain demands are made to the specified electric systems: maintenance optimum capacity factor and high electrical power factor. The resulted requirements, at present, can be realised only new semi-conductor transformers, such as the “Sen” transformer.

Keywords: *HTS transformer, dryformer, amorphous core transformer, SF₆ gas-insulated transformer, cast resin transformer, smart grid, semi-conductor transformer, united power flow controller, “Sen” transformer.*

Потери электроэнергии являются серьезной проблемой для всей энергетики мира [1]. Передача электроэнергии на большие расстояния от места ее производства до места

потребления требует в современных сетях не менее чем пяти–шестикратной трансформации в повышающих и понижающих трансформаторах. При этом суммарная мощность трансформаторов в сети на каждой следующей ступени с более низким напряжением, в целях более свободного маневрирования энергией, выбирается обычно большей, чем мощность предыдущей ступени более высокого напряжения [1]. Вследствие этих причин общая мощность всех трансформаторов, установленных в сети, превышает генераторную мощность в 6–7 раз [2].

Ежегодное потребление электроэнергии в России находится на уровне 1000 млрд кВт·ч, при этом общие потери электроэнергии в распределительных трансформаторах оцениваются в 75 млрд кВт·ч [3]. Общее количество распределительных трансформаторов в России составляет более 4 млн. шт [4]. Распределительные трансформаторы мощностью 25–630 кВА напряжением 6–10 кВ – наиболее массовая серия производимых и эксплуатируемых трансформаторов в нашей стране и за рубежом [3]. Отсюда можно сделать вывод, что основные потери в энергосистеме приходятся на трансформаторы I–II габаритов [1].

Одним из основных требований, предъявляемых к энергоснабжению, является снижение потерь электроэнергии экономическими средствами [5]. Важные государственные документы, касающиеся энергосбережения. Это, во-первых, Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Во-вторых, распоряжение Правительства РФ от 1 декабря 2009 г. № 1830-р «План мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации». В указанном плане правительству РФ дано указание на формирование предложений по ограничению (запрету) оборота энергетических устройств, характеризующихся неэффективным использованием энергоресурсов. Одно из таких предложений – замена устаревших распределительных трансформаторов на энергоэффективные трансформаторы [4].

Другим, не менее важным государственным документом является стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации, разработанная на период до 2030 года. В ней указано, что отсутствие необходимых инвестиций в электросетевой комплекс в последние 20 лет привело к значительному физическому и технологическому устареванию электрических сетей. Доля распределительных электрических сетей, выработавших свой нормативный срок, составила 50%; 7% электрических сетей выработало 2 нормативных срока. Общий износ распределительных электрических сетей достиг 70 %. Значительная доля установленного оборудования в электросетевом комплексе физически и морально устарела. Средний технический уровень установленного подстанционного оборудования в распределительных электрических сетях по многим параметрам соответствует оборудованию, которое эксплуатировалось в технически развитых странах мира 25–30 лет назад [6].

Одними из основных задач единой технической политики станут:

- внедрение технологии «умных» электрических сетей, позволяющих повысить пропускную способность и стабильность энергоснабжения, сократить потери и издержки на технический и коммерческий учет у потребителя;
- в среднесрочной перспективе уровень износа должен быть снижен в распределительных электрических сетях до 50%;
- внедрение передовых технологий эксплуатации с использованием современных средств диагностики, мониторинга, а также технических и информационно-измерительных систем;
- снижение потерь электроэнергии в российских электросетях при ее передаче и распределении [6].

Вместе с тем, энергосберегающий путь развития отечественной экономики возможен только при формировании и последующей реализации программ энергосбережения на отдельных предприятиях, для чего необходимо создание соответствующей методологической и методической базы [1].

Трансформаторная промышленность – это динамично развивающийся сегмент российской рыночной экономики. После распада СССР значительное количество трансформаторных производств оказалось за пределами России. Оставшимся в РФ крупным трансформаторным заводам приходилось противостоять в конкурентной борьбе заводам из стран ближнего зарубежья и мощным фирмам Европы, Азии и США [7].

В последние годы развитие отраслей ТЭК происходило в следующих внешнеполитических и экономических условиях:

- снижение цены на основные экспортные товары (падение цен на нефть, газ и уголь);
- санкционные ограничения на доступ к финансовым ресурсам и ряду технологий ТЭК;
- замедление темпов роста мировой экономики и сокращение спроса на энергоресурсы, что усилило конкуренцию на основных экспортных рынках;
- на внутреннем рынке спрос на энергоресурсы стабилизировался в связи с сокращением промышленного производства;
- на инвестиционные планы инфраструктурных компаний оказало влияние сдерживание роста тарифов ниже уровня инфляции.

Основными драйверами роста российской энергетики в сложившихся условиях могут быть:

- интеграция энергосистемы Крыма в Российскую энергетику;
- обеспечение энергоснабжения объектов чемпионата мира по футболу 2018 года;
- обновление государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики»;
- разработка долгосрочных программ развития компаний с государственным участием [8].

Из отчетов Минэнерго, Минэкономразвития, ЭНИН им. Кржижановского, отчетов ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЕЭС», из отчетов Системного оператора, выступлений министра энергетики А.В. Новака, из аналитических статей и исследований, опубликованных в СМИ, можно сделать заключение, что наиболее крупными проектами до 2020 года станут развитие электросетевой инфраструктуры на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, а также укрепление электрических связей ОЭС Центра – ОЭС Северо-Запада [8].

Все приведенные оценки пророчат российской экономике хотя и небольшой, но все-таки рост. Следовательно, будет и рост электропотребления, и ввод новых генерирующих мощностей, и ввод новых распределительных сетевых мощностей. Соответственно, и потребность в силовых распределительных трансформаторах будет иметь место [7].

Принципиально отличающихся по конструкции типов масляных силовых трансформаторов всего четыре: ТМ, ТМГ, ТМЗ и ТМН. Однако, несмотря на потребительский спрос, подавляющее большинство отечественных и зарубежных трансформаторных заводов выпускают только типы ТМ и ТМГ, как пользующиеся наибольшим спросом. ГОСТ Р 52719-2007 устанавливает основные технические требования, исходя из которых параметры трансформаторов, изготавливаемых сегодня на отечественных заводах, примерно соответствуют приведенным в нем. В соответствии с указанным стандартом параметры потерь у трансформаторов, выпускаемых разными отечественными заводами, примерно одинаковы [7].

В отличие от отечественных трансформаторов к распределительным трансформаторам, закупаемым в Европейском Союзе, применимы три уровня стандартов:

- международные стандарты (*ISO, IEC*);
- европейские стандарты и нормы (*EN, HD*);
- национальные стандарты (*BSI, NF, DIN, NEN, UNE OTEL*) [9].

Основными из перечисленных стандартов для трансформаторов, эксплуатирующихся в распределительных сетях, являются *HD428* «Трехфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50 Гц от 50 до 2500 кВА с масляным охлаждением и максимальным напряжением не выше 36 кВ» и *HD538* «Трехфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50 Гц от 100 до 2500 кВА с охлаждением сухого типа и максимальным напряжением не выше 36 кВ». В соответствии с указанными стандартами основными параметрами эффективности являются величины потерь нагрузки и холостого хода. Допускается три уровня потерь нагрузки, обозначаемых как *A, B, и C*, и три уровня предельных потерь холостого хода, обозначаемых *A', B' и C'*. Таким образом, существует девять возможных комбинаций. Трансформаторы уровня *C-C'* имеют величину потерь, в любом случае, на 20–30% меньшую, чем *A-A'* и *B-B'* [9].

Формально только уровень *C-C'* для масляных силовых распределительных трансформаторов можно считать эффективным. При этом следует признать, что не существует единого международного признанного критерия, по которому распределительный трансформатор можно было бы отнести к числу энергоэффективных [9].

С тех пор, как принят Федеральный закон № 261-ФЗ, потребность в качественном изменении характеристик силовых трансформаторов резко возросла. А в последнее время актуальность темы возросла еще и из-за кризисных явлений в экономике. Годовая потребность всех потребителей электроэнергии России в силовых трансформаторах для распределительных сетей составляет примерно 57000 штук в диапазоне мощностей 25 ... 6300 кВА. Ежегодный объем рынка силовых трансформаторов I–III габарита в финансовом выражении составляет более 12 млрд руб. Однако, поскольку приведенные значения характеризуют только масляные трансформаторы типа ТМГ и сухие трансформаторы с литой изоляцией типа ТСЛ с алюминиевыми обмотками, это нижняя граница объема рынка в финансовом выражении. Учитывая, что изготавливаются и потребляются рынком и другие, более дорогие типы трансформаторов, следует принять за оценку ежегодного объема рынка силовых трансформаторов I–III габарита сумму около 20 млрд руб [10].

Если сравнить параметры потерь наиболее энергоэффективной комбинации по стандарту *HD428*, то они существенно лучше параметров основной массы силовых трансформаторов, покупаемых российскими потребителями. В связи с этим российским заказчикам силовых распределительных трансформаторов необходимо повышать требования к продукции трансформаторных заводов, требуя энергоэффективные трансформаторы [7]. Однако на проходящих выставках и конференциях с участием представителей заводов изготовителей распределительных трансформаторов к ним практически нет вопросов. Те немногие, что задаются, касаются в основном материала обмоток [11].

В то же время многих интересует степень готовности российских компаний занять на рынке место зарубежных конкурентов и уровень заинтересованности иностранных компаний в локализации производства в РФ. Первый заместитель генерального директора – главный инженер ПАО «МРСК Северо-Запада» отмечает, что сейчас в распределительных сетях очень большой процент износа оборудования. В последнее время он несколько снизился за счет ввода новых мощностей, но в реконструкцию необходимо вкладывать большой объем средств. И здесь без собственных, российских производителей вряд ли можно обойтись. Энергетика – это область стратегическая, и является основой экономики, поэтому необходимо помнить об энергетической безопасности страны [12].

В современных условиях удорожания электроэнергии снижение потерь, повышение коэффициента полезного действия, снижение стоимости и уменьшение габаритов трансформатора является актуальной задачей [13]. Но эволюционность вектора развития

конструкции силового трансформатора экономически определяется противоборством двух тенденций:

- требование рынка к удешевлению трансформатора в целом как товара;
- необходимость применения более дорогих технологий для изготовления трансформатора как товара с более привлекательными потребительскими свойствами.

Сформированные законом спроса и предложения рыночные цены на новые силовые трансформаторы жестко удерживают собственников трансформаторных заводов от революционного развития конструкции трансформатора, т.к. это приведет к его резкому удорожанию [14].

Прогресс совершенствования конструкции трансформатора в настоящее время в значительной степени определяется созданием новых и совершенствованием используемых изоляционных, магнитных и проводниковых материалов [15].

В части создания новых проводниковых материалов, применяемых при производстве силовых трансформаторов, можно выделить высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). Первыми использовать эффект сверхпроводимости при производстве силовых трансформаторов начали европейские концерны *ABB* и *Alstom*, а также *K.E.P.C.* (Япония) и *Westinghouse* (США). Их разработки были направлены на использование низкотемпературных сверхпроводников (НТСП). Однако барьером на пути развития и применения НТСП трансформаторов являлись огромные по размерам криогенные системы для получения жидкого гелия, которые делали использование таких трансформаторов экономически нецелесообразным.

ВТСП материалы были открыты в 1986 году и позволили отказаться от громоздких охлаждающих устройств [15]. ВТСП материал имеет две основные особенности: пренебрежимо маленькие потери при относительно большой плотности тока и «переключающий режим» – переход от практически нулевого значения сопротивления к высокому сопротивлению [5]. В связи с этим применение ВТСП стало перспективно в конструкции обмоток силового трансформатора с целью уменьшения активной мощности потерь короткого замыкания.

Промышленно развитые страны достаточно активно проводят работы по созданию ВТСП трансформаторов. Ведущие промышленно развитые страны (США, Германия, Франция, Япония, Австралия, Швеция, Англия) к настоящему времени произвели опытные образцы ВТСП силовых трансформаторов. Большинство из разработанных проектов трансформаторов основано на применении в качестве ВТСП многожильного транспонированного провода с серебряной или с серебрено-магниевого основой. В качестве базового ВТСП провода для обмотки используется высокопрочная 55-жильная лента *Bi2223* с *AgMg* матрицей [5].

Эксперты выделяют следующие преимущества ВТСП трансформаторов:

- снижение нагрузочных потерь при номинальном токе на 80–90%, что значительно увеличивает КПД трансформатора [15];
- уменьшение веса и габаритов трансформатора до 40% по сравнению с обычными силовыми трансформаторами [16]. Упомянутое достоинство позволяет применять ВТСП трансформаторы в уже существующих подстанциях без их конструктивных изменений со значительным увеличением мощности;
- способность ограничивать токи короткого замыкания [5], что в аварийных режимах защищает электрооборудование сети и повышает динамическую устойчивость [15];
- улучшение статической устойчивости, связанное с уменьшением индуктивного сопротивления. В обмотках ВТСП трансформаторов используется гораздо меньший объем провода в связи с высокой плотностью тока. Это обстоятельство приводит к уменьшению индуктивного сопротивления и, тем самым, оказывает влияние на устойчивость электроэнергетической системы. Таким образом, ВТСП трансформаторы существенно влияют на электромеханические переходные процессы [2].

- большая перегрузочная способность без повреждения изоляции и старения трансформатора [14];

- меньшая опасность для окружающей среды, т.е. экологичность и пожаробезопасность, благодаря замене трансформаторного масла экологически чистым и дешёвым жидким азотом [16].

По данным Министерства энергетики США, сделавшего подробный анализ возможного применения ВТСП трансформаторов мощностью до 30 МВА, затраты (при средней оценке) на весь срок службы при эксплуатации ВТСП трансформаторов будут наполовину меньше по сравнению с затратами на обслуживание традиционно применяемых трансформаторов [15].

Однако у ВТСП трансформаторов есть и существенные недостатки. Они связаны с необходимостью защиты трансформатора от выхода его из сверхпроводящего состояния. При включении трансформатора в сеть ток включения может достигнуть 20-кратного от номинального значения, что может привести к изменению сопротивления ВТСП провода. Этого можно избежать с помощью специального устройства путем предварительного намагничивания, позволяющего включить трансформатор без переходного тока. При нагрузке немного большей номинальной значительно возрастают потери, и длительная работа в этой области неэкономична. Кроме того, после такой перегрузки в течение более 200 мс, даже после отключения требуется несколько минут, чтобы ВТСП трансформатор вернулся в исходное состояние [5]. Поэтому, прежде чем говорить о массовом изготовлении ВТСП трансформаторов, необходимо разработать меры защиты от аварийных режимов и возможности обеспечения потребителей электроэнергией во время простоев ВТСП трансформатора [15].

Основным отрицательным фактором использования высокотемпературной сверхпроводимости в трансформаторах является высокая стоимость ВТСП провода. Если принять стоимость обычного трансформатора за 1, тогда стоимость ВТСП трансформатора, включая стоимость криогенной установки, составляет 1,23 [5].

Т.к. многие производители, особенно японские *Mitsubishi Electric* и *Toshiba*, уже заявили об окончании разработки ВТСП трансформаторов, их первое поступление в продажу в серийных масштабах ожидается в ближайшие несколько лет [15].

В настоящее время разработаны и выпускаются современные ВТСП ленты 2-го поколения представляющие собой сверхпроводниковые провода, в которых слой ReBCO (Re – редкоземельный элемент, Y, Gd, Eu или Dy, BCO – барий-медь-кислород) керамики нанесен различными способами на металлическую (хастеллой, нержавеющей сталь) подложку. ВТСП ленты 2-го поколения производятся несколькими компаниями в США (*SuperPower*, *AMSC*, *STI*), в Японии – *Fujikura*, корейской компанией *SuNAM*, в Германии – компаниями *Bruker* и *THEVA*. Основными преимуществами ВТСП лент 2-го поколения перед НТСП является возможность получения значительно более высоких магнитных полей, более высокая термодинамическая стабильность, и во всех задачах, кроме получения высоких полей, более легкое поддержание рабочей температуры. Еще одно важное преимущество ВТСП – это возможность работать при температурах выше температуры жидкого гелия [17].

Уже изготовлены и тестируются опытные образцы ВТСП трансформаторов с использованием ВТСП ленты 2-го поколения. В частности, в работе [18] говорится о тестировании ВТСП трансформатора (трансформатор *HTS*) мощностью 330 кВА с номинальным напряжением обмотки высшего напряжения 10 кВ, в конструкции которого используются ленты из ВТСП сверхпроводящей керамики на основе гадолиния – $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, сокращенно – $GdBCO$, который является одним из наиболее передовых ВТСП материалов.

Из недостатков ВТСП 2-го поколения можно назвать низкий объем производства по сравнению с НТСП и ВТСП 1-го поколения – всего сотни километров ленты в год во всем

мире, и высокую стоимость за 1 кА·метр. Эти два взаимосвязанных недостатка связаны с пока еще низким спросом на изделия из ВТСП, а низкий спрос, в свою очередь, обусловлен высокой ценой и малым объемом производства, недостаточным для масштабных применений. В будущем, с целью устранения указанных недостатков ВТСП 2-го поколения, потребуются крупные проекты в области энергетики с их применением [17].

Развитие технологии изготовления высоковольтного кабеля позволило создавать кабель с изоляцией из поперечно-сшивного полиэтилена (*XLPE*), допускающего высокую напряженность. *XLPE* – европейское название сшитой изоляции, расшифровывается как: *XL* – *Cross-Linked*, т.е. сшитый, *PE* – *PolyEthylene*, т.е. полиэтилен [5].

Компания *ABB* первой применила *XLPE* кабель в области трансформаторных технологий и разработала новый тип трансформатора – *Dryformer* (кабельный трансформатор) [16]. Функции отдельных частей кабельного трансформатора определены более четко, чем у обычных трансформаторов [5]. Обмотки трансформатора, который является по сути именно сухим, выполняются из кабеля [19], который полностью обеспечивает электрическую изоляцию обмотки. В отличие от обычных трансформаторов обмотка не требует прессовки с опорой на ярмо [5]. Кабель имеет многопроволочную медную или алюминиевую токопроводящую жилу, поверх которой наложен тонкий слой полупроводящего материала [14]. В настоящее время применяется кабель с рабочей напряженностью около 10 кВ/мм. Воздух служит только для охлаждения и не выполняет функции изоляции, как в обычных сухих трансформаторах. Главной функцией аксиальных реек, изготовленных из немагнитного проводящего материала, является обеспечение механической прочности обмоток, в том числе при воздействиях токов короткого замыкания. Так же их назначение – создавать каналы между слоями, обеспечивать охлаждение, создавать механический каркас обмотки и заземление кабеля.

Выделяют следующие преимущества кабельных трансформаторов:

- уменьшение мощности потерь короткого замыкания, благодаря применению в конструкции обмотки специального кабеля, в котором поверх токопроводящей жилы наложен тонкий слой полупроводящего материала, что позволяет устранить неравномерность электрического поля, вызванного многопроволочностью жилы [14];

- пожаробезопасность. В кабельном трансформаторе количество горючих материалов гораздо меньше, чем в обычном трансформаторе. Кроме того, горючесть материалов, применяемых в кабельном трансформаторе, имеет меньшую тенденцию к развитию возгорания, чем горючесть материалов, применяемых в обычном трансформаторе [5];

- экологичность. В кабельном трансформаторе отсутствует трансформаторное масло, и вся изоляция состоит из полиэтилена [5]. Это позволяет исключить утечки трансформаторного масла. Таким образом, кабельные трансформаторы, благодаря своей экологичности, являются подходящими для установки в густонаселенных городах, гидроэлектростанциях, подземных сооружениях и т.д. [20]. Также появляется возможность приблизить их установку к местам потребления энергии, в том числе к бытовым потребителям [5].

- снижение общих потерь в сети благодаря тому, что кабельный трансформатор можно установить как угодно близко к месту нагрузки [16]. В условиях Швеции замена 5 км кабеля 24 кВ на кабель 69 кВ с установкой кабельных трансформаторов в центрах жилых районов позволило бы снизить потери в сети на 8,5 ГВт·ч за 30 лет. [5];

- *XLPE* кабель способен выдержать большое переходное напряжение [20]. В результате этого кабельный трансформатор имеет существенные преимущества как по амплитуде ударной волны, так и по стоимости различных защитных мер [5];

- лучшие показатели надежности по сравнению с обычными трансформаторами, благодаря простоте конструкции [5];

- отсутствие вводов высокого напряжения, т.к. кабель, которым выполнена обмотка, прокладывается к распределительному устройству на любую длину [14].

У кабельных трансформаторов есть и существенные недостатки. Известно, что механические свойства полиэтиленового кабеля изменяются с изменением температуры и, особенно, при высоком ее значении [5]. Поэтому для кабельного трансформатора перегрузка ограничена не старением изоляции, а снижением механической прочности обмотки, изолированной полиэтиленом, при повышении температуры [19].

Основным фактором, препятствующим промышленному применению кабельных трансформаторов в настоящее время, является их высокая стоимость [5]. Стоимость кабельного трансформатора примерно вдвое выше, чем трансформатора с традиционной конструкцией [19]. И не смотря на то, что для кабельного трансформатора потери меньше, следует отметить, что на потери влияют конкретные требования к конструкции и стоимость потерь [5].

Исследования, направленные на дальнейшее развитие технологии изготовления кабеля, связанной с применением его на более высоких напряжениях, и оптимизацию отдельных частей конструкции кабельного трансформатора, позволят в будущем устранить указанные выше недостатки.

По данным американской компании *Metglas* потери за год в силовых трансформаторах распределительных сетей, в которых используется магнитопровод из электротехнической стали, составляют около 8 % их закупочной стоимости [4]. Особую актуальность проблема снижения потерь холостого хода приобретает в связи с реализацией государственной программы энергосбережения, в соответствии с которой ведущим отраслевым энергосистемам при закупке силовых и распределительных трансформаторов рекомендуется учитывать стоимость потерь в оборудовании за весь срок его службы, так как в целом от потерь в магнитопроводах трансформаторов теряется до 4 % производимой в стране электроэнергии [21].

На величину потерь холостого хода в первую очередь влияет тип магнитопровода. Можно выделить три основных типа магнитопроводов, используемых при построении современных силовых трехфазных трансформаторов: шихтованные, витые и порошковые [13].

В настоящее время наиболее массовыми являются трехфазные силовые трансформаторы с шихтованными магнитопроводами. Существует три основных конструкции шихтованных магнитопроводов трехфазных трансформаторов: *BUTT-LAP*, *MITRED CORE*, а также *MULTI STEP-LAP CORE*. Доминирующее положение среди этих конструкций занимает *MULTI STEP-LAP CORE*. Это связано с более простой сборкой магнитопровода, так как при такой шихтовке используется наименьшее количество пластин электротехнической стали в слое и наименьшее количество их типоразмеров [13]. Многошаговое соединение внахлестку *MULTI STEP-LAP CORE* может значительно уменьшить потери в магнитопроводе, магнитострикцию и вибрацию [22]. При применении *MULTI-STEP LAP CORE* шихтовки наблюдается увеличение магнитной индукции – до 120%, а также снижение активных потерь в магнитопроводе на 13% [13].

Несмотря на увеличение поверхности перехода магнитного потока из стержней в ярма при применении *MULTI-STEP LAP CORE* магнитопровода трехфазного трансформатора, уровень потерь холостого хода в нем оказывается значительно большим по сравнению с аналогичным трансформатором, изготовленным с *BUTT-LAP* магнитопроводом. Это обусловлено тем, что при *MULTI-STEP LAP CORE* шихтовке значительно возрастает доля магнитного потока, проходящего поперек пластин. Стоит отметить также, что объем частей магнитопровода с деформированной сталью при косом резе больше, чем при прямом резе, что также отражается на величине активных потерь в магнитопроводе [13].

Таким образом, все достижения применения новых видов шихтовок нивелируются побочными эффектами технологического цикла изготовления пластин электротехнической стали. Нормализационный отжиг позволяет снизить уровень внутренних напряжений в листах электротехнической стали и уменьшить уровень потерь. Но подобный отжиг ведет к

удорожанию стоимости магнитопровода и, как правило, в технологическом процессе подготовки листов электротехнической стали применяется редко [13].

В работе [23] показано, что совместное использование в шихтованных магнитопроводах разных типов электротехнических сталей (анизотропной и изотропной) позволяет улучшить технико-экономические характеристики трансформаторов. Так, заменив анизотропную сталь на изотропную в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма, можно существенно уменьшить потери мощности в магнитопроводе и при этом снизить стоимость всего трансформатора. Такие варианты шихтовок магнитопровода получили название “*Sandwich*”. При таком варианте шихтовки зоны перехода магнитного потока из стержней в ярма полностью состоят из изотропной стали.

Все более широкое применение при изготовлении силовых трехфазных трансформаторов малой и средней мощности находят витые магнитопроводы. Их конструкции развиваются наиболее быстрыми темпами [13]. К условно витой конструкции магнитопровода можно отнести технологию производства магнитопроводов *UNICORE*, разработанную и запатентованную австралийской компанией *A.E.M.Cores*. Магнитный поток не преодолевает препятствие в виде воздушного зазора, а минует его, используя соседние несущие ленты (дорожки), которые, в свою очередь, таких препятствий в этом месте не имеют [14].

Применение порошковых магнитопроводов пока ограничено их высокой стоимостью, малым сортаментом и низкой магнитной индукцией – до 1 Тл [13].

В конце XX века инженерами фирмы *Hitachi Metals* впервые был разработан так называемый, нанокристаллический сплав. Особенности этого материала легли в основу создания нового типа трансформаторов на основе нанокристаллического сплава, получивших название аморфные трансформаторы [1]. Такие трансформаторы перестают быть экспериментальными и переходят в категорию серийных продуктов. В связи с малой толщиной аморфный материал наиболее пригоден для витой конструкции магнитопровода, то есть для трансформаторов малой мощности и распределительных [15].

Трансформаторы с сердечником из аморфной стали серийно выпускаются в США, Канаде, Японии, Индии, Словакии. Всего в мире уже изготовлено 60–70 тыс. единиц трансформаторов мощностью 25–100 кВА. Наибольших успехов добились американская фирма “*Allied Signal*” и японская – “*Hitachi*” [14]. В 2012 году первой в России к выпуску силовых трансформаторов с аморфными сердечниками АТМГ приступила группа «Трансформер» [4].

Не так давно был изготовлен и начал работать крупнейший в Европе трехфазный распределительный трансформатор мощностью 1600 кВ·А с сердечником из аморфной стали. В связи с переходом на изготовление крупногабаритных магнитопроводов энергоэффективных трансформаторов из ленты, получаемой методом сверхбыстрого охлаждения струи готового аморфного расплава, потребовалось создание принципиально новой технологии производства таких магнитопроводов [24].

Основным преимуществом применения аморфного (нанокристаллического) сплава в конструкции магнитопроводов трансформаторов является сокращение потерь энергии в сердечнике трансформатора в среднем на 80% по сравнению с сердечником, выполненным из холоднокатаной электротехнической стали [14].

Недостатком сердечников из аморфных материалов является их более высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами – у японской фирмы эта разница достигает 15–20%. Компания “*Allied Signal*” производит аморфный сплав для трансформаторов на заводе в г. Конуэй (США). Его цена не превышает стоимости кремнистой стали – 2–2,5 долл. США / кг. Тем не менее, руководство фирмы утверждает, что производство таких сердечников обходится дороже в силу большего потребления металла и неотработанности технологического процесса. Еще одной проблемой является усложнение процесса изготовления сердечника по мере увеличения его размеров [14].

Также недостатком является то, что в отличие от традиционных конструкций трансформаторов, у которых магнитопровод из трансформаторной стали является несущей конструкцией, поддерживающей всю активную часть, аморфный магнитопровод, изготовленный из аморфной ленты, из-за низкой механической прочности не допускает воздействия на него чрезмерной весовой нагрузки. Поэтому он крепится к обмоткам, расположенным на несущей базе, и требует дополнительных мероприятий по увеличению жесткости конструкции [24].

Долгое время внедрение аморфных сталей в трансформаторостроении сдерживалось высокой себестоимостью готовой продукции [21]. И хотя аморфные трансформаторы имеют большую стоимость, за счет своей экономичности, в долгосрочной перспективе оказываются более выгодным вложением [1].

В настоящее время в мире проводятся исследования по разработке лент из аморфных сплавов, обладающих улучшенными магнитными свойствами и дешевизной. В частности, в работе [25] говорится о $\text{Fe}(\text{Co})\text{SiBPCCu}$ – нанокристаллическом сплаве с превосходными магнитными свойствами. Превосходные магнитные свойства объясняются однородной микроструктурой с маленьким размером зерна и широкими магнитными доменами сплава. Низкая стоимость данного сплава и превосходные магнитные свойства сделают его в будущем наиболее применяемым при изготовлении магнитопроводов силовых трансформаторов. Также в работе [26] описывается аморфная лента 2605SA1, являющаяся развитием аморфного сплава и обладающая более высокой индукцией насыщения. Экспериментальные исследования, выполненные на силовом трансформаторе мощностью 630 кВА, номинальным напряжением 34,5 / 0,4 кВ, показали, что применение в конструкции магнитопровода аморфной ленты 2605SA1 значительно (приблизительно на 63 %) уменьшило потери мощности холостого хода.

В последние годы вопросам экологии уделяется большое внимание. Трансформаторное масло – один из самых вредных загрязнителей в случае попадания в почву. Однако, оно обеспечивает хорошие электроизоляционные свойства в трансформаторе. Взрывоопасность трансформаторного масла – другая не менее важная опасность, чем экологичность. Поэтому в последнее время в технические требования все чаще включаются трансформаторы, изолированные с помощью газа [27]. Поэтому важной проблемой, в решении которой наблюдается прогресс, является создание пожаро- и взрывобезопасных трансформаторов, не вредящих экологии [15].

Элегаз (электротехнический газ или шестифтористая сера SF_6) был впервые получен и описан французским химиком Анри Муассаном в ходе работ по изучению свойств фтора в конце XIX века. Значительная диэлектрическая прочность элегаза обеспечивает высокую степень изоляции при минимальных размерах и расстояниях, что позволяет уменьшить массу и габариты электротехнического оборудования, а хорошая охлаждаемость элегаза уменьшает нагрев токоведущих частей. Указанные преимущества делают очевидным его применение в трансформаторах взамен трансформаторного масла. Такие трансформаторы получили название элегазовые трансформаторы (SF_6 *gas-insulated transformers*). Очевидными преимуществами элегазовых трансформаторов (ЭТ) являются их экологичность и пожаробезопасность [16].

Поэтому предложенная конструкция трансформатора является, главным образом, подходящей для субмарин, шахт и атомных электростанций, а также там, где есть риск экологической безопасности для окружающей среды. Кроме этих преимуществ, новая конструкция элегазовых трансформаторов компактна в конструкции и легче, чем традиционные силовые трансформаторы [27].

Однако существенно меньшая импульсная прочность и теплопередающая способность элегаза заставляют значительно увеличивать давление SF_6 внутри бака трансформатора (2,5 кг/см² и выше), что делает применение ЭТ экономически невыгодным [16]. Другой, не менее важной проблемой является регулярная диагностика состояния ЭТ. В

настоящее время ведутся активные работы по анализу газов, как надежному способу поддержания безопасной работы трансформатора в течение продолжительного времени. В частности предлагается использовать адаптивное нейро-нечеткое устройство вывода (ANFIS). ANFIS позволяет анализировать составляющие SF_6 , что помогает в раннем обнаружении и диагностике неисправностей трансформатора. Данная работа поддерживается государственной корпорацией Индии APTRANSCO [28].

Все жидкие диэлектрики, используемые в трансформаторах, должны удовлетворять следующим требованиям: быть самогасящимися, нетоксичными, биоразлагаемыми, иметь низкий коэффициент объемного расширения при нагреве. Этим требованиям отвечают синтетические кремний-органические жидкости, в частности полидиметилсилоксаны, которые обладают достаточно низкой вязкостью, свойствами самогашения и хорошими охлаждающими свойствами. Их применение в трансформаторах становится уже нормой [15].

Требованиям пожаро- и взрывобезопасности, а так же экологичности отвечают сухие трансформаторы [29]. Можно выделить два основных типа сухих силовых трансформаторов: с литой изоляцией и воздушно-барьерной изоляцией (открытые обмотки) [19]. Их применение позволяет экономить электроэнергию за счет снижения потерь в кабельных сетях низкого напряжения, возможности размещать понизительные трансформаторные пункты максимально близко к потребителям низкого напряжения. Это отражает общую тенденцию распределения электроэнергии в сетях на более высоком уровне напряжений [29].

Применение сухих трансформаторов обеспечивает снижение затрат на строительство, поскольку:

- нет опасности утечки масла;
- обычно габариты и масса сухих трансформаторов меньше аналогичных по мощности масляных;
- сухие трансформаторы могут располагаться существенно ближе к потребителям, чем масляные [29].

Общей проблемой сухих трансформаторов является ограничение их максимальной мощности, обусловленное условиями охлаждения [19].

Передовые достижения в области пожаро- и взрывобезопасности сухих трансформаторов с литой изоляцией, серийно производимых в России, принадлежат торговой марке «ТРИАЛ». В трансформаторах этой марки литая изоляция обмотки состоит из эпоксидной смолы с инертными и огнестойкими наполнителями. Активный порошковый наполнитель состоит из кремнезема (диоксид кремния) и тригидрата алюминия ($Al(OH)_3$). Кремнезем усиливает механическую прочность литой изоляции и улучшает рассеивание тепла. Тригидрат алюминия обеспечивает уникальные свойства трансформатора, проявляющиеся когда трансформатор подвергается внешнему воздействию пламени:

- образуется отражающий огнеупорный экран из глинозема Al_2O_3 (окись алюминия), который защищает обмотки высокого напряжения от воздействия высокой температуры;
- образуется преграда из водяного пара, т.к. при разложении тригидрата алюминия $Al(OH)_3$ происходит образование «паровой рубашки», которая снижает температуру обмоток трансформатора и воздействует на пламя;
- температура удерживается ниже точки воспламенения, поскольку реакция разложения тригидрата алюминия $Al(OH)_3$ происходит с активным поглощением энергии.

В результате сочетания трех противопожарных эффектов происходит немедленное самогашение трансформатора [30]. За рубежом аналогичным достижением можно считать серийное производство трансформаторов марки CRT (*cast resin transformer*) [31].

Таким образом, из логики технического прогресса, из требований многочисленных потребителей силовых трансформаторов, из анализа потребностей рынка можно сделать вывод о взаимодополнении сегментов трансформаторного рынка: заказчикам нужны и масляные, и сухие трансформаторы [19]. Преимущества сухим трансформаторам дают

новые изоляционные материалы, современные принципы конструирования и технологии изготовления [29]. Также имеет место тенденция изменения соотношения спроса в пользу сухих трансформаторов [19].

Сейчас много говорится о создании так называемых «умных» электросетей (*Smart Grid*) [15]. Термин “*Smart Grid*” означает построение интеллектуальной электрической распределительной сети, позволяющей снизить потери в ней. Также эти системы направлены на гораздо более эффективную эксплуатацию, оптимизацию и распределение нагрузки в сети [14]. Строительство систем, в которые легко впоследствии интегрировать возобновляемые источники энергии, предлагается назвать *Mid-Small Grid (M-S Grid)* и рассматривать их в виде переходного периода к наиболее эффективным системам высшего уровня, именуемым сейчас *Microgrid*, где в перспективе источник и потребитель энергии будут представлять собой единое целое [32]. Такие системы позволяют перейти к надежной интеграции систем распределения энергетических ресурсов (*DERs*), которые включают в себя системы аккумулирования энергии и системы ее потребления (нагрузки). Желательные характеристики *Microgrid* – это возможность управления выходным напряжением, осуществление текущего контроля различных параметров *DER*, способность симметрировать мощность и экономично распределять нагрузки, а также способность работать как в автономном режиме, так и в составе единой энергосистемы [33]. Многие развитые государства уже создают подобные системы [15].

С одной стороны, в *Smart Grid* распределительный трансформатор используется, чтобы обеспечить интеграцию низковольтной *Microgrid* переменного тока в систему распределения среднего напряжения. С другой стороны, распределительные трансформаторы помещены между *DERs* и линиями переменного тока и формируют *Microgrid* [34]. Они должны обеспечить оптимальный коэффициент нагрузки – это, прежде всего, отсутствие колебаний напряжений в сети, как в первичной, так и во вторичной, а также высокий коэффициент мощности – это компенсация реактивной мощности [14]. Следовательно, для новых сетей нужны и новые трансформаторы [15].

Чтобы скомпенсировать колебания напряжения, необходимо переключаться с одной вторичной обмотки на другую, с отличающимся числом витков. В настоящее время напряжение в сети регулируется трансформаторами, в которых переключения между обмотками осуществляются электромеханическим способом, при котором наблюдается быстрый износ контактов. Надежность полупроводниковых переключателей существенно выше. Однако и управлять ими существенно сложнее. Поэтому наиболее перспективным признано использование в качестве электронных переключателей тиристоров – полупроводниковых устройств, использующих свойства *p-n*-перехода [14]. В новых полупроводниковых трансформаторах будут использоваться специальные компьютерные чипы, которые смогут быстро и качественно регулировать напряжение в более широких пределах. По мнению экспертов полупроводниковые трансформаторы дадут возможность оптимально управлять нагрузками и потреблением электроэнергии в каждом доме и хорошо дополняют *Smart Grid*. По данным исследования использование таких трансформаторов позволит сэкономить в США до 3 процентов энергии, что в несколько раз больше, чем вырабатывается всеми американскими солнечными панелями [15].

В целях регулирования реактивной мощности возможно последовательное подключение с линией электропередачи регуляторов перетока мощности. Объединенный регулятор перетока мощности (*UPFC*) является одним из них. Однако до настоящего времени высокие затраты на монтаж и эксплуатацию предотвратили широкую практику применения в распределительных сетях *UPFC*. «*Sen*» трансформатор может выполнять те же функции, что и *UPFC*, но с более низкими затратами, более высокой надежностью и КПД [35].

“*Sen*” трансформатор представляет собой совокупность трансформатора и переключателя ответвлений, которые традиционно используются, чтобы построить регулировочный трансформатор напряжения и регулятор угла сдвига фаз. “*Sen*” трансформатор

регулирует напряжение в линии электропередачи, а также обеспечивает независимое и двунаправленное регулирование расхода в линии электропередачи активной и реактивной мощности, как конвертер напряжения, на основе объединенного *UPFC* [36]. Задавая с помощью переключателя ответвлений различные комбинации, “*Sen*” трансформатор может корректировать напряжение, управляя его величиной, и угол сдвига фаз, т.е. выполнять те же функции, что и *UPFC*, и таким образом обеспечивать контроль перетока мощности, что соответствует понятию умного регулятора перетока мощности (*SPFC*) [35].

“*Sen*” трансформатор имеет возможность обеспечить контроль перетока активной и реактивной мощности в большинстве распределительных сетей [37]. Однако еще ни один “*Sen*” трансформатор не эксплуатируется в энергосистеме [35].

В истоках *M-S Grid* также стоит разработка идеи адресного снабжения электроэнергией. Для адресных комплектных трансформаторных подстанций необходимы сухие силовые трехфазные и однофазные (фактически двухфазные) энергоэкономичные трансформаторы, достаточно надежные и относительно недорогие. Первые промышленные образцы таких трансформаторов с маркой *TSG* уже производятся ООО «ЭлЭнергоМаш». Высшее напряжение трансформаторов указанной марки составляет 6 кВ, номинальная мощность – 40, 63, 100 кВА. Магнитопровод таких трансформаторов, выполненный из электротехнической стали 3408 (3409), витой, неразрезной и отожженный. В поперечном сечении магнитопровод прямоугольный, в продольном – овалный. Использование такой конструкции позволяет достигнуть весьма удовлетворительных значений основных параметров трансформатора и обеспечить требования, предъявляемые к трансформаторам адресной сети [32].

Выводы:

1. Одними из основных задач единой технической политики на период до 2030 года станут: внедрение технологии «умных» электрических сетей и передовых технологий эксплуатации, а также снижение потерь электроэнергии в электросетях при ее передаче и распределении.

2. Основными драйверами роста российской энергетики в непростых внешнеполитических и экономических условиях могут стать: интеграция энергосистемы Крыма в Российскую энергетику и обеспечение энергоснабжения объектов чемпионата мира по футболу 2018 года, а также обновление государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики».

3. Параметры потерь наиболее энергоэффективной комбинации по европейскому стандарту *HD428* существенно лучше параметров основной массы силовых трансформаторов, производимых на отечественных предприятиях. В связи с этим, в целях повышения конкурентоспособности отечественных производителей трансформаторов как на внутреннем, так и на внешних рынках, необходимо улучшать конструкцию силовых трансформаторов в части повышения их энергоэффективности.

4. Прогресс совершенствования конструкции трансформаторов в настоящее время в значительной степени определяется созданием новых и совершенствованием используемых проводниковых, магнитных и изоляционных материалов.

5. В части создания новых проводниковых материалов, применяемых при производстве силовых трансформаторов, можно выделить высокотемпературные сверхпроводники и, соответственно, созданные с их применением ВТСП трансформаторы. Уже изготовлены и тестируются опытные образцы ВТСП трансформаторов с использованием ВТСП ленты 2-го поколения на основе сверхпроводящей керамики *GdBCO*.

6. Развитие технологии изготовления высоковольтного кабеля позволило создать кабель с изоляцией из поперечно-сшивного полиэтилена (*XLPE*) и применить его в области трансформаторных технологий при разработке нового кабельного трансформатора.

7. В части создания новых магнитных материалов особая роль отводится так называемому нанокристаллическому сплаву, особенности которого легли в основу создания

нового типа аморфных трансформаторов. В настоящее время в мире ведутся работы по разработке лент из аморфных сплавов, обладающих улучшенными магнитными свойствами и дешевизной, в частности Fe(Co)SiBPCCu и 2605SA1.

8. Наблюдаются тенденции в изменении типа магнитопровода и его шихтовки. Все более широкое применение при изготовлении силовых трехфазных трансформаторов малой и средней мощности находят витые магнитопроводы, шихтовка которых выполнена по технологии *UNICORE*. Также проявляется интерес к шихтованным магнитопроводам выполненным из разных типов электротехнических сталей и получившим название “*Sandwich*”.

9. В части совершенствования используемых изоляционных материалов можно отметить применение элегаза в трансформаторах взамен трансформаторного масла. Такие трансформаторы получили название элегазовые трансформаторы, и их очевидным преимуществом являются экологичность и пожаробезопасность.

10. В настоящее время много говорится о создании так называемых «умных» электросетей (*Smart Grid*), и их переходе в будущем к наиболее эффективным системам высшего уровня, именуемым сейчас *Microgrid*. К указанным электросетям предъявляются определенные требования: обеспечение оптимального коэффициента нагрузки и высокого коэффициента мощности. Приведенные требования на данный момент могут быть реализованы только новыми полупроводниковыми трансформаторами, такими как “*Sen*” трансформатор.

Литература

1. Проценко П.П., Барас А.В. Снижение потерь электроэнергии при электроснабжении предприятий на основе внедрения усовершенствованных силовых трансформаторов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2016. С. 201–205.
2. Манусов В.З., Александров Н.В. Влияние сверхпроводящих трансформаторов на устойчивость электроэнергетической системы // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 3 (52). С. 160–165.
3. Еремин И.В., Тихонов А.И., Попов Г.В. Особенности реализации системы проектирования трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2014. №5. С. 27–31.
4. Хавроничев С.В., Сошинов А.Г., Галушак В.С., Копейкина Т.В. Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах силовых трансформаторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12–4. С. 607–610.
5. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. Лизунова С.Д., Лоханина А.К. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
6. Распоряжение Правительства Российской Федерации "Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации" от 3 апреля 2013 г. № 511-р.
7. Савинцев Ю.М. Силовые распределительные трансформаторы: состояние отрасли в современных экономических условиях // Новое в российской электроэнергетике. 2012. № 5. С. 29–40.
8. Экспертный анализ рынка силовых трансформаторов России. Часть 2. IV–VIII габарит / Савинцев Ю.М. М.: Издательские решения, 2016. 86 с.
9. Перевод с английского Мельниковой Е.В. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов // Энергосбережение. 2004. № 1. С. 61–66.
10. Экспертный анализ рынка силовых трансформаторов России. Часть 1. I–III габарит / Савинцев Ю.М. М.: Издательские решения, 2017. 86 с.
11. Журавлев В. Корпоративный презентационный день ПАО «МРСК Северо-Запада». Высоковольтное оборудование 6–35 кВ: инновационные решения, импортозамещение // Новости Электротехники. 2015. № 4 (94).

12. Журавлев В. ПЕТЕРБУРГ – МОСКВА – 2015. Анализ потребностей, оценка возможностей // *Новости Электротехники*. 2015. № 3 (93).
13. Levin M.I., Пентегов И.В., Рымар С.В., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // *Электротехніка і електромеханіка*. 2014. № 1. С. 40–44.
14. Савинцев Ю.М. Энергоэффективные силовые трансформаторы: тенденции развития конструкции и характеристик энергосбережения // *Новое в российской электроэнергетике*. 2012. № 10. С. 40–45.
15. Канарейкин А. «Умные» трансформаторы для «умной» энергетики // *Энергетика и промышленность России*. 2012. № 8 (196).
16. Белкин Г.С., Дробышевский А.А., Ивакин В.Н., Ковалев В.Д., Панибратец А.Н. Перспективные виды электротехнического оборудования // *Электротехника*. 2006. № 9. С. 2–9.
17. Новиков М.С. Разработка, изготовление и исследование высокоточных токонесящих элементов из ВТСП лент 2-го поколения: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.13. М., 2015. 186 с.
18. Hu D., Li Z., Hong Z., Jin Z. Development of a single-phase 330 kVA HTS transformer using GdBCO tapes // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2017. № 539. P. 8–12.
19. Савинцев Ю.М. Сухие силовые трансформаторы: жесткая альтернатива // *Главный энергетик*. 2013. № 6. С. 20–26.
20. Gao Y., Wang S., Gao H. A new type of dry power transformer based on XLPE cable winding // *ICEMS 2005: Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2005. № 3. P. 1771–1774.
21. Тихонов А.И., Попов Г.В., Еремин И.В. Особенности методики расчета холостого хода трансформатора с сердечником из аморфной стали // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2013. № 4. С. 32–36.
22. Hsu C.-H., Lee C.-Y., Cheng S.-J., Fu C.-M., Chang C.-W. Effects of magnetostriction and magnetic reluctances on magnetic properties of distribution transformers // *Journal of Applied Physics*. 2014. No. 17 (115).
23. Пентегов И.В., Рымар С.В., Levin M.I., Lavreniuk A.V. Определение магнитных индукций в магнитопроводах силовых трансформаторов при совместном использовании анизотропной и изотропной электротехнических сталей // *Электротехніка і електромеханіка*. 2015. № 6. С. 31–35.
24. Охотников М.В., Токарчук А.И., Ахмеров Р.Р., Зайцева М.Б., Зарипова В.А. Использование трансформаторов с магнитопроводом из амфотерных сплавов // *Наука вчера, сегодня, завтра*. 2016. № 1 (23). С. 88–95.
25. Liu T., Kong F., Xie L., Wang X., Liu C.-T. Fe(Co)SiBPCCu nanocrystalline alloys with high Bs above 1.83 T // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. № 441. P. 174–179.
26. Najafi A., Iskender I. Comparison of core loss and magnetic flux distribution in amorphous and silicon steel core transformers // *Electrical Engineering*. 2017. P. 1–7.
27. Ozgonenel O., Font A., Pihan S. Electrostatic analysis of SF6 gas insulated distribution transformer // *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering, ELECO 2016*. 2017. P. 359–362.
28. Vani A., Sree Rama Chandra Murthy P. An automated tool for analyzing dissolved gases in power transformers and SF6 in switch gears using Artificial Intelligence approaches // *Journal of Electrical Engineering*. 2015. № 2 (15). P. 262–274.
29. Васильев С. Будущее за сухими трансформаторами // *Новости Электротехники*. 2002. № 3 (15).
30. Постников М. Трансформаторная ТРИАЛЬность // *Новости Электротехники*. 2002. № 3 (15).
31. Yuen D.C.M., Choi V., Gao L.Z., Han J. The first 110 KV / 35 KV - 31.5 MVA cast resin transformer // *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 2004. № 2. P. 763–767.
32. Назаров В. Распределительные сети 10(6)/0,4 кВ. Вопросы реконструкции // *Новости Электротехники*. 2014. № 4 (88).

33. Kakran S., Chanana S. Smart operations of smart grids integrated with distributed generation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. № 81. P. 524–535.

34. Bui D.M., Chen S.-L., Lien K.-Y., Lee Y.-D., Jiang J.-L. Investigation on transient behaviours of a uni-grounded low-voltage AC microgrid and evaluation on its available fault protection methods // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. № 75. P. 1417–1452.

35. Liu J., Dinavahi V. Nonlinear Magnetic Equivalent Circuit-Based Real-Time Sen Transformer Electromagnetic Transient Model on FPGA for HIL Emulation // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016. № 6 (31). P. 2483–2493.

36. Sen K.K., Sen M.L. Introducing the family of "Sen" transformers: A set of power flow controlling transformers // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. № 1 (18). P. 149–157.

37. Sen K.K., Sen M.L. Comparison of the "Sen" transformer with the unified power flow controller // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. № 4 (18). P. 1523–1533.

Автор публикации

Костинский Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электропривод» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

References

1. Procenko P.P., Baras A.V. [Decrease in losses of the electric power at electrosupply of the enterprises on the basis of introduction of advanced mains transformers] *Jenergo- i resursosberezhenie v teplojenergetike i social'noj sfere: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov, uchenyh. - Cheljabinsk: Juzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet (nacional'nyj issledovatel'skij universitet) [Energ - and savings of resources in power system and social sphere: materials of the international scientific and technical conference of students, post-graduate students, scientific. Chelyabinsk: the South Ural state university (national research university)], 2016, pp. 201–205.*

2. Manusov V.Z., Aleksandrov N.V. [Influence of superconducting transformers on stability of an electropower system] *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [The scientific bulletin of Novosibirsk state technical university], 2013, no 3 (52), pp. 160–165.*

3. Eremin I.V., Tihonov A.I., Popov G.V. [Features of realisation of system of designing of transformers with the core from an amorphous steel] *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergetičeskogo universiteta [The bulletin of the Ivanovo state power university], 2014, no 5, pp. 27–31.*

4. Havronichev S.V., Soshinov A.G., Galushhak V.S., Kopejkina T.V. [Modern lines of application of amorphous alloys in cores of mains transformers] *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij [The international magazine applied and basic researches], 2015, no 12–4, pp. 607–610.*

5. Lizunov S.D., Lohanin A.K. *Silovye transformatory. Spravochnaja kniga [Power transformers. The help book], Moscow, Power publishing house, 2004, 616 p.*

6. *Rasporjazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii "Strategija razvitija jelektrosetevogo kompleksa Rossijskoj Federacii" [The order of the Government of the Russian Federation "Strategy of development of an electronetwork complex of the Russian Federation"], from April, 3rd, 2013, no 511-r.*

7. Savincev Ju.M. [Power distributive transformers: a branch condition in modern economic conditions] *Novoe v rossijskoj jelektrojenergetike [New in the Russian electric power industry], 2012, no 5, pp. 29–40.*

8. Savincev Ju.M. *Jekspertnyj analiz rynka silovyh transformatorov Rossii. Chast' 2. IV–VIII gabarit [The expert analysis of the market of power transformers of Russia. A part 2. IV–VIII dimension], Moscow, Publishing decisions, 2016, 86 p.*

9. *Perevod s anglijskogo Mel'nikovoj E.V. [Energy conservation in Europe: application of energetically effective distributive transformers] Jenergosberezhenie [Energy conservation], 2004, no 1, pp. 61–66.*

10. Savincev Ju.M. Jekspertnyj analiz rynka silovyh transformatorov Rossii. Chast' 1. I – III gabarit [The expert analysis of the market of power transformers of Russia. A part 1. I - III dimension], Moscow, Publishing decisions, 2017, 86 p.
11. Zhuravlev V. [Corporate presentation day Public joint-stock company "Northwest MRSK". The high-voltage equipment 6 – 35 kV: innovative decisions, import replacement] *Novosti Jelektrotehniki* [News Electrical engineers], 2015, no 4 (94).
12. Zhuravlev V. [Petersburg - Moscow - 2015. The analysis of requirements, an estimation of possibilities] *Novosti Jelektrotehniki* [News Electrical engineers], 2015, no 3 (93).
13. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. [The analysis of designs of sheet cores of power three-phase transformers] *Elektrotehnika i elektromehanika* [The electrical engineer and electromechanics], 2014, no 1, pp. 40–44.
14. Savincev Ju.M. [Power effective power transformers: tendencies of development of a design and characteristics of savings of energy] *Novoe v rossijskoj jelektrojenergetike* [New in the Russian electric power industry], 2012, no 10, pp. 40–45.
15. Kanarejkin A. ["Clever" transformers for "clever" power] *Jenergetika i promyshlennost' Rossii* [Power and the industry of Russia], 2012, no 8 (196).
16. Belkin G.S., Drobyshevskij A.A., Ivakin V.N., Kovalev V.D., Panibratc A.N. [Perspective kinds of the electrotechnical equipment] *Jelektrotehnika* [The electrical engineer], 2006, no 9, pp. 2–9.
17. Novikov M.S. Razrabotka, izgotovlenie i issledovanie sil'notochnyh tokonesushhih jelementov iz VTSP lent 2-go pokolenija [Working out, manufacturing and research of current-carrying elements for the big currents from BTCII tapes of 2nd generation], *cand.tech.sci.*, Moscow, 2015, 186 p.
18. Hu D., Li Z., Hong Z., Jin Z. [Development of a single-phase 330 kVA HTS transformer using GdBCO tapes] *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2017, no 539, pp. 8–12.
19. Savincev Ju.M. [Dry mains transformers: rigid alternative] *Glavnyj jenergetik* [Main energetics], 2013, no 6, pp. 20–26.
20. Gao Y., Wang S., Gao H. [A new type of dry power transformer based on XLPE cable winding] *ICEMS 2005: Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, no. 3, pp. 1771–1774.
21. Tihonov A.I., Popov G.V., Eremin I.V. [Features of a design procedure of idling of the transformer with the core from an amorphous steel] *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta* [The bulletin of the Ivanovo state power university], 2013, no 4, pp. 32–36.
22. Hsu C.-H., Lee C.-Y., Cheng S.-J., Fu C.-M., Chang C.-W. [Effects of magnetostriction and magnetic reluctances on magnetic properties of distribution transformers] *Journal of Applied Physics*, 2014, no. 17 (115).
23. Pentegov I.V., Rymar S.V., Levin M.I., Lavreniuk A.V. [Definition of a flux density in cores of mains transformers at sharing of anisotropic and isotropic electrotechnical steels] *Elektrotehnika i elektromehanika* [The electrical engineer and electromechanics], 2015, no 6, pp. 31–35.
24. Ohotnikov M.V., Tokarchuk A.I., Ahmerov R.R., Zajceva M.B., Zaripova V.A. [Use of transformers with the core from amorphous alloys] *Nauka vchera, segodnja, zavtra* [Science yesterday, today, tomorrow], 2016, no 1 (23), pp. 88–95.
25. Liu T., Kong F., Xie L., Wang X., Liu C.-T. [Fe(Co)SiBPCCu nanocrystalline alloys with high Bs above 1.83 T] *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, no. 441, pp. 174–179.
26. Najafi A., Iskender I. [Comparison of core loss and magnetic flux distribution in amorphous and silicon steel core transformers] *Electrical Engineering*, 2017, P. 1–7.
27. Ozgonenel O., Font A., Ilhan S. [Electrostatic analysis of SF6 gas insulated distribution transformer] *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering, ELECO 2016*, 2017, pp. 359–362.
28. Vani A., Sree Rama Chandra Murthy P. [An automated tool for analyzing dissolved gases in power transformers and SF6 in switch gears using Artificial Intelligence approaches] *Journal of Electrical Engineering*, 2015, no. 2 (15), pp. 262–274.

29. Vasil'ev S. [The future behind dry transformers] *Novosti Jeлектrotehniki* [News Electrical engineers], 2002, no 3 (15).

30. Postnikov M. [Transformer TRIAL'nost'] *Novosti Jeлектrotehniki* [News Electrical engineers], 2002, no 3 (15).

31. Yuen D.C.M., Choi V., Gao L.Z., Han J. [The first 110 KV / 35 KV - 31.5 MVA cast resin transformer] *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2004, no. 2, pp. 763–767.

32. Nazarov V. [Distributive networks 10 (6) / 0,4 kV. Questions of reconstruction] *Novosti Jeлектrotehniki* [News Electrical engineers], 2014, no 4 (88).

33. Kakran S., Chanana S. [Smart operations of smart grids integrated with distributed generation] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, no. 81, pp. 524–535.

34. Bui D.M., Chen S.-L., Lien K.-Y., Lee Y.-D., Jiang J.-L. [Investigation on transient behaviours of a uni-grounded low-voltage AC microgrid and evaluation on its available fault protection methods] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, no. 75, pp. 1417–1452.

35. Liu J., Dinavahi V. [Nonlinear Magnetic Equivalent Circuit-Based Real-Time Sen Transformer Electromagnetic Transient Model on FPGA for HIL Emulation] *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, no. 6 (31), pp. 2483–2493.

36. Sen K.K., Sen M.L. [Introducing the family of "Sen" transformers: A set of power flow controlling transformers] *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, no. 1 (18), pp. 149–157.

37. Sen K.K., Sen M.L. [Comparison of the "Sen" transformer with the unified power flow controller] *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, no. 4 (18), pp. 1523–1533.

Author of the publication

Sergey S. Kostinskiy – Cand. Sci. (Techn.), associate professor, Department «Electricity and electric », Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

Поступила в редакцию

22 сентября 2017 г.