

С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университетінің 60 жылдығына арналған «Сейфуллин оқулары– 13: дәстүрлерді сақтай отырып, болашақты құру» атты Республикалық ғылыми-теориялық конференциясының материалдары = Материалы Республиканской научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения – 13: сохраняя традиции, создавая будущее», посвященная 60-летию Казахского агротехнического университета имени С.Сейфуллина. - 2017. - Т.1, Ч.5. - С.82-86

## **ТРАНСФОРМАТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

*Герасименко Т.С., Ильин А.*

Трансформаторная отрасль считается одной из консервативных. Однако и там периодически происходят изменения эволюционного плана. Развитие энергетики ставит перед разработчиками новые и сложные задачи. В результате в скором времени трансформаторную отрасль ждут радикальные перемены.

Проанализировав основные тенденции рынка электрооборудования, можно сказать, что на данный момент при создании современных моделей трансформаторов основной упор делается на снижение затрат на их производство и эксплуатацию. Но главной задачей остается поиск новых конструкционных материалов, повышение эксплуатационной надежности и ремонтпригодности трансформаторного оборудования.

Итак, трансформатор – одно из важнейших электротехнических устройств, без которого невозможно осуществить распределение и передачу электрической энергии на большие расстояния.

Определяя место силового трансформатора в электрической сети, следует отметить, что по мере удаления от электростанции единичные мощности трансформаторов уменьшаются, а удельный расход материалов на их изготовление и потери, отнесенные к единице мощности, а также цена 1 кВт потерь возрастают. В этой связи наиболее болезненными точками энергосистем являются распределительные сети напряжением 35 и 10(6) кВ, в которых происходят основные потери энергии. Если с потерями холостого хода удаётся достаточно эффективно бороться путем усовершенствования существующих и поиска новых технических решений, то с потерями в режиме короткозамкнутых обмоток трансформатора дело обстоит гораздо сложнее, и вряд ли эту проблему удастся решить без использования сверхпроводящих материалов [1].

История сверхпроводниковых трансформаторов началась ещё в начале 60-х годов. Первоначально их обмотки изготавливали из проводов на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) I рода, имеющих сравнительно невысокую токонесущую способность, сильно снижающуюся с ростом магнитного поля. Поэтому мощность первых сверхпроводниковых трансформаторов оставалась невысокой, сводя на нет экономические преимущества от низких потерь. Заметное повышение токонесущей

способности стало возможным с появлением длинномерных НТСП II рода и использованием для изготовления обмоток многожильных проводов на их основе, что позволило проектировать и строить сравнительно более мощные трансформаторы. Однако высокая стоимость криогенного оборудования гелиевого уровня температур и энергозатраты на поддержание сверхпроводящего состояния делали эти проекты неконкурентоспособными [1].

С открытием (в конце 80-х годов) явления теплой сверхпроводимости технология применения ее для производства силового электрооборудования стала развиваться достойно высокими темпами и к применению высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в силовых трансформаторах.

Ведущие промышленно развитые страны (США, Германия, Франция, Япония, Австралия, Швеция, Англия) к настоящему времени произвели опытные образцы силовых трансформаторов. В большинстве случаев эти образцы использовались для проверки принятых при конструировании новых решений. Часть из них была установлена в опытную эксплуатацию в реальные сети с целью проверки их работоспособности параллельно с традиционными конструкциями [2].

Рассмотрим принцип устройства ВТСП - трансформатора (рис. 1).

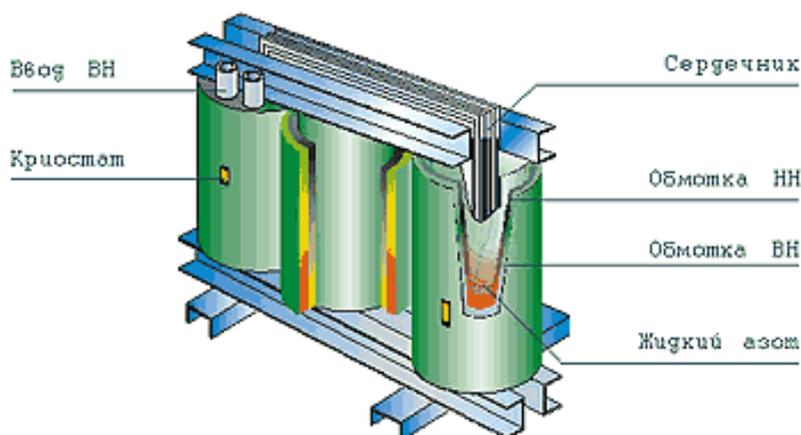


Рисунок 1 – Принцип действия ВТСП- трансформатора.

Обмотки погружены в жидкий азот, служащий одновременно и изоляцией, и охлаждающей средой. Сердечник трансформатора работает при температуре окружающей среды, т.к. его охлаждение приведет только к лишним нагрузкам криогенной системы, а не к улучшенным характеристикам. Обмотки термически изолированы от сердечника и окружающей среды с помощью двустенных контейнеров (так называемых криостатов), выполненных из эпоксиды, между стенками которых поддерживается вакуум, обеспечиваемый непрерывной работой насоса [3].

За последние годы были достигнуты большие успехи в разработке ВТСП проводов, электроизоляционных материалов азотного уровня температур, систем криостатирования и тепловой изоляции, производстве ВТСП обмоток. Совершенствуется технологический процесс изготовления прототипов ВТСП трансформаторов, ориентированный на их серийный или мелкосерийный выпуск для скорейшей интеграции в распределительные сети общего назначения [4]. На рисунке 2 представлен трёхфазный ВТСП трансформатор мощностью 5/10 МВА [5].



Рисунок 2 – Трёхфазный ВТСП трансформатор мощностью 5/10 МВА

Вместе с тем не имеют однозначного решения принципиально важные для изготовления трансформаторов вопросы. Наиболее острые из них – оптимальная конструкция магнитопровода и снижение динамических потерь в сверхпроводящих обмотках.

Что касается магнитопровода, не решен, например, вопрос, какое его исполнение наиболее выгодно: “тёплое” (снаружи криостата) или “холодное” (внутри криостата).

“Холодное” исполнение, с одной стороны, способствует упрощению конструкции криостата и уменьшению размеров магнитной системы, с другой стороны, вносит дополнительные теплопритоки, увеличивая энергозатраты на охлаждение. Снижения теплопритоков достигают использованием в качестве материала магнитопровода дорогостоящих аморфных сталей, имеющих очень низкие тепловыделения (0,2 Вт/кг при 1,4 Т и 100 К) [6], или обычной холоднокатаной электротехнической стали с улучшенными характеристиками. Очень интересны работы по совершенствованию сплава FeSi, в результате которых получена величина тепловыделений 0,35 Вт/кг при 1,7 Т, 50 Гц вместо прежних 0,8 Вт/кг [7].

“Тёплое” исполнение магнитопровода приводит к более сложной конструкции криостата, выполняемого в виде полого цилиндра, что

увеличивает размер магнитной системы, но вместе с тем уменьшает теплопритоки в холодную часть. При этом в качестве материала магнитопровода можно использовать сравнительно дешёвую тонколистовую рулонную электротехническую сталь (марок 3404, 3405, 3406), допускающую магнитную индукцию до 1,6-1,65 Т. Подобная конструкция более эффективна для однофазных трансформаторов. В трёхфазных трансформаторах аналогичного исполнения потребуются дополнительные токовводы для электрической связи обмоток.

Совершенствование технологии производства ВТСП трансформаторов и её доведение до промышленных масштабов позволит наладить их коммерческий выпуск и постепенную замену трансформаторов традиционного исполнения.

### Преимущества ВТСП-трансформаторов.

ВТСП-трансформаторы по сравнению с традиционными обладают значительными техническими преимуществами:

- Значительное снижение нагрузочных потерь при номинальном токе, что значительно увеличивает КПД трансформатора. На рисунке 3 представлена зависимость минимальных суммарных потерь от мощности обычных и ВТСП трансформаторов [2];

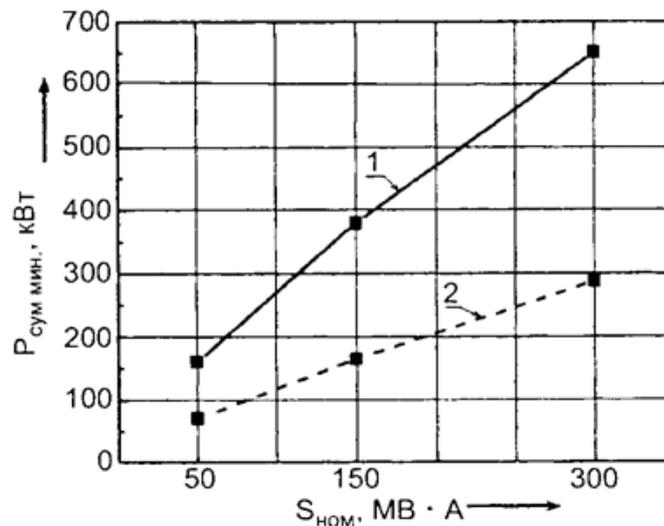


Рисунок 3 – Зависимость суммарных потерь ( $P_{\text{сум, мин}}$ ) от мощности трансформатор (1-маслянный трансформатор, 2 – ВТСП – трансформатор)

- Уменьшение веса и габаритов трансформатора до 40%. Следует отметить, что упомянутые достоинства позволяют применять ВТСП - трансформаторы в уже существующих подстанциях без их конструктивных изменений со значительным увеличением мощности. Облегчается также и транспортировка трансформаторов;

- свойства ограничения токов КЗ, что в аварийных режимах защищает электрооборудование сети;

- значительное уменьшение реактивного сопротивления, что позволяет обеспечить стабилизацию напряжения, не прибегая к его регулированию, что повысит качество напряжения;
- большая перегрузочная способность- выдерживают двукратные перегрузки в течение 48 часов и не приводят при этом к нагреву и старению изоляции;
- более экологичны, пожаро- и взрывобезопасны ввиду отсутствия в них масла;
- уменьшение уровня шума [8].

### **Заключение**

*Сверхпроводниковые технологии в настоящее время в мире вышли на тот уровень, на котором с их использованием возможно создание нового поколения электроэнергетического оборудования, существенно превосходящего оборудование традиционного исполнения.*

*За счет более высокой эффективности, уменьшения в два-три раза массогабаритных показателей и соответственно материалоемкости и энергозатрат на изготовление, повышения надежности и срока службы оно будет удовлетворять требованиям электроэнергетики XXI столетия. Уже сейчас отдельные виды сверхпроводникового оборудования могут значительно улучшить ситуацию в существующих энергосистемах и сетях, увеличив их устойчивость, надежность и пропускную способность.*

### **Список литературы**

1. В. Лобынцев. Сверхпроводниковые трансформаторы./ Сверхпроводники в электроэнергетике ТЗ, выпуск 4, 2006 г.
2. Трансформаторы с использованием высокотемпературной сверхпроводимости. <http://forca.com.ua/transformatori/praktika/transformatory-s-ispolzovaniem-vysokotemperaturnoi-sverhprovodimosti.html>
3. П. Елагин. Высокотемпературные сверхпроводниковые трансформаторы – новое поколение подстанционного оборудования. Журнал «Новости Электротехники» №1(31) 2005 г.
4. Conceptual desing of a 5 MVA single phase high temperature superconducting transformer./ Choi, Jeehoon; Lee, Seungwook; Choi, Sukjin;/ IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPER CONDUCTIVITY Том:18 Выпуск:2 стр 636-639, JUN 2008
5. Superconductivity for Electric Systems, Pro-gram Plan FY 2005-2009
6. JMMM, 1992, 112, 174
7. JMMM, 2000, 215-216,69
8. Козулин А., Виноградов А., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Высокотемпературные сверхпроводниковые трансформаторы - новое поколение подстанционного оборудования. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, № 12, 2008. – с. 7-9.