

УДК 621.314.211

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ 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, РФ, 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, РФ, niive@list.ru

Маренич Константин Николаевич,

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» («ДонНТУ»), доктор технических наук, профессор, г. Донецк, ДНР, РФ, marenich_58@mail.ru

Аннотация

Проведен анализ технических требований при создании взрывозащищенных трансформаторов повышенной мощности. Обоснована необходимость комплексного и взаимного учёта таких противоречивых требований как, повышение мощности, ограничение габаритных размеров, повышение эффективности охлаждения, обеспечение жесткости и прочности корпуса трансформатора.

Ключевые слова: взрывозащищенный трансформатор, повышение мощности, эффективность охлаждения, электромагнитный расчет, магнитная система

**FEATURES OF CREATING EXPLOSION-PROOF TRANSFORMERS OF
INCREASED CAPACITY****Chernov Igor Yakovlevich,**Candidate of Technical Science, Head of Department, State Budgetary Institution «NIIVE»,
Russia, Donetsk, niive@list.ru**Zolotarev Evgeny Vladimirovich,**Candidate of Technical Science, Head of Laboratory, State Budgetary Institution «NIIVE», Russia,
Donetsk, niive@list.ru**Marenich Konstantin Nikolaevich,**Doctor of Technical Sciences, Professor, Donetsk National Technical University, Russia, Donetsk,
marenich_58@mail.ru

ABSTRACT

An analysis of the technical requirements for the creation of explosion-proof transformers of increased capacity has been carried out. The necessity of comprehensive and mutual consideration of such contradictory requirements as increasing power, limiting overall dimensions, increasing cooling efficiency, and ensuring the rigidity and strength of the transformer housing is substantiated.

Keywords: explosion-proof transformer, power increase, cooling efficiency, electromagnetic calculation, magnetic system

Введение. Увеличение производительности угольных шахт и нагрузки на очистной забой способствовало созданию мощных энерговооруженных машин и механизмов, что, в свою очередь, потребовало создания нового поколения взрывозащищенного электрооборудования.

Технико-экономический анализ, изучение отечественного и зарубежного опыта разработки и эксплуатации силовых трансформаторов и участков, в т.ч., рудничных трансформаторных подстанций [1, 2, 3, 4] и оценка вопросов безопасности взрывозащищенного электрооборудования показали перспективность применения трансформаторов мощностью 1000 – 2500 кВ·А и перевода шахтных участков электрических сетей на номинальное линейное напряжение 3,3 кВ.

При общей схожести подходов к созданию конструкций активных частей распределительных трансформаторов и трансформаторов рудничного исполнения во взрывонепроницаемых оболочках [5], последние имеют ряд существенных отличий, обусловленных спецификой работы в условиях горных выработок.

Особенностью научно-технической задачи создания трансформаторов повышенных мощностей при их размещении в рудничных взрывонепроницаемых оболочках является взаимный учёт таких противоречивых требований как:

- повышение мощности при сохранении габаритных размеров взрывонепроницаемой металлической оболочки трансформатора;
- обеспечение необходимой эффективности охлаждения при сохранении жёсткости и прочности оболочки трансформатора;
- устойчивый пуск асинхронных двигателей электропотребителей соизмеримых мощностей при обеспечении высоких технических характеристик и необходимой электродинамической прочности обмоток трансформаторов.

Общеизвестно [1], что с увеличением единичной мощности трансформатора, его масса возрастает пропорционально кубу, а внешняя охлаждающая поверхность растёт пропорционально квадрату линейных размеров. Поэтому увеличение охлаждающей поверхности активной части отстаёт от увеличения потерь мощности, что требует применения оригинальных технических решений, повышающих эффективность охлаждения. Важным фактором в этом контексте является также то, что особенностью конструкции силовых трансформаторов рудничного взрывозащищённого исполнения является невозможность применения естественного и сложность использования принудительно циркулирующего хладагента [6, 7].

Цель исследования. Целью исследования является обоснование (на основе обобщения и систематизации экспериментальных данных) технических решений в области повышения эффективности охлаждения силовых трансформаторов при условии их размещения в металлических корпусах (оболочках) рудничного взрывозащищённого исполнения при невозможности применения естественного и сложность использования принудительно циркулирующего хладагента.

Результаты исследования. Выбор размеров магнитной системы трансформатора, как основы его конструкции, вместе с размерами обмоток определяет главные размеры активной части и является ответственным этапом разработки трансформатора. При проектировании

трансформатора в рудничном взрывозащищённом исполнении, как одного из наиболее консервативных видов силового рудничного электрооборудования, выбираются наиболее технологичные и надёжные конструкции магнитной системы и обмоток. Как показывает зарубежный и отечественный опыт, это, как правило, двухобмоточный трансформатор с плоской магнитной системой стержневого типа со стержнями, имеющими сечение в форме симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность, с концентрическим расположением слоевых или слоевых и катушечных обмоток.

Согласно классической теории электромагнитного расчёта трансформаторов, диаметр окружности, в который вписано ступенчатое сечение стержня, является одним из основных размеров трансформатора. Другими основными размерами являются осевой размер l и средний диаметр d блока обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений. Последние два размера связаны между собой соотношением:

$$\beta = \pi d / l, \quad (1)$$

Меньшим значениям β соответствуют трансформаторы относительно узкие и высокие, большим - широкие и низкие, причём меньшим значениям β соответствует меньшая масса стали и большая масса обмоток и наоборот [1].

Вместе с тем, изменение параметра β сказывается на таких технических параметрах трансформатора, как: потери и токе холостого хода, механическая прочность и нагревостойкость обмоток, габаритные размеры.

Для обеспечения устойчивого пуска асинхронных двигателей электропотребителей соизмеримых мощностей при выборе наиболее приемлемого варианта электромагнитного расчёта, при прочих равных условиях, отдаётся предпочтение вариантам расчёта с более низкими значениями U_k .

На рис. 1 представлен график распределения U_k в зависимости от β для расчетных вариантов активных частей трансформатора мощностью 1000 кВ·А на вторичное напряжение 3,45 кВ при постоянном сечении стержня.

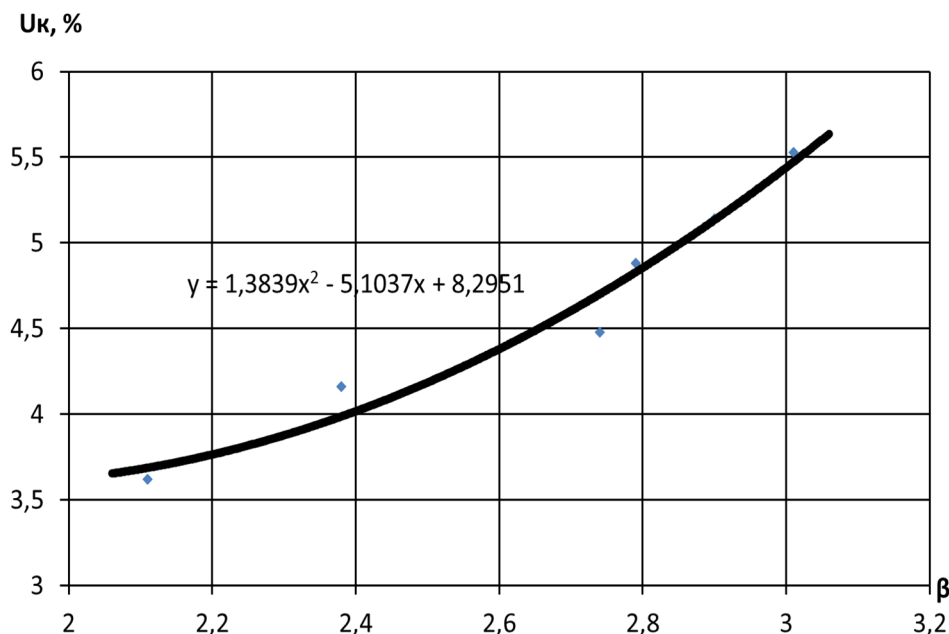


Рисунок 1. График распределения U_k в зависимости от β

При расчёте основных параметров трансформатора, расположенного в герметичной взрывонепроницаемой оболочке, помимо учёта подходов классической теории электромагнитного расчёта, как было упомянуто выше, учитываются особенности его работы в условиях размещения в закрытой металлической оболочке рудничного взрывозащищённого исполнения. Так, плотности тока наружной $\Delta_{вн}$ и внутренней $\Delta_{вн}$ обмоток принимаются ниже, чем рекомендуемые для распределительных трансформаторов общепромышленного исполнения [8].

На рис. 2 приведены зависимости электромагнитных нагрузок сухих трансформаторов шахтных подстанций мощностью от 100 до 1250 кВ·А и спрогнозированы их величины для мощностей 1600 и 2000 кВ·А.

При выборе величины магнитной индукции $B_{ст}$ также учитываются, имеющие место в шахтных сетях, перенапряжения технологического характера, например, в случае близкого расположения к силовому взрывозащищённому трансформатору поверхностной понизительной подстанции (источника электрогенерации). В этом случае, экспериментально установлено, что электромагнитная индукция взрывозащищённого трансформатора может превышать 1,6 Тл, в результате чего резко возрастают его ток и потери холостого хода, а также звуковая мощность.

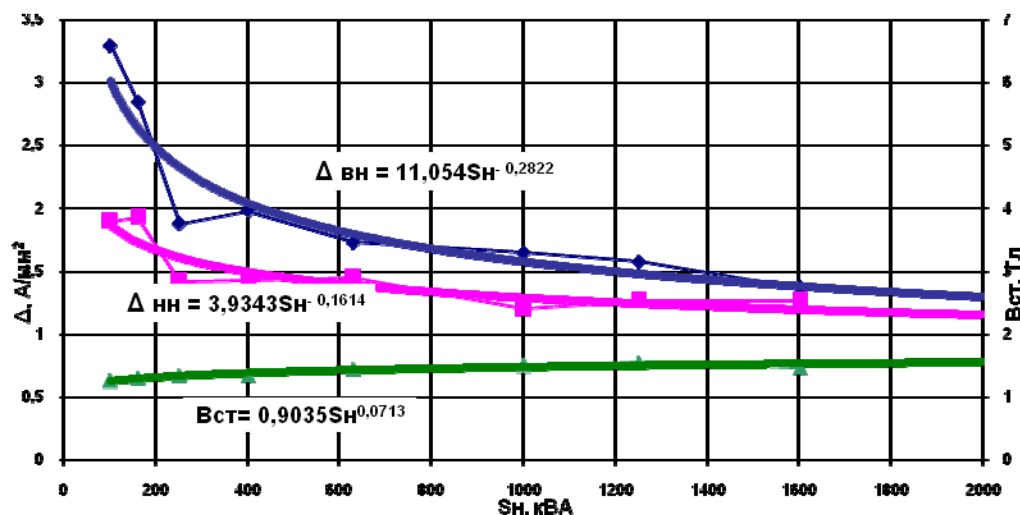


Рисунок 2 - Электромагнитные нагрузки трансформаторов

Обоснованность приведенного подхода при выборе наиболее приемлемых вариантов расчёта взрывозащищённых трансформаторов, по сравнению с классической теорией электромагнитного расчёта, согласуется с результатами их тепловых и электромагнитных исследований и подтверждены многолетним успешным опытом эксплуатации в условиях угольных шахт Донбасса, Кузбасса, Караганды и др. угольных бассейнов [8, 9].

Подтверждением рациональности выбора конструкции магнитной системы и обмоток, а также электромагнитных нагрузок трансформатора является допустимая для выбранного класса изоляции его тепловая нагрузка.

Примером сбалансированного взаимного учёта требований эксплуатации и корректного обоснования параметров взрывозащищённого трансформатора служит картина теплового состояния трансформатора мощностью 1000 кВ·А взрывозащищённой комплектной трансформаторной подстанции серии КТПВ (рис. 3), демонстрирующая близкие превышения температуры обмоток ВН и НН над температурой окружающей среды в режиме 0,8Pном, соответствующему наиболее вероятному режиму работы взрывозащищённого трансформатора в составе угледобывающего комплекса [9, 10].

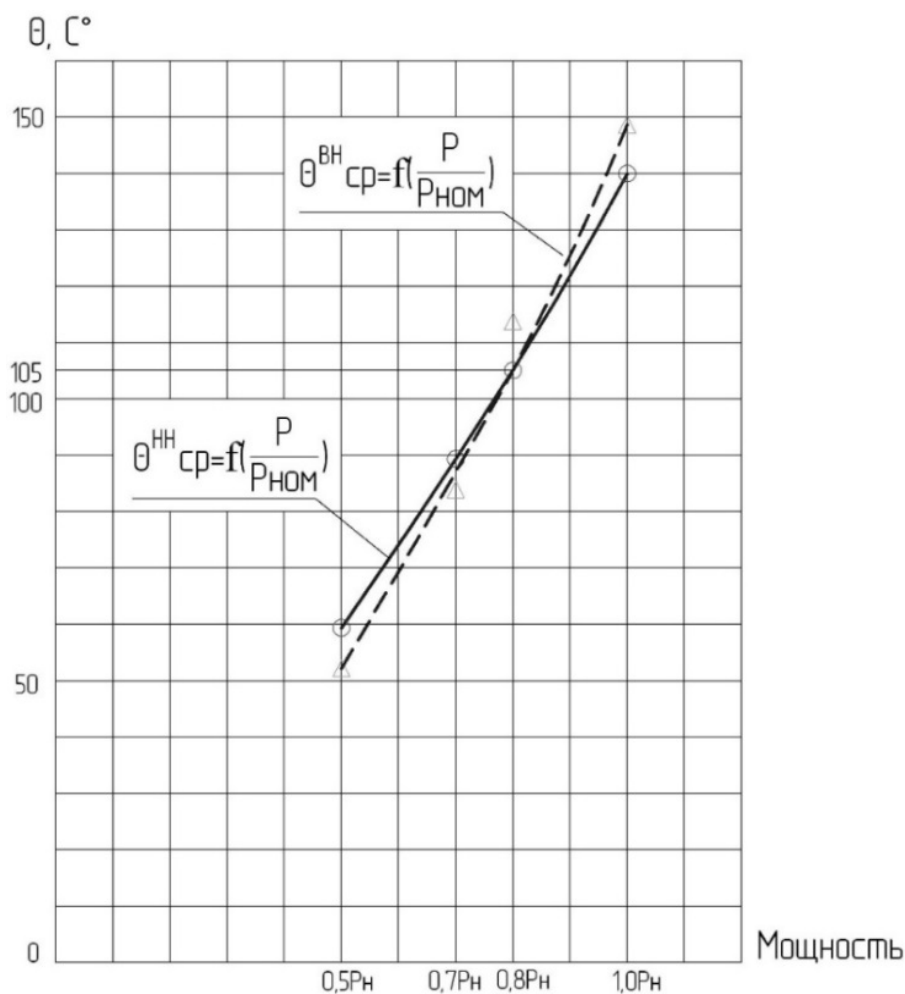


Рисунок 3 - График распределения среднего превышения температуры обмоток ВН и НН над температурой окружающей среды в зависимости от нагрузки

Выводы. В результате анализа технических требований к созданию и эксплуатации силовых трансформаторов рудничного взрывозащищённого исполнения повышенных единичных мощностей в условиях противодействия факторов ограничения эффективности их охлаждения обоснованы подходы сбалансированного решения технического противоречия и технические решения, корректность которых подтверждена результатами экспериментов и опытом промышленной эксплуатации.

Список литературы:

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. /П.М. Тихомиров.-М.: Энергоатомиздат, 1986.-528 с.
2. Mmining-flameproof-dry-type-transformer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ceegtransformer.com/archives/ceeg-kbsg2-t-mining-flameproof-dry-type-transformer>. – Загл. с экрана.
3. Энерготехнологии Becker. Трансформатор – комплектные устройства распределения и управления. Паспорт изделия. Becker Mining Systems GmbH. ТЕК/RU/ 2005-07-26.– 4 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.becker-mining.com/>.- Загл. с экрана.

4. Взрывобезопасная трансформаторная подстанция с магнитостанцией модификации TN/1250-P2.1, TN/1500-P2.1. – Ostroj-Hansen+Reinders, spol. s r.o. – 2 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ohr.cz/>. – Загл. с экрана.
5. Электрооборудование взрывозащищённое. Часть 1. Взрывозащита вида "взрывонепроницаемая оболочка". Explosionproof electrical equipment. Part 1. "Flameproof enclosure" type explosion protection. ГОСТ 30852.1-2002 (МЭК 60079-1:1998). Межгосударственный стандарт. МКС 29.260.20. Дата введения 2014-02-15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103235?marker=7D20K3>. – Загл. с экрана.
6. Справочник энергетика угольной шахты / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – [2-е изд.] – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001 – Т1, - 447с., Т2, - 440 с.
7. Сидоренко И.Т. Проектирование электроснабжения горных предприятий: учебное пособие / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва.- Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021.- 160 с.
8. 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.
9. 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.
10. Золотарев Е.В. Обоснование структуры и алгоритмов функционирования технических средств управления процессом подавления перенапряжений в трансформаторной подстанции участка шахты: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Золотарев Евгений Владимирович. – Донецк, 2020. – 175 с.

References:

1. Tikhomirov, P.M. Calculation of Transformers. / P.M. Tikhomirov.-M.: Energoatomizdat, 1986.-528 p.
2. Mmining-flameproof-dry-type-transformer [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ceegtransformer.com/archives/ceeg-kbsg2-t-mining-flameproof-dry-type-transformer>. – Title from the screen.
3. Becker Energy Technologies. Transformer – complete distribution and control devices. Product passport. Becker Mining Systems GmbH. ТЕК/RU/ 2005-07-26.– 4 p. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.becker-mining.com/>. – Caption from the screen.
4. Explosion-proof transformer substation with magnetostation modifications TN/1250-P2.1, TN/1500-P2.1. - Ostroj-Hansen+Reinders, spol. s r.o. – 2 с. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ohr.cz/>. – Cover from the screen.
5. Explosion-proof electrical equipment. Part 1. Explosion protection of the "explosion-proof shell" type. Explosionproof electrical equipment. Part 1. "Flameproof enclosure" type explosion protection. GOST 30852.1-2002 (IEC 60079-1:1998). The interstate standard. ISS 29.260.20. Date of introduction 2014-02-15. [electronic resource].-Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200103235?marker=7D20K3>. – Blank from the screen.

6. Handbook of Coal Mine Power Engineer / [Dzyuban V.S., Shirnin I.G., Vaneyev B.N., Gostishchev V.M.]; under the general editorship of B.N. Vaneyev. – [2nd ed.] – Donetsk, LLC “Yugo-Vostok Ltd.”, 2001 – T1, - 447p., T2, - 440p.
7. Sidorenko I.T. Design of Power Supply for Mining Enterprises: Textbook / I.T. Sidorenko, K.N. Marenich, I.V. Kovaleva.- Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2021.- 160 p.
8. Varenik E.A., Nalbatov V.E., Chernov I.Ya., Shilov V.V. Correlation of technical characteristics of explosion-proof transformers. / Explosion-proof electrical equipment: Collection of scientific tr. UkrNIIVE. Donetsk, 2009. pp.63-67.
9. Chernov I.Ya. Improvement of the technical level of explosion-proof mobile complete transformer substations: dis. cand. tech. sciences: 05.09.01 / I.Ya. Chernov.; DonNTU. – Donetsk, 2009. – 263 p.
10. Zolotaryov E.V. Justification of the structure and algorithms of functioning of technical means of controlling the process of suppressing overvoltages in a transformer substation of a mine section: dis. ... cand. tech. sciences: 05.13.06 / Evgeny Vladimirovich Zolotaryov. – Donetsk, 2020. – 175 p.