

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Пуйло Г.В., д.т.н., проф., Кузьменко И.С., Тонгалюк В.В.
Одесский национальный политехнический университет
Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра "Электрические машины",
E-mail: puilo@ukr.net, ricowriter@gmail.com

Розглянуті тенденції розвитку інноваційних засобів та технічних рішень удосконалення розподільчих трансформаторів.

Рассмотрены тенденции развития инновационных средств и технических решений совершенствования распределительных трансформаторов.

Проблема совершенствования силовых распределительных трансформаторов с каждым годом становится все более актуальной во всем мире, поскольку их доля в структуре систем электроснабжения наиболее значительна.

Особое значение эта проблема имеет для Украины в связи с необходимостью технического переоснащения распределительных электросетей и ввода до 2010 г. в эксплуатацию около 70 млн кВА трансформаторных мощностей и около 300 тыс. км воздушных линий электропередач [10].

По данным [29] потери электрической энергии в распределительных сетях Украины в 2001 г. составили до 20% от всей отпущенной с шин электростанций, тогда как в Германии эти потери составили всего около 5%. Значительную долю этих потерь составляют потери в распределительных трансформаторах классов напряжения 6-35 кВ.

Важнейшей проблемой в связи с превышением нормативных сроков эксплуатации основного парка распределительных трансформаторов является также проблема продления их надежной работы до 50-60 лет при обеспечении приемлемого уровня надежности и, по возможности, снижения уровня потерь.

Решение этой проблемы актуально не только для Украины, но и для всех развитых стран мира (в России около 30% силовых трансформаторов отработали более 25 лет, а в США (1997 г.) таких трансформаторов около 65%), поэтому она становится одним из важных направлений развития мировой энергетики.

При этом приходится учитывать, что в современных условиях рыночной конкуренции и мониторинга окружающей среды к трансформаторам, как новейших конструктивных исполнений, так и к модифицируемым, существенно повысились требования по энерго- и ресурсосбережению, пожаро- и взрывобезопасности, экологичности, конкурентоспособности.

Необходимый уровень парка силовых распределительных трансформаторов обеспечивается двумя путями:

- выпуском новых серий трансформаторов, как традиционных конструктивных исполнений, так и с использованием инновационных электротехнических материалов и технических решений.

- за счет ремонта и модернизации трансформаторов, которые, как правило, уже отработали нормативный срок эксплуатации. Причем их модернизация может быть выполнена с перепроектированием на основе новейших электротехнических материалов и технических решений с увеличением нормативного срока эксплуатации и мощности.

Ведущими трансформаторостроительными фирмами и научно-исследовательскими электротехническими организациями мира, в том числе Украины и стран СНГ разработан обширный арсенал электро-

технических материалов, технологических процессов, технических решений, конструктивных исполнений для распределительных трансформаторов, которые могут быть использованы и уже используются для совершенствования как модернизируемых трансформаторов, так и в трансформаторах новых конструктивных исполнений.

Причем эти инновации относятся ко всем компонентам трансформаторного устройства, начиная от магнитной системы и заканчивая системами мониторинга [26] и шумоподавления.

Для решения вопросов целесообразности и обоснования использования тех или иных новых технических решений и технологических процессов необходим анализ и сопоставление перспективных тенденций развития современных распределительных трансформаторов.

Анализ основных показателей новых технических решений и новых конструктивных исполнений распределительных трансформаторов показал, что их совершенствование идет по направлениям снижения потерь, расхода электротехнических материалов, повышения надежности и экологичности.

В трансформаторах основные потери возникают в стали магнитной системы (потери холостого хода) и в обмотках (потери короткого замыкания).

Прогресс электротехнических сталей в последние годы обусловлен развитием двух направлений в технологии их производства [11, 21, 25].

Первое, традиционное направление, основано на выплавке сплава, горячей прокатке с последующей холодной деформацией (холодной прокаткой) и термической обработкой на конечной стадии изготовления.

Второе направление основывается на получении быстрозакаленной ленты путем разлива расплава на поверхность валика-холодильника, который вращается с большой скоростью. Развитие этих направлений привело к получению новых типов электротехнической стали с высокой магнитной индукцией и малыми потерями и ускорило совершенствование сталей на основе традиционных сплавов Fe-Si.

Для магнитных систем распределительных трансформаторов основной остается анизотропная электротехническая сталь (АЭС). Характеристики этой стали в последнее время существенно улучшены за счет совершенствования ее кристаллографической текстуры ребровой ориентации, уровень которого определяется требованиями потребителей и величиной рабочей продукции. Свойства этой стали зависят также от размеров кристаллов. При низких рабочих индукциях целесообразно использовать сталь с мелким зерном, при высоких индукциях – с крупным, поскольку в такой стали значительна доля потерь от вихревых токов из-за преобладания широких доменов. Для искусственного уменьшения размеров доме-

нов на поверхность листов наносятся царапины поперек направления прокатки, возле которых формируются замыкающие домены, создаются искусственные барьеры. Эти барьеры формируются обычно лазерной обработкой [5, 26]. Потери в АЭС снижают также за счет улучшения качества поверхности листов и уменьшения их толщины до 0,23-0,27 мм. Применение всех этих мероприятий позволяет получить уровень магнитных потерь при индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц $P_{1,7/50} = 0,4$ Вт/кг.

Лучшие марки сталей с высокой магнитной проницаемостью имеют удельные потери 0,8-0,85 Вт/кг. Разработанные в Японии АЭС типа Ni-V широко применяются в мировом трансформаторостроении и при толщине 0,23мм имеют удельные потери 0,75 Вт/кг.

Для наилучшего использования свойств АЭС конструкции магнитных систем должны обеспечивать протекание основного магнитного потока вдоль прокатки стали.

На основе быстрозакаленных сплавов реально применение электротехнических сталей из аморфных и микрокристаллических сплавов, которые предназначены для работы с высокой индукцией насыщения в низкочастотной области.

Одним из преимуществ аморфных сплавов является возможность получения различных магнитных свойств за счет формирования наведенной магнитной анизотропии после охлаждения в магнитном поле, что позволяет получить аморфную ленту с изотропным или анизотропным распределением намагниченности и с формированием оси анизотропии в любом заданном направлении. Толщина аморфной ленты на порядок меньше толщины ленты АЭС, а в состав сплава входят железо, никель, кобальт, титан, магний, кремний и др. Это, наряду с высоким электрическим сопротивлением уменьшает долю потерь от вихревых токов $P_{1,7/50}$ до 10%. Микрокристаллическую ленту получают при быстрой закалке расплава между двумя вращающимися валками.

Изменяя в расплаве долю Si от 4,5 до 6,5%, а также совершенствуя кубическую текстуру, можно получать изотропную электротехническую сталь с высоким электросопротивлением и удельными потерями $P_{1,7/50}$ менее 1Вт/кг. Из микрокристаллической ленты путем холодной прокатки можно получить анизотропную сталь с толщиной 0,08 мм и потерями $P_{1,7/50} = 0,6$ Вт/кг.

Для эффективного использования свойств новых типов трансформаторных сталей и уменьшения их расхода совершенствуются конструктивные исполнения магнитных систем и таких компонентов активной части, как изоляция и обмотки.

Развитие конструкций магнитных систем (МС) идет в направлении совершенствования как их структуры, так и геометрических и электромагнитных параметров.

Основные структурные типы МС предложены еще на начальном этапе развития трансформаторостроения [26]. Это планарные (одноплоскостные) шихтованные или навитые магнитные системы и пространственные.

Для планарных МС, получивших преимущественное применение в распределительных трансформаторах, характерны стержневая и бронестержневая шихтованные и навитые конструктивные исполнения [21].

В трехфазных витых МС отсутствует магнитная связь между витыми элементами, что приводит к увеличению расхода стали. В [15] предложено применение яремных накладок, играющих роль смесителей

магнитного потока, что уменьшает массу и стоимость МС и обеспечивает их симметрирование.

Более многообразны пространственные магнитные системы (ПМС). По сравнению с планарными они позволяют: для комбинированной трехстержневой МС с витым ярмом – уменьшить потери в стали на 25%, массы на 12%, а при замене материала обмоток на фольгу, за счет уменьшения размеров окна – масса стали уменьшается еще на 8%, а обмоток – на 2-4%. Совершенствование шихтованных планарных и пространственных стыковых МС идет по пути улучшения качества стыков. В плоских шихтованных МС наиболее совершенной, но и трудоемкой, является схема шихтовки "STEP-LAP" (коэффициент увеличения потерь в таком магнитопроводе всего 1,15-1,2).

Для ПМС также предложен ряд конструкций стыков [9], в которых обеспечивается совпадение направления магнитного потока с направлением прокатки и достаточная механическая жесткость.

При заданном конструктивном исполнении планарных и ПМС уменьшение расхода электротехнической стали достигается также за счет оптимизации геометрии магнитной системы, обмоток, размеров главной и продольной изоляции.

Оптимизируются форма и соотношения размеров поперечного сечения стержней и ярем [17, 18, 24], (если они прямоугольной или эллиптической формы).

В последние годы предложен ряд ПМС с шестигранной формой сечения стержней, образующей параллельные стенки окна МС, а также уменьшающие массу ПМС [17, 23, 24] со ступенчатой формой поперечного сечения стержней и ярем, оптимизируются количество и размеры пакетов стали для обеспечения максимального заполнения активной сталью сечения стержня и унификации размеров пакетов. Для уменьшения размеров окна выполняется оптимизация размеров обмоток и провода главной и продольной изоляции по критерию максимального заполнения площади окна проводниковым материалом [11, 17, 18, 21].

И, наконец, следует отметить значение оптимизации рабочей магнитной индукции, уровень которой при прочих равных условиях обуславливает и массу и потери в МС.

Ведущими фирмами (General Electric, АBB и др.) в Японии и США освоен выпуск трансформаторов с МС из аморфных сплавов. Несмотря на более высокую (на 25-30%) стоимость таких трансформаторов, они рентабельны из-за существенного (до 70%) снижения потерь холостого хода.

Для преодоления технологических недостатков аморфных сталей, обусловленных их малой толщиной, чувствительностью к механическим воздействиям, хрупкостью, используются стали с различной индукцией насыщения, комбинации слоев аморфной стали и АЭС и другие технические решения [11, 21].

В современном трансформаторостроении большое значение придается совершенствованию технологии изготовления МС, средства и возможности которой заслуживают отдельного подробного анализа. Следует отметить, что за последние 20 лет улучшение технологии производства МС позволило снизить коэффициент увеличения потерь изготовленных МС (по сравнению с их уровнем в используемой стали) с 1,3 до 1,15.

Размеры МС и трансформатора в целом уменьшаются за счет увеличения коэффициента заполнения окна проводниковым материалом, что достигается уменьшением размеров главной и продольной изоляции и оптимизацией структуры и параметров обмоток [11, 18, 19, 21].

Размеры изоляции зависят от ее электроизоляционных свойств. Традиционная изоляция распределительных трансформаторов состоит из комбинации целлюлозной изоляции и минерального масла, обладает удовлетворительными электрическими и тепловыми характеристиками, но ее электрические и механические свойства сильно зависят от влагосодержания, скорость старения быстро растет при превышении нормированной температуры, а нормированный срок службы не превышает 25 лет. Поэтому общей тенденцией является разработка и применение изоляционных материалов, не имеющих указанных недостатков. Большое распространение получила полиамидная бумага (Номекс), имеющая рабочую температуру 160 °С, высокую маслостойкость при температурах масла до 120 °С и диэлектрическую постоянную – 4,6.

Считается целесообразным применение изоляционных эмалей на основе полистерамидимида и пире-МЛ полиамида (класс нагревостойкости 200-220°С) в комбинации с арамидными бумагой и картоном. Особенно эффективно применение этой изоляции при модернизации и ремонте трансформаторов, т.к. при стоимости арамидной изоляции примерно в 20 раз большей, чем целлюлозной, стоимость ремонта с комбинированной изоляцией увеличивается всего на 20-30%. Если используется только высокотемпературная изоляция, то увеличивается мощность модернизированного трансформатора и нагрузочная способность при перегрузках.

Маслонаполненные трансформаторы пожаро- и экологически опасны, масло подвержено старению и не способствует снижению уровня шума, но такие трансформаторы значительно дешевле и рентабельнее там, где не ужесточены требования экологичности.

Повышение требований экологичности, пожаро- и взрывобезопасности распределительных трансформаторов привело к разработке ряда типов пожаробезопасных жидких диэлектриков [11, 21]: кремнийорганических жидкостей, синтетических эфиров, высокотемпературных углеводородных масел и других жидкостей, которыми заменяют минеральное масло. Широко применяются кремнийорганическая жидкость полидиметилсилоксан, которая устойчива к старению, практически не ядовита, хорошо разлагается в воде, воздухе, почве и не создает вредных для здоровья соединений.

Дальнейшее развитие получают элегазовые трансформаторы [1, 21]. В распределительных трансформаторах до 2500 кВА используется естественная циркуляция газа в баке. Причем фирма General Electric разработала компактные элегазовые трансформаторы, в которых элегаз находится под давлением, обмотки выполнены из фольги с пленочной полимерной изоляцией. Применение испарительного охлаждения в таких трансформаторах позволило снизить расход активных материалов и габариты, а также повысить пожаробезопасность, экологическую чистоту, понизить уровень шума и эксплуатационных затрат.

Особо жестким требованиям пожаро-, взрывобезопасности и экологичности удовлетворяют сухие трансформаторы. Эти трансформаторы выпускаются в обычном исполнении, с обмотками, залитыми смолой (литые) и с кабельными обмотками.

Преимуществами литых трансформаторов являются: экологическая чистота, безопасность эксплуатации, малые габариты, простота монтажа, устойчивость к воздействию влаги и сырости, минимальные эксплуатационные затраты, повышенная надежность.

Крупнейшими зарубежными производителями литых трансформаторов являются фирмы BEZ (Словакия), TRINAL (Франция) и PAUWELS (Бельгия).

В России (г. Подольск, "Трансформер") начато производство литых трансформаторов типа ТСЛ-10/0,4 кВ с мощностью 400-2500 кВА [13]. Их МС изготавливаются из листовой АЭС, покрываются защитным слоем краски и слоем специального клея для снижения уровня шума.

Обмотки низкого напряжения изготавливаются из алюминиевой или медной ленточной фольги, наматываемой совместно с тканью из стекловолокна, пропитанной специальной смолой. В процессе термической обработки в печи смола полимеризуется, что увеличивает жесткость конструкции обмоток и их электродинамическую стойкость. Класс нагревостойкости обмоток F, число охлаждающих каналов зависит от мощности трансформатора. Витки ленточной фольги защищены с торцов лентой из полиэстера, а сами торцы и внешняя часть обмотки защищены слоем эпоксидной смолы. Обмотки высокого напряжения секционные. Секции изготавливаются из изолированного провода или ленточной фольги. Внутренняя и внешняя поверхности обмоток покрываются сеткой из стекловолокна, которая служит арматурой для эпоксидной смолы с наполнителем. После сушки обмотки заполняются смолой в вакууме.

При естественном охлаждении длительная перегрузка литого трансформатора не должна превышать 10-15% от его номинальной мощности, а стоимость примерно на 40% выше стоимости обычного масляного.

Существенный интерес представляют новые распределительные трансформаторы с литой изоляцией (SDT), созданные фирмой CITEQ (Канада) [14] для размещения под землей (в грунте), либо в компактных трансформаторных шкафах из стекловолокна. Основными элементами конструкций таких трансформаторов являются твердая изоляция обмоток и внешний кожух из композитного материала. Основу твердой изоляции составляет изоляционная пленка и специальная эпоксидная смола. Обмотки и МС трансформатора полностью покрыты эпоксидной смолой. Внешний кожух SDT изготовлен из стекловолокна и эпоксидной смолы, что делает его водонепроницаемым, стойким к коррозии и не требующим ухода. Кроме того, кожух увеличивает прочность конструкции трансформатора в целом. Проходные изоляторы в первичной цепи отливаются одновременно с корпусом, что сокращает число дополнительных элементов. Возможность оснащения гибкими кабелями вторичной цепи позволяет отказаться от отдельных проходных изоляторов.

Основными преимуществами SDT (сейчас их выпускают на мощности от 25 до 167 кВА, напряжение первичной обмотки 14,4 кВ, вторичной – 240/120) является отсутствие негативного воздействия на окружающую среду, устойчивость к неблагоприятному воздействию погодных условий, отсутствие риска при взрывах и неполадках, практичное и удобное расположение в грунте или в компактных трансформаторных шкафах, не требует установки специальных трансформаторных будок. Благодаря этим преимуществам SDT имеют широкую сферу применения, особенно в жилых и прибрежных районах.

Одним из новых перспективных видов сухих трансформаторов являются кабельные трансформаторы типа Dryformer [2, 21], разработанные компанией АBB.

Обмотки кабельных трансформаторов изготавливаются из высоковольтного кабеля с изоляцией из

поперечно-сшивного полиэтилена (XLPE) с рабочей напряженностью до 15 кВ/мм. Токопроводящие жилы такого кабеля окружены общим полупроводниковым цилиндрическим экраном, который снижает напряженность электрического поля в жилах и выравнивает ее на поверхности экрана. Далее размещается изоляция из поперечно-сшивного полиэтилена, у которого наружный слой также выполнен полупроводящим, а система охлаждения – воздушная.

Применение круглого проводника вместо прямоугольного снижает неравномерность электрического поля в изоляции. Изготовление обмоток существенно проще обычного, не нужны вводы высокого напряжения, т.к. кабель протягивается к распределительству на любую длину. Толщина изоляции уменьшается от обмотки высокого напряжения до нейтрали, поэтому для соединения кабеля разного диаметра используются стандартные муфты. Первые трансформаторы типа Dryformer выполнены на мощности от 10 до 20 МВА, но они очень удобны для применения, и как распределительные на обычных подстанциях, мобильных подстанциях и подстанциях у потребителей.

Наибольшее снижение потерь достигается в трансформаторах с обмотками из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [7, 8, 21, 30-35], сверхпроводящее состояние которых существует при температуре ниже критической (для большинства из них – ниже 110°K). Рабочую температуру таких обмоток удобно принимать равной температуре кипящего жидкого азота (77°K). Обычно ВТСП представляет собой ленту из материала Bi 2223.

Поскольку в рабочем режиме потери в ВТСП пренебрежимо малы, то реальные потери в обмотке считаются равными электрической мощности, потребляемой холодильной установкой, КПД которой около 4%.

Номинальный ток обмотки из ВТСП должен быть ниже критического и соответствовать области сверхпроводимости. Если ток значительно превышает критическое значение, то сопротивление ВТСП резко возрастает на порядок, а энергия, выделяемая ВТСП в этом переходном режиме, поглощается испарением части охлаждающего жидкого газа (азота). Максимально допустимое значение тока определяется перегрузочной способностью охлаждающего устройства.

Эти свойства ВТСП позволяют значительно повысить КПД трансформатора, при уменьшенных массах и габаритах, исключить трансформаторное масло как охлаждающий агент, ограничивать большие токи.

Обширные теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в Англии, США, Германии, России, Франции, Японии, Австралии, Швеции, позволили создать опытные образцы силовых трансформаторов с ВТСП для проверки эффективности принятых технических решений и возможности их параллельной работы с обычными трансформаторами. Результаты этих исследований оказались достаточно успешными и показали, что потери в трансформаторах с обмотками из ВТСП при номинальных нагрузках могут быть уменьшены на 80-90%, а общая масса примерно в два раза. У них также отсутствует термическое старение изоляции. Способность трансформаторов с ВТСП ограничивать токи короткого замыкания позволяет уменьшить напряжение короткого замыкания на 50% и, тем самым, стабилизировать напряжение трансформаторов без его регулирования. Технология применения явления тепловой

сверхпроводимости развивается достаточно высокими темпами.

Расчетные исследования с учетом современных экономических показателей подтвердили экономическую целесообразность создания трансформаторов с использованием высокотемпературной сверхпроводимости на мощности более нескольких десятков МВА.

Однако компактные размеры таких трансформаторов, замена охлаждающего масла жидким азотом, позволяют расширить диапазон их применения на распределительные трансформаторы для установки в городских условиях и помещениях.

Факторами, пока еще сдерживающими широкое применение трансформаторов со сверхпроводимостью, являются высокая цена ВТСП провода и необходимость использования сравнительно дорогих холодильных установок.

Следует отметить тенденции подхода к технико-экономическому обоснованию новых технических решений.

Увеличение стоимости нефти с 70-х годов, примерно на порядок, привело к увеличению стоимости и других видов топлива и энергии, что повысило и стоимость потерь в трансформаторах. Поэтому за последние 30 лет трансформаторостроители снизили уровень потерь в среднем на 50% [21, 29].

При сравнении вариантов одного и того же трансформатора как основной показатель выступают потери. При проектной оптимизации основным критерием обычно служит полная капитализированная стоимость – это сумма стоимости установки трансформатора (включая его цену) и капитализированная стоимость потерь [12, 21, 22] (сумма, достаточная для оплаты стоимости потерь в каждом году срока службы трансформатора, которая может быть покрыта годовым доходом от суммы в банке, положенной под сложный процент, при установке трансформатора).

Однако при обосновании применения распределительных трансформаторов новых конструктивных исполнений (и более дорогих) в современных проектах [14], учитывается и ряд системных факторов – экономия затрат на прокладку инженерных сетей, повышение надежности, взрывобезопасности, экологичности, возможность более плотной застройки жилых кварталов и т.д.

Важнейшей тенденцией, обусловившей достижение мировым трансформаторостроением высокого современного уровня, является интенсивное развитие научных исследований, создание эффективного нормативного и расчетно-методического базиса, информационного, методического, математического и программного обеспечения для автоматизации научных исследований, проектных разработок, оптимизации технических решений и технологических процессов производства трансформаторов.

Значительный вклад в эти достижения внесен трансформаторостроителями и учеными научно-исследовательских организаций Украины (институт электродинамики НАН Украины, ОАО "ВИТ", ОАО НИЦ "ЗТЗ-Сервис", ZTR и других) [3, 4, 10, 12, 15, 17, 18, 27, 28, 29].

ВЫВОДЫ

Рассмотренные тенденции развития мирового и отечественного трансформаторостроения обусловили создание мощного научного базиса, новых электротехнических материалов, технических решений, технологических процессов, которые должны быть использованы для модернизации и совершенствования парка рас-

пределительных трансформаторов Украины, обладающей мощным научно-техническим потенциалом и трансформаторостроительной промышленностью.

Одним из ключевых направлений решения этой проблемы является опережающее развитие на основе имеющегося мирового научно-технического задела информационного, математического, методического и программного обеспечения автоматизации научных исследований, синтеза, анализа и оптимизации структуры и параметров отечественных трансформаторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алексеев Б.А. Трансформаторы с элегазовой изоляцией. Вестник электропромышленности, 1993, №4, С. 56-61
- [2] Алексеев Б.А. Трансформаторы типа Dryformer с кабельной обмоткой – новая разработка компании АВВ. // <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000004.article>, 2006 г.
- [3] Артемченко А.В., Вороненко В.И., Дорогокупля В.А. и др. Обзор программного обеспечения ОАО "ВИТ", разработанного за последние 5 лет. // Тезисы докладов XI междунар. научн-техн. конференции "Трансформаторостроение – 2005", Запорожье, 2005, С. 17-19.
- [4] Богданова Е.В., Иванов В.Ф., Шафир Ю.Н. Программно-методическое обеспечение расчетов трансформаторов. // Тезисы докладов XI между. научн.-техн. конференции "Трансформаторостроение – 2005", Запорожье, 2005, С. 76-77.
- [5] Буханова И.Ф., Дивинский В.В., Журавель В.М. Лазерная обработка пластин магнитопроводов силовых трансформаторов. – Электротехника, 2004, №4 – С. 34-42.
- [6] Веселовский О.Н., Шнейберг Я.А. Столетие трансформатора! – Электротехника, 1984, №11 – С. 62-63.
- [7] Джафаров Э.А. Сверхпроводящий трансформатор с локализованным магнитным полем. – Электрические станции. 2005, №8. – С. 67-71.
- [8] Елагин П.А. Высокотемпературные сверхпроводящие трансформаторы. Новое поколение подстанционного оборудования. – Новости электротехники. 2005, №1. – С. 20-21.
- [9] Ерин В.Л. Трехфазные трансформаторы с пространственными магнитопроводами из С-образных стрижней со сниженными массой и током холостого хода и их автоматизация проектирования. // Автореферат диссертации к.т.н. – Харьков: ХПИ, 1990. – 24 с.
- [10] Інноваційні пріоритети паливно-енергетичного комплексу України. – Київ: Українські енциклопедичні знання. 2005. – 512 с.
- [11] Кустов С.С. Основные направления развития конструкций трансформаторов I-II габаритов. – Электрические станции. 1995, №8. – С. 62-67.
- [12] Мелешко И.Ю. Оптимизация трансформаторного оборудования по экономическим нормативам. – Техническая электродинамика. 1992. №2. – С. 57-64.
- [13] Компактные трансформаторные подстанции "Трансформер" нового поколения. // Рынок электротехники – 2007, №2(6), с. 91.
- [14] Новые трансформаторы – в землю. // Рынок электротехники, 2007, №2(6) – С. 92-93.
- [15] Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В., Петренко О.И. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами. – Электротехника та електромеханіка. 2002. – С. 86-97.
- [16] Печенкин В.И. В России начнется производство отечественных сухих трансформаторов с литой изоляцией. – Энергослужба предприятия №2(14). – 2005.
- [17] Плахтырь О.О. Варианты конструкций и классификация пространственных магнитопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов. – Электротехніка та електромеханіка. – 2002. №3. – С. 64-65.
- [18] Пуйло Г.В. Оптимальные соотношения элементов активной части электромагнитных преобразователей. – // Электромашиностроение и электрооборудование. 1998. Вып. 58. – С. 25-29.
- [19] Пуйло Г.В., Трищенко О.В., Кокуца Н.М. Показатели конструктивной эффективности силовых трансформаторов. // Электромашиностроение и электрооборудование. 2004., Вып. 63. – С. 94-98.
- [20] Пуйло Г.В., Трищенко Е.В. Обобщенная математическая модель для синтеза и анализа силовых трансформаторов со слоевыми обмотками. – Электротехніка і електромеханіка. 2005, в.2. – С. 42-45.
- [21] Силовые трансформаторы. Справочная книга. // Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат. 2004. – 616 с.
- [22] Стабровский Л.Н., Шумра П.Л., Кочетков А.А., Леус Ю.В. Новые серии распределительных трансформаторов. // Тезисы докладов XI междунар. научн-техн. конференции "Трансформаторостроение – 2005". Запорожье, 2005.
- [23] Ставинський А.А., Пуйло Г.В., Плахтир О.О., Трищенко О.В., Ставинський Р.А. Просторова магнітна система. Деклараційний патент на винахід. Україна. 19(UA), (11) 70864A, 51 (7) H01F27/24, Бюл. №10, 2004.
- [24] Ставинский А.А., Плахтырь О.О. Сравнительный анализ материалоемкости вариантов пространственных электромагнитных систем. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. 2003. – №2(19), том 1. – С. 53-56.
- [25] Стародубцев Ю.М., Цырлин М.Б. Основные направления совершенствования электротехнических статей. // <http://www.transform.ru/articles/html/04production/a000008.article>, 2003.
- [26] Сучков Р.В. Модернизация и сервис трансформаторов. Сервисное обслуживание АББ. // <http://www.abb.ru/cawp/ruabb055/9ab45690df07bf19c1256e4c0032f02f.aspx>, 2004.
- [27] Туткевич А.С. Ремонт и модернизация мощных высоковольтных трансформаторов на энергообъектах. // Тезисы докладов XI междунар. научн-техн. конференции "Трансформаторостроение – 2005". Запорожье, 2005.
- [28] Чернов И.Л. Трансформаторы и трансформаторные подстанции во взрывозащищенном исполнении. Тенденции развития в Украине и за рубежом. // Тезисы докладов XI междунар. научн-техн. конференции "Трансформаторостроение – 2005". Запорожье, 2005.
- [29] Шидловський А.К., Федоренко Г.М. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України 1990-2000 р. // Технічна електродинаміка, ч.5. 2002. – С. 3-12.
- [30] Darmann F. Design and loss calculations of a 100-kVA transformer employing multi-filamentary Bi-2223 Ag sheathed superconducting tapes. – Cryogenics, Volume 41, Number 9, September 2001, pp. 611-621(11).
- [31] Nagasawa, Toru; Yamaguchi, Mitsugi; Fukui, Satoshi; Yamamoto, Mitsuyoshi. Design requirements of a high temperature superconducting transformer. // Physica, c.372-376 (2002), 1715-1718.
- [32] Schwenterly, S.W.; Mehta, S.P.; Walker, M.S.; Jones, R.H. Development of HTS power transformers for the 21st century: Waukesha Electric Systems/IGC-SuperPower/RG&E/ORNL SPI collaboration. – Physica C, 382 (2002), p. 1-6.
- [33] Sissimatos, E.; Harms, G.; Oswald, B.R. Design rules for high-temperature superconducting power transformers. – Physica C, Volume 354, Issue 1-4, p. 23-26.
- [34] Sykulski, J.K., Stoll, R.L., Beduz, C., Power, A.J., Goddard, K.F. and Al-Mosawi, M.K. (2000) The design, construction and operation of high temperature superconducting transformers – practical considerations. In, *Proceedings of the 38th Session of the International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE)*. Paris, France, CIGRE.
- [35] Tanzo Nitta. Некоторые аспекты проектирования сверхпроводящих трансформаторов. <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000006.article>, 2004.

Поступила 30.08.2007