

УДК 621.314.211

**ПУТИ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ПОВЫШЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ****Чернов Игорь Яковлевич,**

ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» (ГБУ «НИИВЭ»), кандидат технических наук, заведующий отделом, г. Донецк, ДНР, niive@list.ru

Золотарев Евгений Владимирович,

ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» (ГБУ «НИИВЭ»), кандидат технических наук, заведующий лабораторией, г. Донецк, ДНР, niive@list.ru

Аннотация

Приведен анализ технических решений совершенствования взрывозащищенных трансформаторов повышенной мощности. Обоснована необходимость комплексного и взаимного учёта таких противоречивых требований как, повышение мощности, ограничение габаритных размеров, повышение эффективности охлаждения. Предложены приоритетные пути развития взрывозащищенных трансформаторов.

Ключевые слова: взрывозащищенный трансформатор, повышение мощности, магнитная система, эффективность охлаждения, электромагнитные потери.

**WAYS OF DEVELOPMENT OF EXPLOSION-PROOF TRANSFORMERS OF
INCREASED POWER****Chernov Igor Yakovlevich,**Candidate of Technical Sciences, Head of Department, State Budgetary Institution "NIIVE",
Russia, Donetsk, niive@list.ru**Zolotarev Evgeny Vladimirovich,**Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, State Budgetary Institution "NIIVE", Russia,
Donetsk, niive@list.ru**ABSTRACT**

An analysis of technical solutions for improving explosion-proof transformers of increased power is given. The need for comprehensive and mutual consideration of such contradictory requirements as increasing power, limiting overall dimensions, and increasing cooling efficiency is substantiated. Priority ways of development of explosion-proof transformers are proposed

Keywords: explosion-proof transformer, power boost, magnet system, cooling efficiency, electromagnetic losses.

Введение. Повышение единичной мощности взрывобезопасных передвижных трансформаторных подстанций находится в тесной взаимоувязанной системе «угледобыча – энерговооруженность угледобывающей техники – мощность КТП» [1].

Технико-экономический анализ, изучение зарубежного опыта [2,3] и оценка вопросов безопасности взрывозащищенного электрооборудования показали востребованность на современном этапе трансформаторов мощностью 1000 – 2500 кВ·А и принятия в качестве участкового электроснабжения напряжение 3,3 кВ.

Прогресс совершенствования конструкций как распределительных трансформаторов, так и трансформаторов для взрывозащищенных передвижных трансформаторных подстанций (КТП) в значительной мере определяется созданием новых и совершенствованием используемых магнитных, проводниковых и изоляционных материалов, обеспечивающих снижение потерь электроэнергии экономически оправданными средствами [4, 5, 6].

Для выполнения требований обеспечения высокого технического уровня трансформаторов, а также минимальных затрат на их эксплуатацию и производство - представляется целесообразным вести путем совершенствования их конструкции и технологии изготовления, разработки и совершенствования методов расчета и проектирования, позволяющих выбрать наиболее приемлемый вариант, с учетом повышения единичной мощности и коэффициента машинного времени очистных комплексов K_m до 0,81) [7, 8].

Сложность создания трансформаторов повышенных мощностей для взрывозащищенных КТП заключается в необходимости разрешения таких технических противоречий как повышение мощности и обеспечение требуемой эффективности охлаждения при сохранении габаритных размеров корпуса трансформатора, устойчивый пуск мощных силовых двигателей при обеспечении необходимой электродинамической прочности обмоток и др.

Повышение технического уровня трансформаторов, как было упомянуто выше, в значительной мере зависит от степени развития промышленности, выпускающей магнитные, проводниковые и изоляционные материалы с новыми потребительскими свойствами.

Промышленно развитые страны активно проводят работы по снижению электромагнитных потерь в трансформаторах, разрабатывая новые магнитные и проводниковые материалы, инновационные конструкции и технологии их изготовления.

По разным оценкам экспертов от потерь в магнитных системах (МС) трансформаторов теряется до 4% производимой в стране электроэнергии [9], поэтому вопрос снижения активных потерь стоит очень остро.

На величину потерь холостого хода в первую очередь влияет тип МС и свойства электротехнической стали (ЭТС), из которой она изготовлена. Основные типы МС силовых трехфазных трансформаторов: шихтованные, витые и порошковые, наиболее массовыми из которых являются шихтованные.

¹⁾ $K_m = t_p / t_{см}$ - здесь отношение времени работы очистного технологического комплекса в течение смены к продолжительности смены

Широкое применение получили конструкции МС с косыми стыками и ступенчатым перекрытием листов (способ шихтовки MULTI STEP-LAB CORE и подобные) [10], при которых обеспечивается увеличение магнитной индукции, а также снижение полных потерь.

К перспективным вариантам шихтовок можно отнести совместное использование в зонах перехода магнитного потока из стержней в ярма МС - анизотропной и изотропной ЭТС («Sandwich») [11], что улучшает технико-экономические характеристики трансформаторов.

Важную роль в снижении активных потерь играет техническое оснащение производств и строгое соблюдение технологических требований при резке ЭТС, шихтовке и сборке МС.

Представляют интерес аморфные трансформаторы [12, 13], МС которых изготавливается из ленты получаемой методом сверхбыстрого охлаждения струи готового аморфного (нанокристаллического) расплава. Преимуществом такой МС является снижение потерь холостого хода на 60-80% по сравнению с МС, изготовленной из анизотропной ЭТС. Основным недостатком МС из аморфного материала является его низкая механическая прочность, не позволяющая ему выполнять функцию несущей конструкции.

Быстрыми темпами, в основном при изготовлении трансформаторов I и II габаритов, внедряется условно витая конструкция МС с низкими активными потерями, выполняемая по технологии «Unicore» [12].

Применение порошковых МС [10, 14] присуще трансформаторам малой мощности и ограничено высокой стоимостью и низкой магнитной индукцией – до 1 Тл, поэтому как перспективное направление при использовании в конструкциях взрывозащищенных трансформаторов не рассматривается.

Снижение нагрузочных потерь осуществляется перераспределением электромагнитных нагрузок (с учетом реального графика нагрузки трансформатора), применением новых проводниковых материалов в т.ч. транспонированных проводов.

Одним из скрытых резервов снижения нагрузочных потерь является определение и поиск путей локализации полей рассеяния магнитных потоков, вызывающих высокие местные перегревы в узлах трансформатора [5].

Известны конструкции обмоток с высокотемпературными сверх-проводниками (ВТСП), снижающими нагрузочные потери до 80-90% [14, 15]. Обмотки располагаются в криостатах с жидким азотом. Плотность тока в обмотках может достигать до 100 А/мм². Сложность конструкции и обслуживания ограничивают применение трансформаторов с ВТСП.

Снижение потерь короткого замыкания по сравнению с традиционной конструкцией обеспечивает кабельный трансформатор (Dryformer) [16]. Токопроводящая многопроволочная жила кабеля, поверх которой наложен тонкий слой полупроводящего слоя, позволяет устранить неравномерность электрического поля. Одним из недостатков полиэтиленового кабеля является снижение его механической прочности при повышении температуры.

Помимо, широко распространённых сухих и масляных трансформаторов, в промышленности находят применение трансформаторы, оболочка которых заполнена: элегазом (SF₆), жидким диэлектриком (кремнийорганической жидкостью), а также хладагентами других типов [5, 14]. Недостаточная надежность, необходимость систематического выполнения обязательных технических эксплуатационных мероприятий ограничивают применение упомянутых трансформаторов.

С увеличением единичной мощности трансформатора, его масса возрастает пропорционально кубу линейных размеров, а внешняя охлаждающая поверхность растёт

пропорционально квадрату линейных размеров, поэтому рост охлаждающей поверхности активной части отстаёт от роста потерь мощности [4], что требует применения оригинальных технических решений, повышающих эффективность охлаждения. Расположение активной части трансформатора во взрывонепроницаемой герметичной оболочке еще больше ухудшает условия охлаждения.

Во взрывозащищенном трансформаторе мощностью 1600 кВ·А при номинальной нагрузке выделяется порядка 15 кВт тепловых потерь. Эффективным решением, в отводе тепла в окружающую среду, является применение герметичной оболочки с высокой теплоотдающей способностью, которая за счет наличия гофрированных поверхностей, вертикальных труб, рациональной организации движения охлаждающих воздушных потоков внутри и снаружи герметичной оболочки, имеет развитую поверхность охлаждения.

При создании трансформаторов повышенных мощностей учитываются и другие технические аспекты, присущие шахтному электрооборудованию, опосредованно влияющие на их конструкцию и характеристики:

- наличие коммутационных перенапряжений;
- стесненные условия горных выработок;
- необходимость частой передвижки и др.

Принимая во внимание степень отработанности инновационных конструкций и технологий их изготовления, приведенных выше, с учетом обеспечения требований надежности и безопасности при эксплуатации, на Рисунке представлены пути повышения технического уровня взрывозащищенных трансформаторов экономически оправданными средствами.



Рисунок. Пути повышения технического уровня взрывозащищенных трансформаторов

Выводы.

1. Взрывозащищенный трансформатор повышенной мощности, как один из наиболее консервативных видов шахтного электрооборудования, должен состоять из наиболее надежных и технологичных компонентов: магнитной системы, обмоток и корпуса. Как показывает зарубежный и отечественный опыт, это, как правило, двухобмоточный трансформатор с планарной магнитной системой стержневого типа со стержнями, имеющими сечение в форме симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в

окружность, с концентрическим расположением слоевых и катушечных обмоток, установленный в сварном гофрированном корпусе с высокой теплоотдающей способностью.

2. Наряду с общими требованиями по обеспечению высокой энергоэффективности трансформатора, требования, обеспечивающие необходимые взрывозащитные свойства и высокую надежность при эксплуатации во взрывоопасных условиях горных выработок, являются определяющими.

Список литературы:

1. «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», утверждена распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 г. №1523-р.
2. Белошистов А.И., Чернов И.Я., Серов А.Л. Нормативное обеспечение безопасности применения взрывозащищенного электрооборудования на 3,3 кВ. // Материалы XXIV Международной научно-технической конференции «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых». Сб. науч. тр. ФГБОУ ВО «ДонНТУ». – Донецк, 2024.-С.207-208.
3. Mining-flameproof-dry-type-transformer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ceegtransformer.com/archives/ceeg-kbsg2-t-mining-flameproof-dry-type-transformer>. – (дата обращения: 06.12.2024).
4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. /П.М. Тихомиров.-М.: Энергоатомиздат, 1986.-528 с.
5. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Проблемы современного трансформаторостроения в России. Электричество, 2000, №8, 9.
6. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. Лизунова С.Д., Лоханина А.К. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
7. Вареник Е.А., Налбатов В.Е, Чернов И.Я., Шилов В.В. Соотношение технических характеристик взрывозащищенных трансформаторов. // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 2009.-С.63-67.
8. Чернов И.Я. Повышение технического уровня взрывобезопасных передвижных комплектных трансформаторных подстанций: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / И.Я. Чернов.; ДонНТУ. – Донецк, 2009. – 263 с.
9. Канарейкин А. «Умные» трансформаторы для «умной» энергетики // Энергетика и промышленность России. 2012. №8 (196).
10. Levin M.I., Пентегов И.В., Рымар С.В., Lavreniuk A.V. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов // Електротехніка і електромеханіка. 2014, №1. С. 40-44.
11. 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 // Електротехніка і електромеханіка. 2015, №6. С. 31-35.
12. Савинцев Ю.М. Энергоэффективные силовые трансформаторы: тенденции развития конструкции и характеристик энергосбережения // Новое в российской электроэнергетике. 2012. №10. С. 40-45.

13. Пуйло Г.В., Кузьменко И.С., Тонгалюк В.В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов // Электротехника і електромеханіка. 2008, №2.
14. Костинский С.С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкций силовых трансформаторов // Проблемы энергетики, 2018, том.20, №1-2.
15. Новиков М.С. Разработка, изготовление и исследование высоковольтных токонесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения: дис. канд. техн. наук: 01.04.13. М., 2015. 186 с.
16. Савинцев Ю.М. Сухие силовые трансформаторы: жесткая альтернатива // Главный энергетик. 2013. №6. С. 20-26.

References:

1. "Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035". Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020 N 1523-p.
2. Beloshistov A.I., Chernov I.Y., Serov A.L. Normative safety support for the use of 3.3 kV explosion-proof electrical equipment. / / Materials of the XXIV International Scientific and Technical Conference "Automation of Technological Objects and Processes. Search of young people". Collection of Scientific Papers Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University". - Donetsk, 2024 - pp. 207-208.
3. Mining-flameproof-dry-type-transformer [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.ceegtransformer.com/archives/ceeg-kbsg2-t-mining-flameproof-dry-type-transformer>. - (date of access: 06.12.2024).
4. Tikhomirov P.M. Transformer design. / / P.M. Tikhomirov. - Moscow - Energoatomizdat, 1986. - 528 p.
5. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. Problems of modern transformer engineering in Russia. Elektrichestvo, 2000, N 8, 9.
6. Power transformers. Reference book. / / Ed. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. - Moscow - Energoatomizdat, 2004. - 616 p.
7. Varenik E.A., Nalbatov V. E., Chernov I.Y., Shilov V.V. Ratio of technical characteristics of explosion-proof transformers. / / Explosion-proof electrical equipment: Collection of Scientific Papers UkrNIIVE. - Donetsk, 2009. - pp. 63-67.
8. Chernov I.Y. Improving the technical level of explosion-proof mobile packaged transformer substations: dissertation of the candidate of technical sciences: 05.09.01 / / I.Y. Chernov; DonNTU. - Donetsk, 2009. - 263 p.
9. Kanareykin A. "Smart" transformers" for "smart" energetics. / / Energetika I promyshlennost Rossii. 2012. N 8 (198).
10. Levin M.I., Pentegov I.V., Rymar S.V., Lavreniuk A.V. Analysis of designs of charged magnetic cores of power three-phase transformers. / / "Electrical Engineering & Electromechanics". 2014. N 1. Pp. 40-44.
11. Pentegov I.V., Rymar S.V., Levin M.I., Lavreniuk A.V. Determination of magnetic inductions in magnetic cores of power transformers with the joint use of anisotropic and

- isotropic electrical steels. / / "Electrical Engineering & Electromechanics". 2015. N 6. Pp. 31–35.
12. Savitsev Y.M. Energy efficient power transformers: trends in the development of energy saving design and characteristics. / / *Novoe v rossiiskoi energetike*. 2012. N 10. Pp. 40–45.
 13. Puilo G.V., Kuzmenko I.S., Tongaliuk V.V. Current trends in the improvement of distribution transformers. / / "Electrical Engineering & Electromechanics". 2008. N 2.
 14. Kostinskiy S.S. The review of the condition of branch of transformer manufacture and tendencies of development of the design of power transformers. / / *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018; 20(1-2). Pp. 14–32.
 15. Novikov M.S. Development, manufacture and research of high-current current-carrying elements from VTSP tapes of the 2nd generation: dissertation of the candidate of technical sciences: 01.04.13. Moscow, 2015. 186 p.
 16. Savintsev Y.M. Dry-type power transformers: a tough alternative. / / *The Chief power-engineer*. 2013. N 6. Pp 20–26.