

УДК 621.314.211

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИЗОЛЯЦИЮ
ОБМОТОК ВЗРЫВОЗАЩИЩЁННЫХ 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

Цололо Валентина Васильевна,

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

Аннотация

Систематизированы электрические воздействия на катушки обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения взрывозащищённых трансформаторов повышенных мощностей на низшее напряжение 3,45 кВ: выявлены их источники, механизмы и последствия, а также определены пути повышения надежности изоляции по результатам отечественных и зарубежных исследований.

Ключевые слова: система изоляции, обмотки ВН и НН, электрические воздействия, перенапряжения, частичные разряды, вакуумно-нагнетательная пропитка, компаунд, класс нагревостойкости 200, алгоритм выбора изоляции.

**ANALYSIS OF ELECTRICAL EFFECTS ON THE INSULATION OF
EXPLOSION-PROOF HIGH-POWER TRANSFORMERS****Chernov Igor Yakovlevich,**

Candidate of Technical Science, Head of Department, State Budgetary Institution «NIIVE», Russia, Donetsk, niive@list.ru

Tsololo Valentina Vasilyevna,

Head of Sector, State Budgetary Institution «NIIVE», Russia, Donetsk, niive@list.ru

ABSTRACT

The article systematizes the electrical effects on the coils of the higher (HV) and lower (LV) voltage windings of high-power explosion-proof transformers with a lower voltage of 3.45 kV. It identifies their sources, mechanisms, and consequences, and identifies ways to improve the reliability of insulation based on domestic and foreign research.

Keywords: insulation system, HV and LV windings, electrical stresses, overvoltages, partial discharges, vacuum-pressure impregnation, compound, thermal class 200, insulation selection algorithm.

Введение

С переводом электрооборудования высокопроизводительных добычных комплексов на более высокий уровень питающего напряжения 3,3 кВ возникла необходимость в разработке взрывозащищённых комплектных трансформаторных подстанций (КТП) с новыми трансформаторами на сочетание напряжений 6/3,45 кВ. Надёжная и долговременная работа таких трансформаторов в значительной степени определяется совершенством системы электрической изоляции (СИ), обоснованностью выбора и качеством применяемых электроизоляционных материалов (ЭИМ) и компонентов.

Специфика взрывозащищённого исполнения — размещение активной части во взрывонепроницаемой оболочке — ограничивает эффективность теплообмена трансформатора с окружающей средой и ужесточает требования к теплопроводности и нагревостойкости СИ. Одновременно катушки обмоток ВН и НН подвергаются комплексу электрических воздействий (рабочее напряжение, коммутационные и импульсные перенапряжения), приводящих к старению и, в предельном состоянии, к пробое изоляции. Комплексный учёт этих воздействий и обоснованный выбор инструментов защиты изоляции представляют собой самостоятельную научно-техническую задачу.

Сопротивление изоляции, являющееся основной характеристикой уровня надёжности изделия, должно соответствовать нормативному значению, а также исключать возможность утечек тока, представляющих опасность для человека. Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции для трансформаторов устанавливаются нормами приёмо-сдаточных испытаний, приведёнными в нормативных документах [1, 2].

Основными задачами при проектировании СИ трансформатора являются:

- определение и учёт электрических, тепловых, механических и физико-химических воздействий, которым СИ подвергается в процессе эксплуатации;
- выбор конструкции СИ и форм изоляционных деталей;
- выбор ЭИМ и размеров изоляционных расстояний.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является анализ и систематизация инструментов защиты изоляции обмоток ВН и НН взрывозащищённых трансформаторов повышенных мощностей на низшее напряжение 3,45 кВ при их размещении во взрывонепроницаемых оболочках. Для достижения цели решаются задачи:

- систематизировать электрические воздействия на катушки ВН и НН — выявить источники, механизмы и последствия, определить оптимальные пути их снижения по результатам научных работ;
- построить алгоритм выбора типа, способа и порядка изолирования обмоток ВН и НН;
- оценить степень соответствия предлагаемой конструкции системы изоляции техническим требованиям, предъявляемым к надёжности изоляции от электрического воздействия;

Систематизация электрических воздействий на обмотки ВН и НН

В эксплуатации силовой трансформатор постоянно находится во включённом состоянии, а его изоляция — под длительным воздействием рабочего напряжения, которое она должна выдерживать без повреждений в течение срока службы до достижения предельного состояния [3]. Вследствие коммутационных процессов и случаев аварийного

характера (короткие замыкания, обрыв кабеля) возникают кратковременные перенапряжения, воздействующие в основном на главную изоляцию; при недостаточной электрической прочности возможно её разрушение [1, 4].

При проектировании СИ перечисленные воздействия целесообразно рассматривать системно (таблица 1): для каждого воздействия устанавливаются источник, механизм и зона приложения, последствие и пути снижения (устранения) их негативного влияния.

Таблица 1 – Систематизация электрических воздействий на катушки обмоток ВН и НН и путей снижения их негативного влияния

Вид воздействия	Источник	Механизм и зона приложения	Последствие	Пути снижения влияния
Длительное рабочее напряжение 50 Гц	Питающая сеть 6(10) кВ; отходящая сеть 3,45 кВ	Постоянная нагрузка главной изоляции (обмотка-магнитопровод, ВН-НН, обмотка-корпус)	Электрическое и термоокислительное старение диэлектрика, рост $\text{tg}\delta$	Выбор ЭИМ с запасом по электрической прочности; литая обмотка, метод ВПД
Коммутационные перенапряжения	Вакуумные аппараты КТП; аварийные коммутации (КЗ, обрыв кабеля)	Апериодическое и колебательные волны; главная изоляция и крайние витки	Локальные перенапряжения, возбуждение собственных частот обмотки	Усиление изоляции первых и последних витков ВН и НН; экранирующий цилиндр ВН-НН
Диэлектрические потери и тепловой пробой	$\text{tg}\delta$ ЭИМ при переменном поле; ограниченный теплоёмкость в оболочке	Объёмный нагрев диэлектрика; при $R_d > R_t$ – автокаталитический саморазогрев	Тепловой пробой изоляции	ЭИМ с низким $\text{tg}\delta$ и высокой λ (класс 200); обеспечение баланса $R_d < R_t$
Ёмкостные связи ВН-НН при импульсах	Переходные процессы при импульсных перенапряжениях	Ёмкостный перенос потенциала из обмотки ВН в обмотку НН	Перенапряжение на изоляции НН	Экранирующий (электростатический) цилиндр между обмотками ВН и НН
Электродинамические силы при КЗ	Токи КЗ (мощность КЗ 100 000 кВ·А)	Осевые силы на междукатушечную и межвитковую изоляцию;	Нарушение целостности наружных витков, снижение электрической прочности	Литая обмотка, метод ВПД, бандажирование, дистанционные

Вид воздействия	Источник	Механизм и зона приложения	Последствие	Пути снижения влияния
		образование зазоров		рейки и прокладки

Результаты исследования

При испытаниях главная и продольная изоляция обмоток трансформаторов должна выдерживать при нормальных по [5] значениях климатических факторов приложенные испытательные напряжения, установленные [6] для облегчённой изоляции (таблица 2).

Таблица 2 – Испытательные напряжения изоляции трансформатора

Испытание изоляции	Продолжительность, с	U, кВ	Вид напряжения
Главная изоляция обмотки ВН	60	16	Переменное промышленной частоты 50 Гц
Главная изоляция обмотки НН	60	10	
Продольная изоляция обмоток	60	6,9 (2U _н)	Переменное, 100 Гц

Тепло от нагретых частей сухих трансформаторов отводится за счёт теплопроводности, излучения и конвекции. Различают основные виды конструкции изоляции: «открытая обмотка» (окувание в пропиточный лак с последующим запеканием); «монолитная обмотка» (пропитка компаундом методом «вакуум-давление», ВПД); «литая обмотка» (заливка в форме пропиточным составом). Для взрывозащищённого исполнения, при котором оболочка ограничивает теплообмен, важнейшими характеристиками СИ являются теплопроводность и нагревостойкость, а также электродинамическая и термическая стойкость (мощность КЗ 100 000 кВ·А).

Повышение механической и электрической прочности СИ достигается технологией пропитки методом ВПД. Компаунд, обладая хорошей текучестью, заполняет пустоты между проводниками и изоляцией, делая обмотку монолитной и исключая деформацию; при этом учитывается совместимость компаунда и ЭИМ (одна химическая природа), а также вязкость, температура, давление и число слоёв ленты, влияющие на степень проникновения. Для СИ, изготавливаемой методом ВПД, применяют пористые стеклоленты, свободно абсорбирующие лак; вязкость компаунда контролируется в течение процесса, а для загущения и отверждения применяется инициатор (катализатор).

Одним из основных параметров ЭИМ является тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, характеризующий потери, рассеиваемые в диэлектрике под действием переменного поля. Технические требования к ЭИМ [7] приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические требования к электроизоляционным материалам

Наименование параметра	Наименование показателей	Допускаемый уровень
Исходные диэлектрические параметры ЭИМ в нормальных условиях	Диэлектрические потери	$\operatorname{tg}\delta \leq 3 \%$
	Сопротивление изоляции	$R_{\text{изол}} \geq 500 \text{ МОм}$
Диэлектрические параметры ЭИМ при T заданного класса нагревостойкости	Диэлектрические потери в ЭИМ	$\operatorname{tg}\delta \leq 30 \%$

Наименование параметра	Наименование показателей	Допускаемый уровень
	Электрическое сопротивление ЭИМ	Ризол > 10 МОм
Теплопроводность	Коэффициент теплопроводности ЭИМ	$\lambda \geq 0,45 \text{ Вт/(м·К)}$
Температура	Т _{мах}	200 °С
	Т _{мах} кратковременная	240 °С
Цементация пропиточного состава	Т = 20 °С	≤ 650 Н
	Т заданного класса нагревостойкости	≥ 50 Н

Величину диэлектрических потерь в диэлектрике под воздействием переменного электрического поля можно рассчитать по формуле (1) [8]:

$$P_d = U^2 \cdot C \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1)$$

где P_d — диэлектрические потери, Вт; U — переменное напряжение, В; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, рад/с; C — ёмкость изоляции, Ф; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

С ростом $\operatorname{tg} \delta$ существенно увеличивается ток через диэлектрик и его температура; при недостаточном теплосъёме начинается автокаталитический процесс саморазогрева, приводящий к тепловому пробую. Тепловую мощность, отводимую от диэлектрика, определяют по формуле (2) [8]:

$$P_t = \lambda \cdot S \cdot (T_2 - T_1) / h \quad (2)$$

где P_t — отводимая тепловая мощность, Вт; λ — удельная теплопроводность, Вт/(м·К); T_2 , T_1 — температуры диэлектрика и теплоносителя, °С; S — площадь диэлектрика, м²; h — толщина диэлектрика, м.

Расчётные зависимости диэлектрических потерь ЭИМ и отводимой тепловой мощности от температуры приведены на рисунке 1 [9]. Зависимость теплосъёма линейна и определяется в основном разностью температур между трансформатором и охлаждающей средой; условие теплового баланса $P_d < P_t$ задаёт допустимую рабочую область СИ.

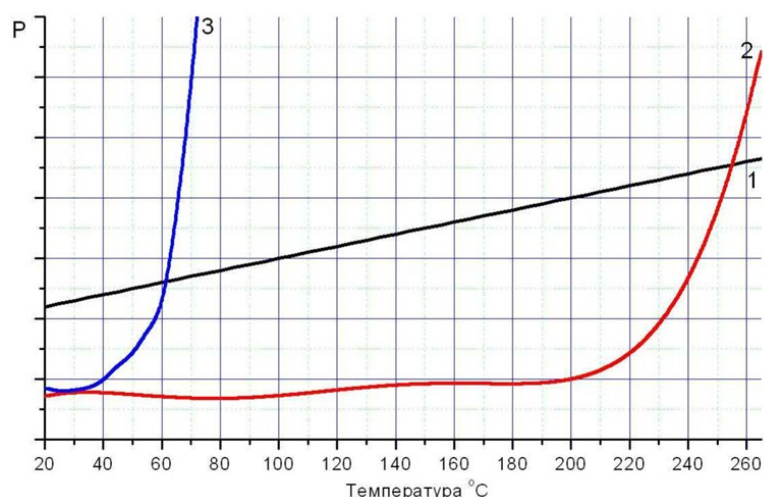


Рисунок 1 – Расчётные зависимости диэлектрических потерь и отводимой тепловой мощности от температуры

1 – мощность теплоотведения; 2 – мощность диэлектрических потерь для материала с $\operatorname{tg}\delta = 0,1$ при 260 °С; 3 – мощность диэлектрических потерь для материала с $\operatorname{tg}\delta = 0,9$ при 120 °С

Перечень изоляционных материалов СИ класса 200 на основе влагостойких слюдопластов, слюдяной ленты и пропиточного компаунда КП-303Н (ООО «Диэлектрик» [10] в сравнении с материалами АО «Электроизолит» [11]) приведён в таблице 4.

Таблица 4 – Изоляционные материалы системы изоляции класса Н, 200

Назначение электроизоляционного материала	ООО «Диэлектрик»		АО «Электроизолит»	
	Марка	Класс	Марка	Класс
Пропиточный состав	Компаунд КП-303Н	200	Компаунд Элпласт-180ИД, 220ИД	Н 220
Межслойная изоляция, мягкий цилиндр	ГИК-Т-СПл(в) 0,25	Н	ЭЛМИКА 425	Н
Изоляция пайки, переходов, выводов	ЛСП-Н-ТПл 0,11×25	Н	Элизтерм-220-ТПМ (ЛСКН(т)-Н-135-ТПл, ЛСНЭ)	220 Н
Бандажирование	ЛСЭБ-180 0,2×25	Н	ЛЭС 0,15×25	Н
Обмоточный провод	ППИПК-1	220	ППИПК-1	220
Покрытие изоляционной эмалью	Грунт-эмаль ЭКП-9303, ПОЛИТЕРМ 943	200	КО-983	Н

Обосновывая преимущества СИ с компаундом КП-303Н, ООО «Диэлектрик» приводит зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для различных пропитывающих составов ([8], рисунок 2). Отмечается, что по компаунду ПК-11 (ПК-21) имеются сведения о вредном воздействии на человека и запрете в Европе, а по компаунду Элпласт-180 – случаи самовозгорания макетов СИ (при 220 °С) тяговых электродвигателей.

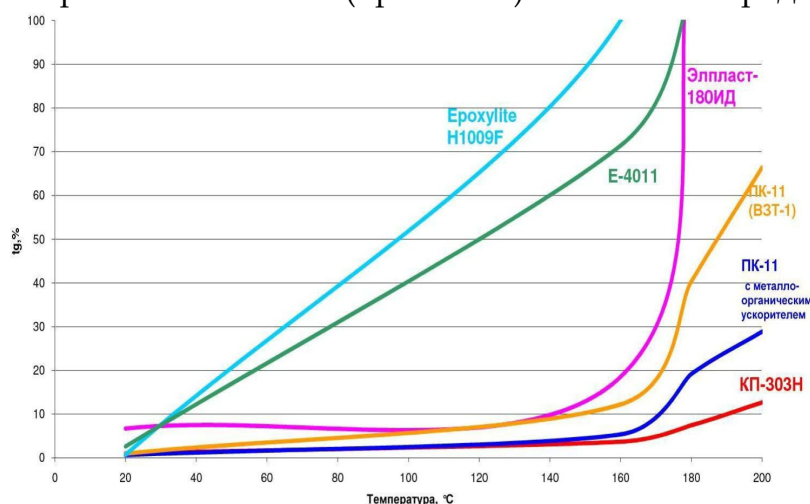


Рисунок 2 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для различных пропитывающих составов

Анализ пропиточных компаундов при повышенных температурах, выполненный исследователями ФГУП ВЭИ [12], иллюстрируется зависимостями удельного объёмного электрического сопротивления (рисунок 3) и $\operatorname{tg}\delta$ (рисунок 4) от температуры для

компаундов отечественного производства. На высоком уровне находятся характеристики компаунда ДИЭЛ-ЭПИК-14: удельное объёмное сопротивление при 220 °С — $1,9 \cdot 10^{11}$ Ом·м; $\text{tg}\delta$ при 220 °С — 0,009; электрическая прочность при 35 °С — 37 кВ/мм, при 180 °С — 35 кВ/мм; вместе с тем отсутствует информация о его широком опробовании в промышленных условиях.

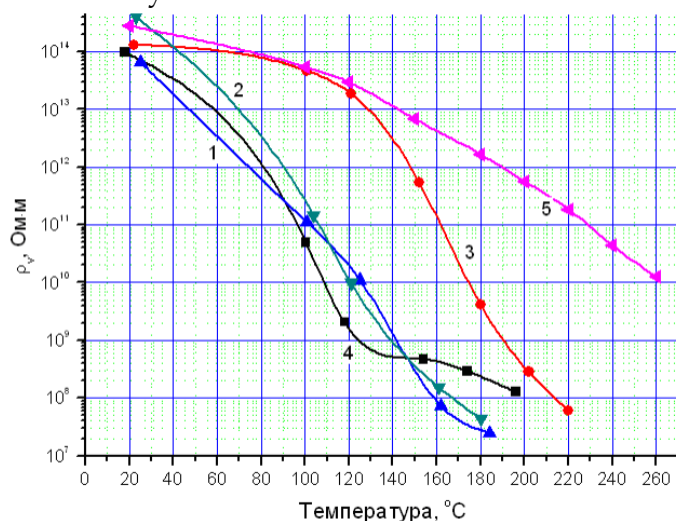


Рисунок 3 – Зависимость удельного объёмного электрического сопротивления от температуры для компаундов отечественного производства

1 – Элпласт-180ИД; 2 – Элпласт-220ИД; 3 – Элком ПК-11; 4 – КП-303; 5 – ДИЭЛ-ЭПИК-14

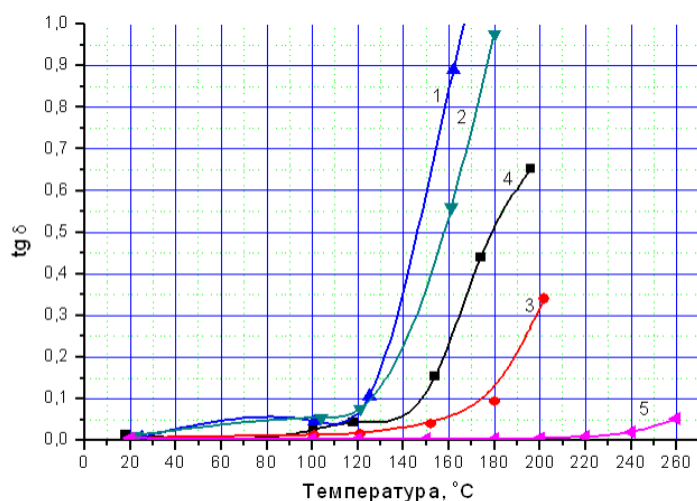


Рисунок 4 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для компаундов отечественного производства

1 – Элпласт-180ИД; 2 – Элпласт-220ИД; 3 – Элком ПК-11; 4 – КП-303; 5 – ДИЭЛ-ЭПИК-14

Широкий выбор новых отечественных ЭИМ [12 - 14] позволил разработать надёжную СИ класса 200 для взрывозащищённых трансформаторов повышенных мощностей. Применение ЭИМ с более высокими, чем у подстанций предыдущих серий ТСВП и КТПВ, характеристиками при разработке трансформаторов мощностью 1000-1600 кВ·А на низшее напряжение 3,45 кВ позволило уменьшить толщину мягкого цилиндра и межслоевой изоляции обмотки НН, а также диаметр катушек при одновременном повышении пробивных напряжений (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение серийного и предлагаемого решений по элементам изоляции обмотки НН на примере трансформатора 1000 кВ·А

Элемент СИ	Решение	Кол-во слоёв	Толщина, мм	Пробивное, кВ
Мягкий цилиндр обмотки НН	Стеклолюдинит РСКН-0,25 (серия)	5	1,25	11
	ЭЛМИКА 425 (предлагается)	3	0,75	18
Межслоевая изоляция обмотки НН	ГИК-Т-ЛСК(В) с ПСДКТ-Л (серия)	2	0,86	22,8
	ЭЛМИКА 425 с ППИПК-1 (предлагается)	3	0,75	24
Обмоточный провод (наружный диаметр обмотки НН/ВН, мм)	ПСДКТ-Л, 420/566 (серия)	-	0,31/0,5	0,4
	ППИПК-1, 417/559 (предлагается)	-	0,23/0,23	3,0

За счёт применения новых ЭИМ и обмоточных проводов, а также конструктивных и технологических новшеств (полного косого стыка, стали 3409 толщиной 0,27 мм и др.) удалось снизить суммарные потери холостого хода и короткого замыкания на 774 Вт, повысив КПД трансформатора с 99,16 до 99,23 %, что позволило спроектировать конструкцию на уровне лучших мировых образцов (таблица 6, вариант 3).

Таблица 6 – Характеристики взрывозащищённых трансформаторов 1000 кВ · А

Изделие	I _{хх} , %	P _{хх} , Вт	U _к , %	P _к , Вт	P _Σ , Вт	η, %	m, кг
1. Тр-р 1000/6-3,45 (серийная технология)	0,9	2915	4,9	5584	8499	99,16	3560
2. КТП KBSGZY (Китай) [13]	1,0	2350	4,0	5400	7750	99,23	6500
3. Тр-р 1000/6-3,45 (с ППИПК-1, предлагается)	0,7	2350	4,8	5368	7718	99,23	3520

Учитывая, что стоимость изоляционных материалов доходит до 30 % стоимости проводниковых, отдельные ЭИМ приняты более низких классов нагревостойкости, чем класс обмотки в целом, поскольку испытаниями установлено, что реальная температура наиболее нагретых точек этих материалов не превышает допустимых для их классов значений.

Таблица 7 – Характеристики изоляционных материалов по последовательности технологических операций

Последовательность операций	Марка материала	Класс	Толщина, мм / слоёв	Пробивное, кВ
	Стеклотекстолит СТ-ЭТФ	Н	0,5 / 2	13,1
	ЭЛМИКА 425		0,25 / 3	18,0
			0,25 / 5	11,0

Последовательность операций	Марка материала	Класс	Толщина, мм / слоёв	Пробивное, кВ
Мягкий цилиндр обмотки НН	Стеклослоудинит РСКН-0,25			
	Лента ЛЭС 0,15×25 (вразбежку)		0,15	-
Закрепление прокладок уравнивающих колец к первым виткам обмотки НН	Стеклотекстолит СТ-ЭТФ	Н	0,5 / n	13,1×0,5×n
	Стеклолакоткань ЛСКЛ-155 0,15×25	F	0,15 / 1	0,9
	Лента ЛЭС 0,15×25; бандаж	Н	0,15 / 1	-
Переходы из слоя в слой обмотки НН (80 мм)	Элизтерм-220-ТПМ 0,13×25	220 F	0,13 / 1	6,5
	Лента ЛСУ 0,13×25		0,13 / 1	5,85
	Лента ЛЭС 0,15×25	Н	0,15 / 1	-
Межслоевая изоляция обмотки НН	ЭЛМИКА 425	Н	0,25 / 3	18
	Стеклослодопласт ГИК-Т-ЛСК(в)	Н	0,43 / 2	22
	Стеклотекстолит СТ-ЭТФ	Н	12 / n	11,5×12×n
Выводы обмотки НН (200/100 мм)	Элизтерм-220-ТПМ 0,13×25	220 F	0,13 / 3+5	52
	Лента ЛСУ 0,13×25		0,13 / 3+6	52,65
	Лента ЛЭС 0,15×25; бандаж	Н	0,15 / 1	-
Жёсткий цилиндр обмотки ВН, дистанционные рейки, прокладки между катушками	Цилиндр ЦС-ЭТФ d/D (d+10)	Н	5 / 1	18
	Стеклотекстолит СТ-ЭТФ	Н	12/n	11,5×12×n
	Стеклотекстолит СТ-ЭТФ	Н	10/n	11,5×10×n
	Стеклотекстолит СТ-ЭТФ	Н	3/2	69
Переходы между катушками, выводы ВН (30/60 мм)	Элизтерм-220-ТПМ	220	0,13 / 3	19,5
	Лента ЛЭС 0,15×25; бандаж	Н	0,15 / 1	-
Места пайки внутри обмотки	Элизтерм-220-ТПМ 0,13×25	220	0,13 / 1	6,5
Места пайки проводов и выводов ВН и НН	Элизтерм-220-ТПМ 0,13×25	220 F	0,13 / 8	52
	Лента ЛСУ 0,13×25		0,13 / 9	52,65
	Лента ЛЭС 0,15×25			
Пропитка; обмоточный провод	Элпласт-180ИД / 220ИД; КО916к	Н, 200	Метод ВПД	22 кВ/мм; 75 кВ/мм;
	ППИПК-1 / ПСДКТ-Л	Н 220 200	Метод ВПД	3,0 0,4

С учётом опыта эксплуатации в составе КТП с вакуумными коммутационными аппаратами особое внимание уделено повышению электрической прочности СИ. Наряду с применением компаунда ЭЛПЛАСТ-220ИД и провода ППИПК-1 реализованы технические новшества: усиление изоляции первых и последних витков обмоток ВН и НН (с учётом характера распределения волны коммутационных импульсов); экранирующий цилиндр между ВН и НН, устраняющий ёмкостные связи при импульсных перенапряжениях; вентиляционная решётка магнитопровода; дополнительный слой покрывной эмали КО-983. Обоснованность решений подтверждается результатами успешных испытаний электрической прочности изоляции взрывозащищённых электродвигателей напряжением 3300 В [15].

Выводы

Систематизированы электрические воздействия на катушки обмоток ВН и НН взрывозащищённых трансформаторов на низшее напряжение 3,45 кВ: для каждого воздействия установлены источник, механизм, последствие и инструмент компенсации.

Оценка удовлетворения технических требований к защите от электрического воздействия показала соответствие предложенной СИ с необходимым запасом по большинству показателей; частично удовлетворяется требование эффективности теплоотвода в замкнутой оболочке. Обоснована конструкция СИ класса нагревостойкости 200 на основе монолитной обмотки, изготавливаемой методом ВПД, надёжность которой подтверждена результатами экспериментов и опытом промышленной эксплуатации.

Выбор пропиточного компаунда и определённой СИ класса 200 зависит от комплекса факторов и в конечном итоге должен подтверждаться результатами макетных и ресурсных испытаний, а также опытом эксплуатации.

Список литературы:

1. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы : по состоянию на 2026 год. – 6-е и 7-е издания. – М : Эксмо, 2026. – 512 с. – (Законы и кодексы).
2. ГОСТ 15542-79. Трансформаторы рудничные силовые взрывобезопасные. Общие технические условия = Flame-proof mine power transformers. General specifications : Государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден постановлением Госстандарта СССР от 28 сентября 1979 г. № 3740 : дата введения 1 января 1982 г. : Постановлением Госстандарта СССР от 27 июня 1991 года № 1076 снято ограничение срока действия – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 14 с. ; 21 см. – Текст : непосредственный.
3. ГОСТ Р 27.102-2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2021 г. N 1104-ст / разработан ЗАО "НИЦ КД" – Москва : Стандартиформ, 2021. – 46 с. ; 29 см. – Текст : непосредственный.
4. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов: Учеб. Пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
5. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды = Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic

- regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence : межгосударственный стандарт: издание официальное : утвержден постановлением Госстандарта СССР № 1394 от 29 декабря 1969 г. : введен в действие с 1 января 1971 г. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 71 с. ; 21 см. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 1516.1-76. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции = Electrical equipment for a.c. voltages from 3 to 500 kV. Requirements to electrical strength of insulation : межгосударственный стандарт: издание официальное : утвержден постановлением Госстандарта СССР от 6 декабря 1976 г. № 2701: введен в действие с 1 января 1978 г. – Москва : ИПК. Издательство стандартов, 1999. – 50 с. ; 21 см. – Текст : непосредственный.
 7. Система изоляции электродвигателей. ВАКИ.520055.090ТТ. Технические требования : разработаны 18.06.2015 г. ПАО «НИПТИЭМ» и ООО «НИИЦЕИМ» : 13 с. ; 29 см. – Текст : непосредственный.
 8. Прохоров, В. В. Полезная информация / В. В. Прохоров // Критерии, определяющие выбор ЭИМ и технологий создания систем изоляции электрических машин постоянного и переменного тока : [сайт]. – URL: https://dielektrik.ru/upload/medialibrary/766/Statya-_Kriterii_-opredelyayushchie-vybor-EIM.-Avtor-Prokhorov-V.V.2014-god.pdf (дата обращения: 10.08.2026).
 9. Пропиточные компаунды класса нагревостойкости Н"С / В. А. Маслов, А. Г. Гроздов, А. А. Панов, Н. С. Окнин // Электротехника. – 2009. – № 11. – С. 32-41. – EDN KWNBXF.
 10. Каталог продукции ООО «Диэлектрик» // ООО «Диэлектрик» – Разработка и производство электроизоляционных материалов : [сайт]. – URL: <https://dielektrik.ru/katalog-produkcii/> (дата обращения: 10.08.2026).
 11. Каталог электроизоляционных материалов АО «Электроизолит» // АО «Электроизолит» – Крупнейший завод электроизоляционных материалов : [сайт]. – URL: <https://www.electroizolit.ru/catalog/> (дата обращения: 10.08.2026).
 12. Маслов, В. А. Современные электроизоляционные пропиточные компаунды / В. А. Маслов // Электротехника. – 2011. – № 9. – С. 53-60. – EDN OCBLFL.
 13. Электроизоляция ООО «Элмика» // ООО «Элмика» - Ведущий поставщик передовых полимерных материалов и решений для промышленных применений : [сайт]. – URL: <https://elmica.ru/ru/solutions/soluiton-1> (дата обращения: 10.08.2026).
 14. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин : в двух книгах. / Ю. М. Евтушенко, Г. А. Крушевский, В. И. Лебедев [и др.] ; под ред. В. Г. Огонькова, С. В. Серебрянникова. Кн. 1. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2018. – 286 с. : ил., табл.,; ISBN 978-5-383-01286-4.
 15. Кукулевский, А. В. Система изоляции для безопасного использования во взрывозащищённых электродвигателях напряжением 3300 В / А. В. Кукулевский, В. А. Горчаков, О. Ю. Городько // Материалы круглого стола «Актуальность вопросов создания безопасных и здоровых условий труда на производствах». Макеевка: МАКНИИ, 20 августа 2024. – С. 21-27.

References:

1. Rules for the Design of Electrical Installations. All current sections: as of 2026. – 6th and 7th editions. – Moscow: Eksmo, 2026. – 512 p. – (Laws and Codes).
2. GOST 15542-79. Explosion-proof mine power transformers. General technical specifications = Flame-proof mine power transformers. General specifications: State Standard of the USSR: official edition: approved by Resolution No. 3740 of the State Standard Committee of the USSR dated September 28, 1979: effective date January 1, 1982: Resolution No. 1076 of the State Standard Committee of the USSR dated June 27, 1991, removed the limitation on the validity period – Moscow: Publishing House of Standards, 1988. – 14 p.; 21 cm. – Text: direct.
3. GOST R 27.102-2021. Reliability in engineering. Reliability of an object. Terms and definitions: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated October 8, 2021, No. 1104-st / developed by JSC “NITs KD” – Moscow: Standartinform, 2021. – 46 p.; 29 cm. – Text: direct.
4. Tikhomirov, P. M. Calculation of Transformers: Textbook. Manual for Universities / P. M. Tikhomirov. – 5th ed., revised. and supplemented. – Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 528 p.
5. GOST 15150-69. Machines, instruments and other technical products. Versions for various climatic regions. Categories, operating conditions, storage and transportation conditions regarding the impact of climatic factors of the external environment = Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environmental climatic aspects influence: interstate standard: official edition: approved by Resolution No. 1394 of the USSR State Standard dated December 29, 1969: put into effect on January 1, 1971. – Moscow: Standartinform, 2010. – 71 p.; 21 cm. – Text: direct. .
6. GOST 1516.1-76. AC electrical equipment for voltages from 3 to 500 kV. Requirements for the electrical strength of insulation = Electrical equipment for a.c. voltages from 3 to 500 kV. Requirements to electrical strength of insulation: interstate standard: official publication: approved by Resolution No. 2701 of the USSR State Standard dated December 6, 1976: put into effect on January 1, 1978. – Moscow: IPK. Publishing house of standards, 1999. – 50 p.; 21 cm. – Text: direct.
7. Electric motor insulation system. VAKI.520055.090TT. Technical requirements: developed on 18.06.2015 by PJSC “NIPTIHM” and LLC “NIICEIM”: 13 p.; 29 cm. – Text: direct.
8. Prokhorov, V. V. Useful Information / V. V. Prokhorov // Criteria Determining the Choice of Electrical Machines and Technologies for Creating Insulation Systems for DC and AC Electrical Machines: [website]. – URL: https://dielektrik.ru/upload/medialibrary/766/Statya-_Kriterii_-opredelyayushchie-vybor-EIM.-Avtor-Prokhorov-V.V.2014-god.pdf (date of reference: 08/10/2026).
9. Impregnation compounds of heat resistance class N.S. / V. A. Maslov, A. G. Grozdov, A. A. Panov, N. S. Oknin // Electrical Engineering. – 2009. – No. 11. – Pp. 32-41. – EDN KWNBXF.

10. Product catalog of LLC “Dielectric” // LLC “Dielectric” – Development and production of electrical insulating materials: [website]. – URL: <https://dielektrik.ru/katalog-produkcii/> (accessed: 10.08.2026).
11. Catalog of electrical insulating materials by JSC “Electroizolit” // JSC “Electroizolit” – The largest plant of electrical insulating materials: [website]. – URL: <https://www.electroizolit.ru/catalog/> (accessed: 10.08.2026).
12. Maslov, V. A. Modern electrical insulating impregnating compounds / V. A. Maslov // Electrical Engineering. – 2011. – No. 9. – Pp. 53–60. – EDN OCBLFL.
13. Electrical insulation by LLC “Elmika” // LLC “Elmika” – Leading supplier of advanced polymer materials and solutions for industrial applications: [website]. – URL: <https://elmika.ru/ru/solutions/soluiton-1> (accessed: 10.08.2026).
14. Electrical insulating materials and insulation systems for electrical machines: in two books. / Yu. M. Evtushenko, G. A. Krushevsky, V. I. Lebedev [et al.]; edited by V. G. Ognikov, S. V. Serebryannikov. Book 1. – Moscow: Publishing House of MEI, 2018. – 286 p.: ill., tabl.; ISBN 978-5-383-01286-4.
15. Kukulevsky, A. V. Insulation system for safe use in explosion-proof 3300 V electric motors / A. V. Kukulevsky, V. A. Gorchakov, O. Yu. Gorodko // Materials of the round table “The relevance of issues related to creating safe and healthy working conditions in production facilities.” Makeevka: MAKNI, August 20, 2024. – Pp. 21–27.