



АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА СОСТОЯНИЕ ЕГО ИЗОЛЯЦИИ

Балобанов Р.Н., Булатов В.М.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
rassel_ipek@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ* Численное моделирование режимов работы изоляции сухих трансформаторов актуально в связи с необходимостью повышения надежности и эффективности современных энергосистем, поскольку позволяет оптимизировать их эксплуатационные характеристики. В свою очередь, современные программные средства обеспечивают детализированный анализ сложных физических процессов, что способствует снижению затрат на натурные эксперименты и улучшению экономической обоснованности предлагаемых решений. Прогнозирование срока службы изоляции с использованием численного моделирования и предупреждение аварийных ситуаций критически важны для поддержания стабильности электроснабжения. **ЦЕЛЬ.** Разработка численной модели сухого трансформатора. Проведение исследований влияния различных режимов работы на состояние изоляции сухих трансформаторов. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной цели использовался метод численного моделирования работы сухих трансформаторов, реализованный в среде программного обеспечения COMSOL Multiphysics. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результаты исследования демонстрируют возможность на основе современных численных моделей прогнозировать тепловые и электрические процессы в изоляции сухих трансформаторов, что способствует продлению срока службы последних. Существующие режимы работы трансформаторов позволяют оптимизировать их параметры для повышения эффективности функционирования, в том числе и снижения электрических потерь. Результаты моделирования показывают взаимосвязь между параметрами режимов работы сухого трансформатора и состоянием его изоляции, что способствует своевременному обнаружению и устранению возможных неисправностей. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В результате исследования на основе разработанной численной модели были проанализированы существующие режимы работы трансформатора с сухой изоляцией, и исследованы их влияния с учетом температуры нагрева обмоток трансформатора.

Ключевые слова: трансформатор с литой изоляцией; нагрев; бросок тока намагничивания; переходный процесс; феррорезонанс.

Для цитирования: Балобанов Р.Н., Булатов В.М. Анализ влияния режимов работы сухого трансформатора на состояние его изоляции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 70-87. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-70-87.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF OPERATING MODES OF A DRY TRANSFORMER ON THE CONDITION OF ITS INSULATION

Balobanov R.N., Bulatova V.M.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
rassel_ipek@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* Numerical simulation of the isolation modes of dry transformers is relevant due to the need to improve the reliability and efficiency of modern power systems, as it allows to optimize their operational characteristics. In turn, modern software tools provide a detailed analysis of complex physical processes, which helps to reduce the cost of field

experiments and improve the economic feasibility of the proposed solutions. Predicting the insulation life using numerical modeling and emergency prevention are critically important for maintaining the stability of the power supply. purpose. Development of a numerical model of a dry transformer. Conducting studies of the influence of various operating modes on the insulation condition of dry transformers. METHODS. To achieve this goal, the method of numerical simulation of the operation of dry transformers was used, implemented in the COMSOL Multiphysics software environment. results. The results of the study demonstrate the possibility of predicting thermal and electrical processes in the insulation of dry transformers based on modern numerical models, which helps to extend the service life of the latter. The existing operating modes of transformers make it possible to optimize their parameters to increase operational efficiency, including reducing electrical losses. The simulation results show the relationship between the parameters of the dry transformer operating modes and the state of its insulation, which contributes to the timely detection and elimination of possible malfunctions. conclusion. As a result of the study, based on the developed numerical model, the existing operating modes of a transformer with dry insulation were analyzed, and their effects were investigated taking into account the heating temperature of the transformer windings.

Keywords: *cast resin transformer; heating; magnetization current surge; transient; ferroresonance.*

For citation: Balobanov R.N., Bulatova V.M. Analysis of the influence of operating modes of a dry transformer on the condition of its insulation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 70-87. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-70-87.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Трансформаторы играют важную роль в системе электроснабжения, обеспечивая преобразование напряжения переменного тока для эффективного распределения электроэнергии. Среди различных типов трансформаторов сухие трансформаторы выделяются благодаря своей безопасности и низким эксплуатационным затратам. В отличие от традиционных масляных трансформаторов, сухие трансформаторы используют изоляционные материалы без применения жидкостей, что снижает риск возгорания и загрязнения окружающей среды.

Сухие трансформаторы производятся в двух основных классах напряжения — 6 кВ и 10 кВ — и благодаря своей инновационной конструкции находят широкое применение как в городской инфраструктуре, так и в промышленности, обеспечивая высокие стандарты экологической безопасности [1]. Одной из ключевых особенностей их конструкции, адаптированной для работы в условиях допустимых гармоник, является значительное снижение энергетических потерь. Отсутствие необходимости в радиаторах и расширительных баках делает их особенно компактными и удобными для установки в условиях ограниченного пространства. При эксплуатации в роли тяговых преобразователей, важно, чтобы такие трансформаторы были готовы к частым колебаниям в электрической сети и могли выдерживать значительное тепловое воздействие [2].

Надежность и безопасность сухих трансформаторов зависят от качества изоляции обмоток, а эффективность их работы от технологии производства, включая вакуумную формовку и изоляцию компаундом. Преимущества сухих трансформаторов включают.

1. **Безопасность.** Отсутствие масла снижает риск возгорания и делает трансформаторы более безопасными для установки внутри зданий и в общественных местах. Это особенно важно в условиях, где пожаро- и взрывоопасность являются критическими факторами.

2. **Экологичность.** Поскольку используется сухая изоляция, снижаются риски загрязнения окружающей среды в случае утечек, что делает сухие трансформаторы более экологически безопасными.

3. **Низкие эксплуатационные требования.** Такие трансформаторы требуют минимального обслуживания, так как у них нет необходимости в замене или проверке изоляционного масла, что снижает операционные затраты и затраты на техническое обслуживание.

4. **Простота установки.** Более компактные и легкие, эти трансформаторы не требуют специальных подготовленных площадок или дорогостоящих систем защиты от

утечек масла, что упрощает их установку и снижает начальные затраты.

5. Устойчивость к неблагоприятным условиям. Сухие трансформаторы могут быть более устойчивыми к перепадам температур, влажности и другим неблагоприятным условиям окружающей среды, что позволяет использовать их в разнообразных климатических зонах.

6. Минимальные электромагнитные помехи. Конструкция сухих трансформаторов часто способствует снижению уровня электромагнитных помех, что может быть важным в местах с высокими требованиями к качеству электроснабжения, например, в больницах или на предприятиях электроники.

7. Низкий уровень шума. Сухие трансформаторы часто работают с меньшим выделением шумовой компоненты, чем их масляные аналоги, что может быть критически важным в городских условиях или вблизи жилых районов.

При анализе различий между трансформаторами с литой изоляцией и воздушно-барьерной изоляцией, важно отметить, что первые более уязвимы к перегрузкам. Это объясняется тем, что обмотки окружены специальным компаундом, который со временем может разрушаться под воздействием систематических перегрузок. Воздушно-барьерная изоляция таких проблем не испытывает, поскольку воздух, служащий изолятором, обновляется во время эксплуатации, что позволяет этим трансформаторам справляться с высокими динамическими и тепловыми нагрузками.

Однако у воздушных трансформаторов есть риски, включая воздействие повышенной влажности, загрязнений, химикатов и условий окружающей среды. Выше обозначенные риски определяются условиями эксплуатации и приводят к ограничению производительности и срока службы обоих типов изоляции. Поэтому необходимо учитывать климатическое исполнение рассматриваемых трансформаторов.

Из-за чувствительности к перепадам температуры, сухих трансформаторов на открытом воздухе без защитных кожухов не рекомендуется. Также, среди конструктивных недостатков можно назвать отсутствие анцапфы, вследствие чего регулировка напряжения возможна только через переключки на высоковольтной стороне. Несмотря на более высокую цену сухих трансформаторов по сравнению с масляными, их применение оправдано из-за низких эксплуатационных затрат и возможности использования внутри помещений.

Однако, не смотря на приведенные многочисленные преимущества сухих трансформаторов, в последнее время поступали многочисленные жалобы на повреждения трансформаторов с литой изоляцией. Некоторые из причин отказов представлены ниже согласно [4].

1. Тепловые перегрузки. Превышение допустимых температурных режимов может привести к деградации литой изоляции, что со временем снижает ее электрическую прочность и увеличивает риск пробоя.

2. Электрические перенапряжения. Внезапные скачки напряжения, такие как грозовые импульсы или аварийные коммутационные и феррорезонансные процессы, могут создавать напряжение, превышающее электрическую прочность изоляции.

3. Механические повреждения. Вибрации, удары или неправильное обращение в процессе транспортировки и установки могут вызвать микротрещины или другие повреждения в литой изоляции.

4. Изоляционные дефекты. Недостатки в процессе производства, такие как наличие пустот, включений или неоднородностей, провоцируют частичные разряды, что увеличивает риск пробоя.

5. Ухудшение свойств материалов. Со временем воздействия различных факторов окружающей среды, таких как влага, химические вещества и загрязнения, изменяют свойства изоляционных материалов, снижая их эффективность.

6. Неудовлетворительное техническое обслуживание. Неправильный уход или его отсутствие способствуют возникновению развивающихся дефектов или износа компонентов, что ведет к их дальнейшему повреждению.

7. Частичные разряды. Частичные разряды в сухих трансформаторах представляют собой электрические разряды, которые происходят в неполных изоляционных промежутках и не приводят к полному пробое изоляции. Они могут быть вызваны дефектами в изоляции, такими как трещины, поры или загрязнения.

Согласно статистике, основным фактором, способствующим старению изоляции, является тепловой пробой. Эта проблема особенно актуальна для сухих литых трансформаторов, где разница в коэффициентах теплового расширения между проводниками и литой изоляцией может приводить к образованию микротрещин и

частичным разрядам. Образовавшиеся микротрещины создают условия для увеличения напряженности электрического поля из-за различий в диэлектрической проницаемости. В конечном итоге это вызывает разрушение изоляции и возникновение межвиткового замыкания. Хотя такая последовательность событий кажется вероятной, в настоящее время нет достаточного количества данных для окончательного подтверждения этой гипотезы. Микротрещины могут быть обнаружены с помощью ультразвуковой дефектоскопии или других методов, предназначенных для выявления частичных разрядов. Еще одной вероятной причиной теплового пробоя является феррорезонанс, характеризующийся кратковременными критическими повышениями напряжения. В ситуациях, когда малонагруженные силовые трансформаторы подключены без требуемой фазировки, феррорезонансные перенапряжения могут возникать как на стороне высокого, так и на стороне низкого напряжения. Эти перенапряжения значительно увеличивают токи в обмотках трансформатора, что представляет угрозу для его изоляции. *COMSOL Multiphysics*, как универсальное средство для численного моделирования, предоставляет возможности для многокомпонентного анализа температурных полей [6]. Задача моделирования тепловых процессов в трансформаторах сводится к решению проблемы теплопередачи в сложных геометриях и оценке влияния различных тепловых режимов на изоляционную конструкцию трансформатора [7, 8].

В работах, посвященных моделированию сухих трансформаторов, акцентируется внимание на параметрах, определяющих распределение температуры: теплопроводность материалов, конвекция и тепловое излучение [9]. Также рассматриваются различные сценарии эксплуатации, включая перегрузочные режимы и влияние окружающей среды на тепловое состояние трансформатора [10].

Большое внимание уделяется валидации моделирования результатов с экспериментальными данными, что позволяет увеличить доверие к численным методам и уточнять параметры модели для повышения её точности [11, 12]. Современные исследования также часто освещают вопросы оптимизации конструкции трансформаторов на основании результатов моделирования для улучшения их тепловых характеристик [13, 14].

Таким образом, численное моделирование в программной среде, такой как *COMSOL*, играет важную роль в исследовании и разработке сухих трансформаторов с литой изоляцией. Эти модели позволяют не только предсказать тепловое поведение трансформаторов в различных режимах работы, но и содействуют развитию более совершенных конструкций, что улучшает их эксплуатационные характеристики и долговечность.

Материалы и методы (Materials and methods)

Моделирование конструкции трехфазного трансформатора с литой изоляцией из компаунда, рисунок 1. В этой модели обмотки трансформатора будут залиты специальным компаундом, который обеспечивает надежную электрическую изоляцию и защищает от механических повреждений. Литая изоляция способствует равномерному распределению тепла, что улучшает тепловые характеристики устройства.

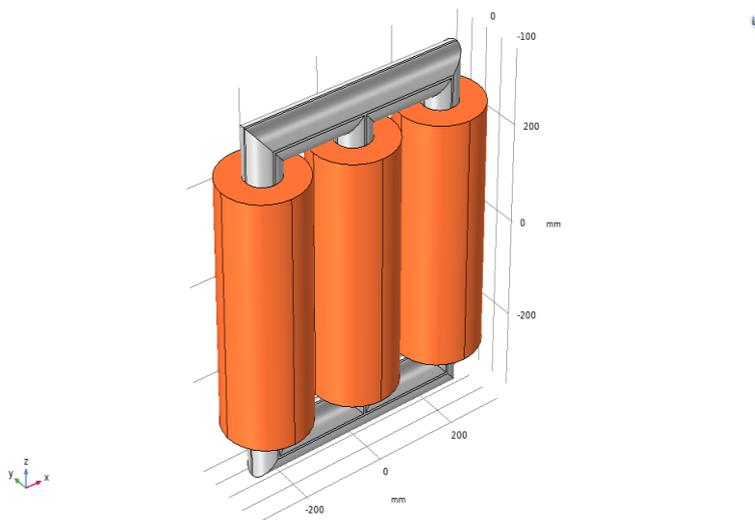


Рис.1. 3D-модель трансформатора с литой изоляцией 10/0,4 кВ в программе *COMSOL*

Fig.1. 3D model of a 10/0.4 kV cast resin transformer in *COMSOL*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Магнитопровод трехфазного трансформатора изготовлен из стали марки NV30S-120, отличающейся своими высокими магнитными характеристиками. Характеристики намагничивания этой стали позволяют минимизировать потери и улучшить эффективность работы трансформатора. Кривая намагничивания, приведенная на рисунке 2, демонстрирует, как материал реагирует на магнитное поле, что позволяет визуально оценить его магнитные свойства и поведение в различных режимах работы.

Характеристики трансформатора ТЛС-25 10/0,4 Д/УН-11: $S_{ном}=25$ кВА – номинальная мощность; $U_{вн}=10$ кВ – номинальное напряжение ВН; $U_{нн}=0,4$ кВ – номинальное напряжение НН; $\Delta P_{хх}=140$ Вт – потери холостого хода; $\Delta P_{кз}=530$ Вт – потери короткого замыкания; $I_{хх}=2\%$ – ток холостого хода; $u_{кз}=3,5\%$ – напряжение короткого замыкания; $R_{нн}=927 \cdot 10^{-4}$ Ом – сопротивление обмотки НН; $R_{вн}=67$ Ом – сопротивление обмотки ВН.

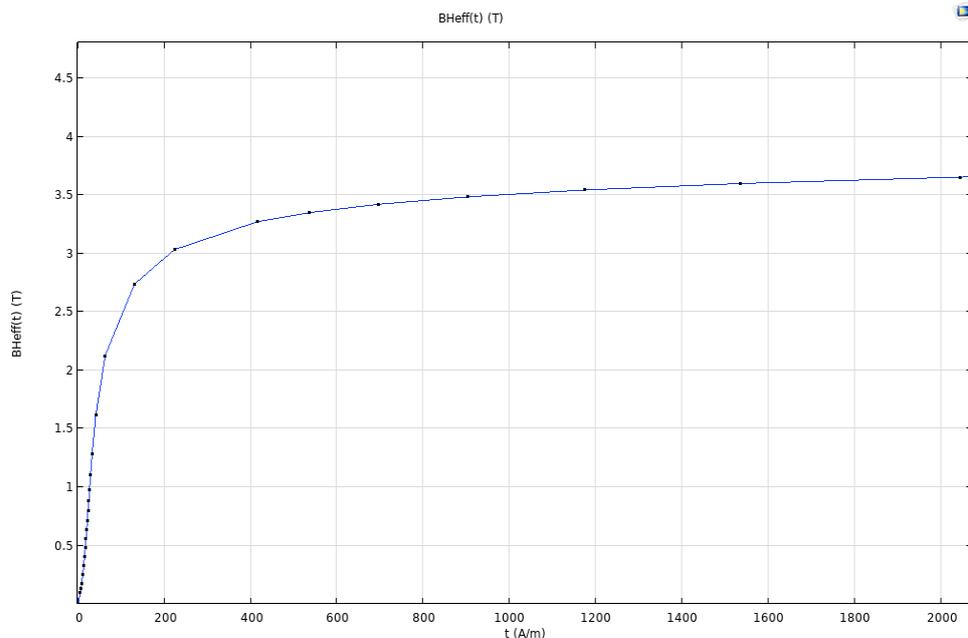


Рис.2. Кривая намагничивания стали марки NV30S-120

Fig.2. Magnetization curve of NV30S-120 steel

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Определение электрических параметров трансформатора. Индуктивное сопротивление $X_T=140$ Ом.

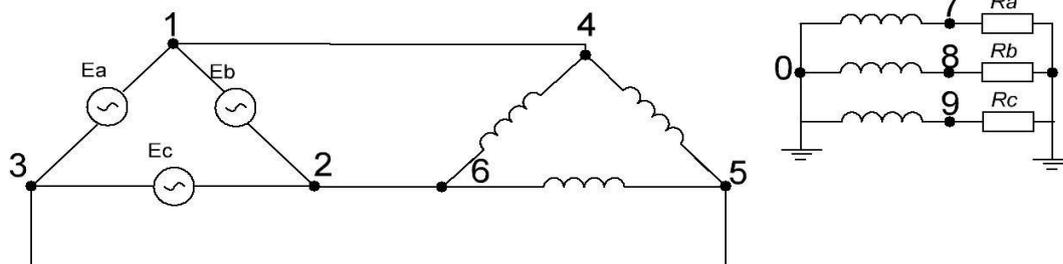


Рис.3. Электрическая схема подключения трансформатора в сеть

Fig.3. Electrical diagram for connecting a transformer to a network

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3 представлена схема электрической цепи, которая была задана при моделировании трансформатора в COMSOL. В первичную цепь включен трехфазный источник напряжением 10 кВ с внутренним сопротивлением Z_c . Нагрузка вторичной цепи 0,4 кВ моделируется постоянным сопротивлением R . Параметры этой электрической цепи: $E=10$ кВ; $w_1=5097$ витков; $w_2=118$ витков; $K_T=43,2$.

Значительное внимание уделяется правильному выбору значения активного сопротивления, которое можно вычислить по формуле (1). Правильно подобранное активное сопротивление позволяет точно моделировать характерные рабочие условия трансформатора. Этот подход поможет в дальнейшем анализе и оптимизации работы трансформатора в реальных эксплуатационных условиях. Для моделирования

номинального режима работы трансформатора его нагрузка представлена в виде активного сопротивления и характеризуется формулой (1).

$$Z_{нагр} = R_{нагр} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = 6,4 \text{ Ом} \quad (1)$$

Рисунок 4 иллюстрирует, что действующее значение фазного тока обмотки высшего напряжения (ВН) составляет 0,85 А, так как схема соединения обмотки ВН – треугольник, то действующее значение линейного тока будет отличаться в корень из трех раз и равно 1,47 А. Для обмотки низшего напряжения (НН) действующий ток равен 36,4 А (рис. 5).

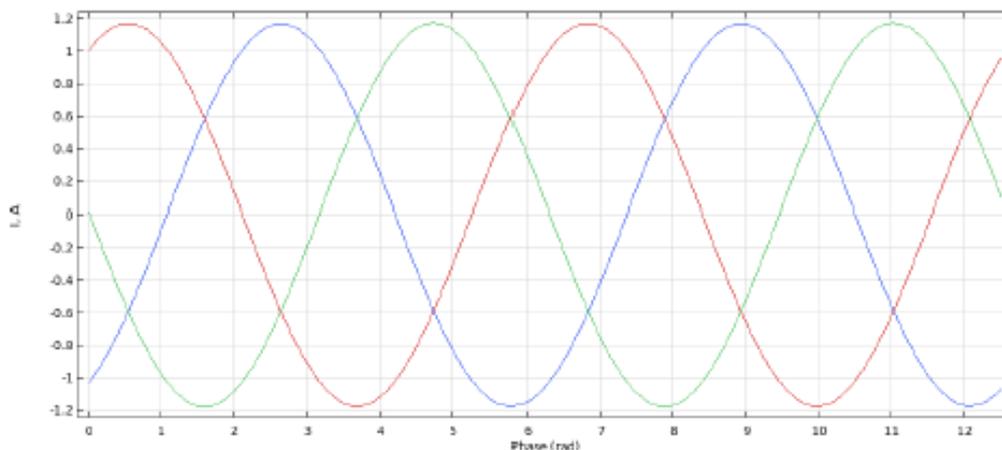


Рис.4. Осциллограмма фазного тока обмотки ВН

Fig.4. Oscillogram of the phase current of the HV winding

Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

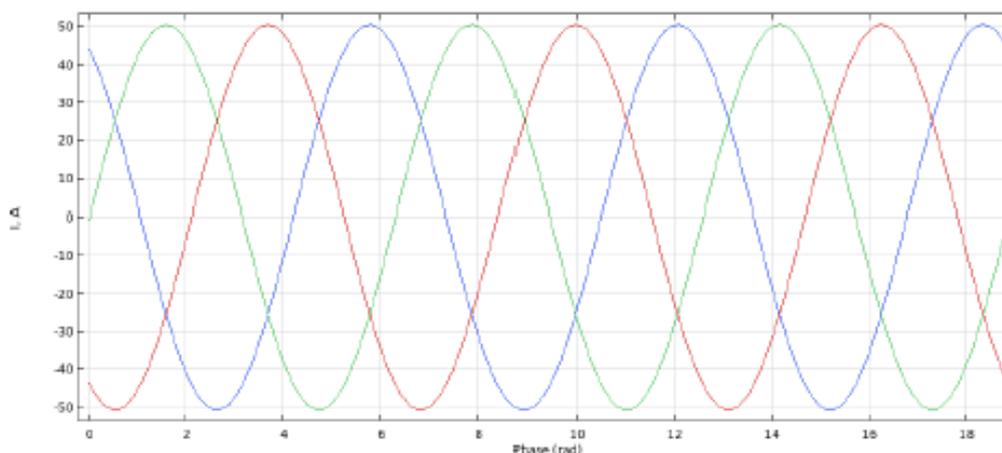


Рис.5. Осциллограмма фазного тока обмотки НН

Fig.5. Oscillogram of the phase current of the LV winding

Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 1 приведены полученные значения токов и напряжений. Данные значения соответствуют паспортным данным исследуемого трансформатора.

Таблица 1

Токи и напряжения при номинальном режиме работы трансформатора

Результаты	I_1 , А	I_2 , А	U_1 , В	U_2 , В
Паспортные данные	1,44	36,1	231	10000
COMSOL	1,47	36,4	230	10000

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 6 показано распределение рабочей температуры в трансформаторе после его работы на протяжении девяти часов в номинальном режиме. При этом режиме температура обмотки низшего напряжения фазы «А» достигает 38,3 °С. Рисунок 7 иллюстрирует, что наиболее высокая температура наблюдается в центральной части обмотки, так как она находится на максимальном удалении от окружающей среды, отводящей тепло. Этот факт подчеркивает важность оптимизации конструкции для эффективного управления теплом и предотвращения возможных перегревов, которые могут повлиять на долговечность и надежность трансформатора.

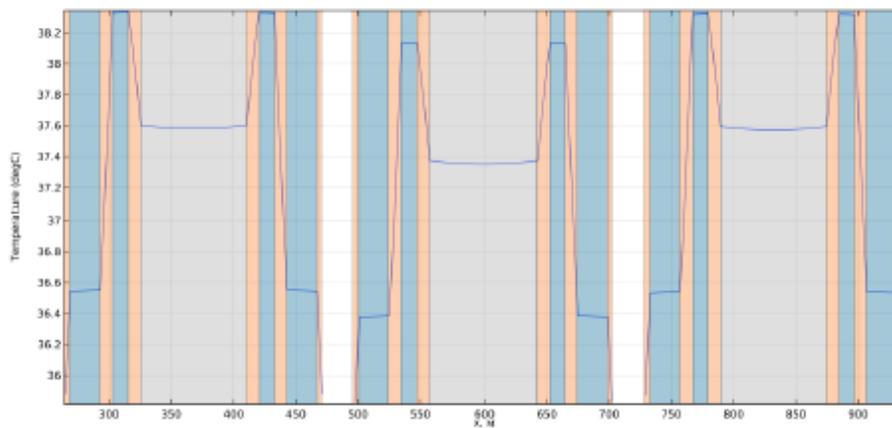


Рис.6. Распределение температуры трансформатора через время $t=9$ ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig.6. Transformer temperature distribution after time $t=9$ hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)

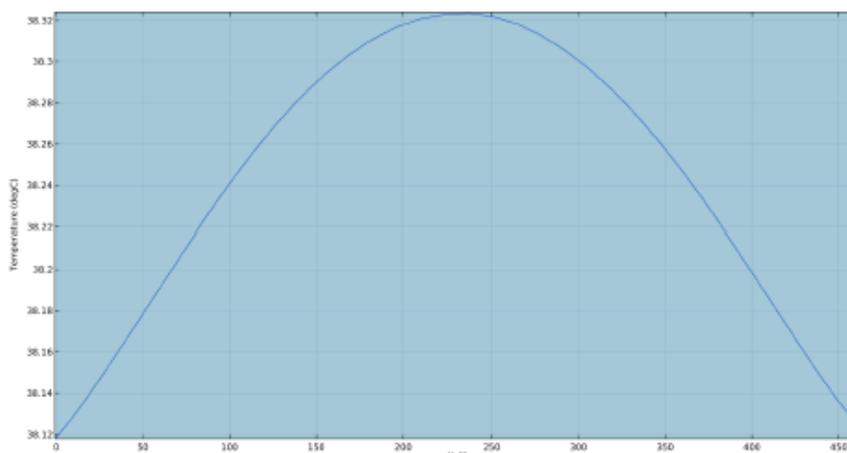


Рис.7. Температура вдоль обмотки НН фазы А через время $t=9$ ч (синий - обмотка)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig.7. Temperature along the LV winding of phase a after time $t=9$ hours (blue - winding)

Для проведения модельного эксперимента в режиме холостого хода трансформатора внимание акцентировано на обмотке низкого напряжения, на которую подается номинальное напряжение $U_{\text{нн}}=0,4$ кВ. Необходимо отметить, что обмотка высокого напряжения при этом останется разомкнутой. Это условие дает возможность изолировать эффекты, происходящие в обмотке низкого напряжения, и исследовать их без влияния аспектов, связанных с работой обмотки высокого напряжения. В данном режиме холостого хода трансформатор продолжает функционировать, но без нагрузки, что позволяет анализировать только магнитные и электрические процессы, происходящие внутри обмотки. Полученные данные иллюстрируют поведение трансформатора в различных эксплуатационных условиях. Осциллограмма тока, регистрируемая в обмотке низкого напряжения, представлена на рисунке 8 и иллюстрирует динамику протекания тока в этом режиме.

Исследование осциллограммы представляет возможность оценить не только величину тока, но и выявить любые аномалии или отклонения, которые могут указывать на потенциальные неисправности трансформатора. Кроме того, полученные результаты модельного эксперимента можно использовать для дальнейшего моделирования и

оптимизации конструкции трансформатора, а также для разработки рекомендаций по эксплуатации и техническому обслуживанию, что в конечном итоге повысит надежность и эффективность его работы.

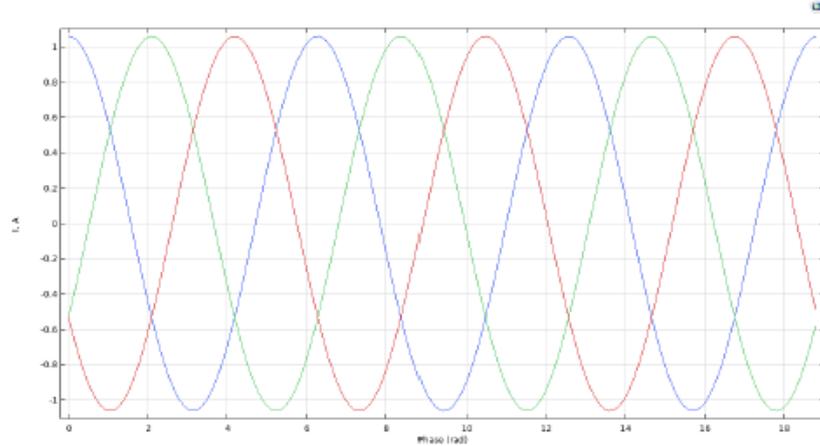


Рис.8. Осциллограмма тока обмотки НН Fig.8. Oscillogram of LV winding current
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ток холостого хода трансформатора определяется по формуле (2):

$$I_{xx}, \% = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2} \cdot I_{2ном}} \cdot 100 = 2,1 \% \quad (2)$$

В таблице 2 приведены результаты сравнения полученного значения тока холостого хода с паспортными данными, при этом они совпадают.

Таблица 2

Токи и напряжения при номинальном режиме работы трансформатора

Результаты	$I_{xx}, \%$	$U_1, В$	$U_2, В$
Паспортные данные	2	10000	231
COMSOL	2,1	10000	230

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рисунок 9 иллюстрирует, что ввиду малой величины тока, нагрев обмоток в исследуемом режиме практически отсутствует.

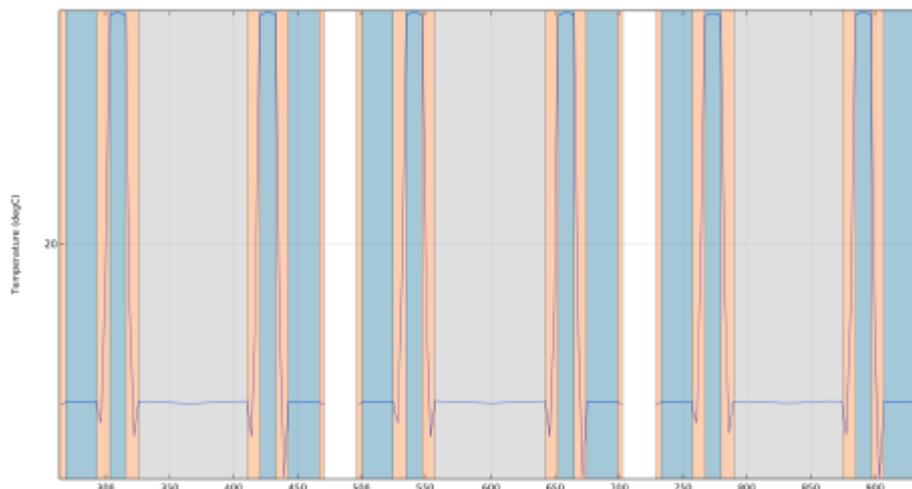


Рис.9. Распределение температуры трансформатора через время t=9 ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник) Fig.9. Transformer temperature distribution after time t=9 hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Опыты короткого замыкания (КЗ) проводятся для схемы сети, представленной на

рисунке 3 при следующих условиях: $Z_{нагр}=0$; $I_1=I_{1ном}=1,44$ А.

Напряжение короткого замыкания было определено методом подбора и составило 350 В (рис. 10). При этом амплитудное значение тока первичной обмотки составило 1,5 А, что практически соответствует номинальному значению (рис. 10).

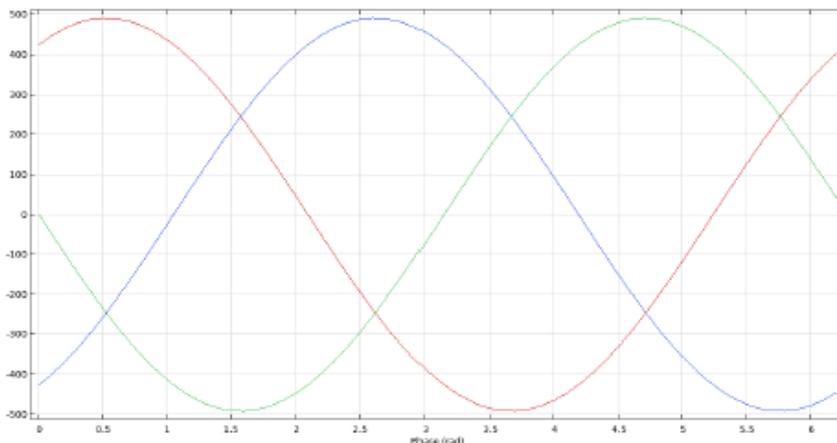


Рис.10. Осциллограмма тока обмотки ВН Fig.10. Oscillogram of HV winding current
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Значение полного сопротивления трансформатора вычисляется по формуле:

$$Z_{mp} = \frac{E_c}{I_{кз\phi} \cdot \sqrt{3}} = 140,3 \text{ Ом} \quad (3)$$

Напряжения короткого замыкания при этом будет равно:

$$u_k, \% = \frac{Z_{mp} \cdot S_{ном} \cdot 100}{U_{вн}^2} = 3,51 \% \quad (4)$$

Такое значение напряжения КЗ соответствует паспортным данным трансформатора.

В таблице 2 представлены результаты типовых испытаний на нагрев трансформатора ТЛС-25/10/0,4. Эти испытания имеют ключевое значение для оценки термической устойчивости и эффективности работы трансформатора в условиях короткого замыкания. Переход в режим КЗ происходит в момент времени 8:00 часов, начальная температура обмоток трансформатора при этом составляет 38 °С. Установившееся значение температуры через 9 часов после включения обмотки фазы «В» $\theta_{обм.ф.В}$ в этом режиме равно 71 °С, температура магнитопровода при этом достигает значения $\theta_{магн}=44$ °С, обмотка ВН нагревается до 63 °С.

Для более глубокого анализа и сравнения результатов расчетных данных с результатами типовых испытаний на нагрев, начальное значение температуры обмотки было установлено на уровне 38 °С, что соответствует условиям, имевшим место на момент начала испытаний. Это значение служит важным эталоном, поскольку позволяет объективно сравнить как расчетные, так и экспериментальные данные, особенно в контексте того, как изменяется температура трансформатора в режиме короткого замыкания.

Распределение температуры трансформатора по различным обмоткам во время опыта короткого замыкания через 9 часов его работы представлено на рисунке 11. Данные на рисунке 11 иллюстрируют эффект продолжительной работы трансформатора в критическом режиме. Обмотка низшего напряжения фазы «В» нагревается до 75,3 °С, в то время как обмотка высшего напряжения фазы «В» достигает температуры 69,8 °С. Эти температуры важны для понимания термических режимов работы трансформатора и могут быть использованы для дальнейшего анализа его надежности и безопасности.

На рисунке 12 представлено сравнение нагрева обмотки низшего напряжения фазы «В» в условиях короткого замыкания, рассчитанного в программе COMSOL, с результатами, полученными в ходе испытаний. Следует отметить, что полученные результаты полностью совпадают, что, в свою очередь, подтверждает высокую точность численной модели. Это свидетельствует о том, что используемая методология численного моделирования в программном обеспечении COMSOL эффективна для прогнозирования температурных режимов сухих трансформаторов в нормальных и аварийных режимах работы.

Процесс нагрева трансформатора ТЛС-25 в режимах XX и КЗ

Время ч:мм	$\theta_{\text{окр}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{магн}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{обм.ф.В}}, ^\circ\text{C}$
16:00	20	20	20
12.03.2019			
07:50	20	44	38
Переключение в режим КЗ			
8:00	20	42	38
8:30	20	38	46
9:00	21	37	50
9:30	21	36	53
10:00	21	36	56
10:30	21	36	58
11:00	21	37	60
11:30	21	38	62
12:00	21	39	64
12:30	21	39	65
13:00	21	40	66
13:30	21	41	67
14:00	21	42	68
14:30	21	42	68
15:00	21	43	69
15:30	21	43	69
16:00	21	43	70
16:30	21	44	70
17:00	21	44	71

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

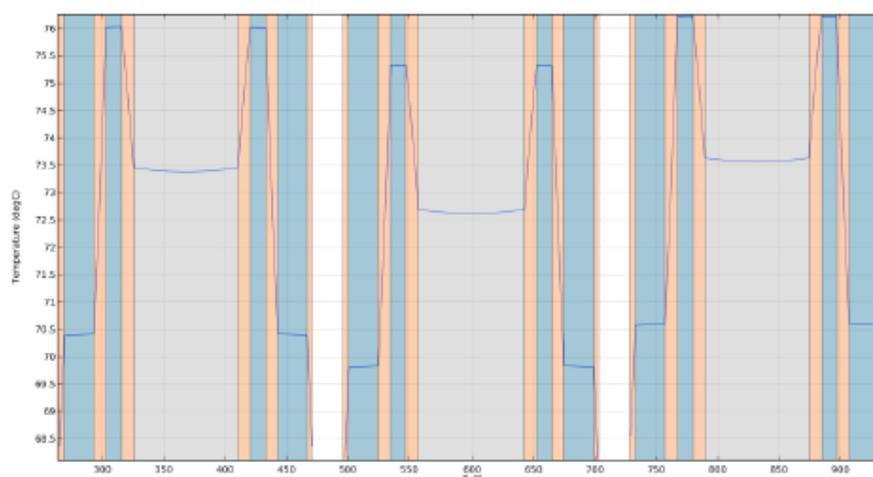


Рис.11. Распределение температуры трансформатора через время $t=9$ ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник)

Fig.11. Transformer temperature distribution after time $t=9$ hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

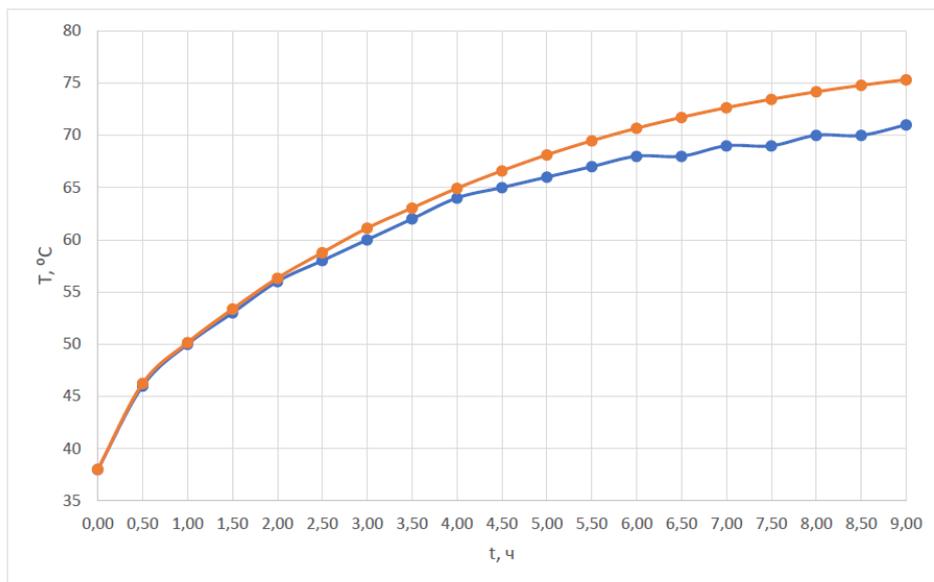


Рис.12. Изменение температуры обмотки НН фазы «В» в течение 9 часов (COMSOL – оранжевая кривая; испытание – синяя кривая)

Fig.11. Change in the temperature of the LV winding of phase “B” for 9 hours (COMSOL - orange curve; test - blue curve)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, верификация численной модели проведена успешно.

Изоляция исследуемого трансформатора ТЛС-25/10/0,4 соответствует классу нагревостойкости F , что означает, что при длительной работе температура не должна превышать $155\text{ }^\circ\text{C}$. Для анализа тепловых характеристик была проведена серия опытов, при которых изменяли ток в обмотках высшего напряжения. Результаты визуализированы в форме время-токовой характеристики и представлены на рисунке 12. Диаграмма показывает время, необходимое для достижения предельно допустимой температуры при различных значениях мощности. Эта информация позволяет оценить устойчивость трансформатора к перегрузкам, а также помогает в разработке эффективной стратегии эксплуатации для продления его срока службы. Полученные данные могут служить основой для дальнейших исследований и разработок в области улучшения тепловых характеристик трансформаторов с литой изоляцией.

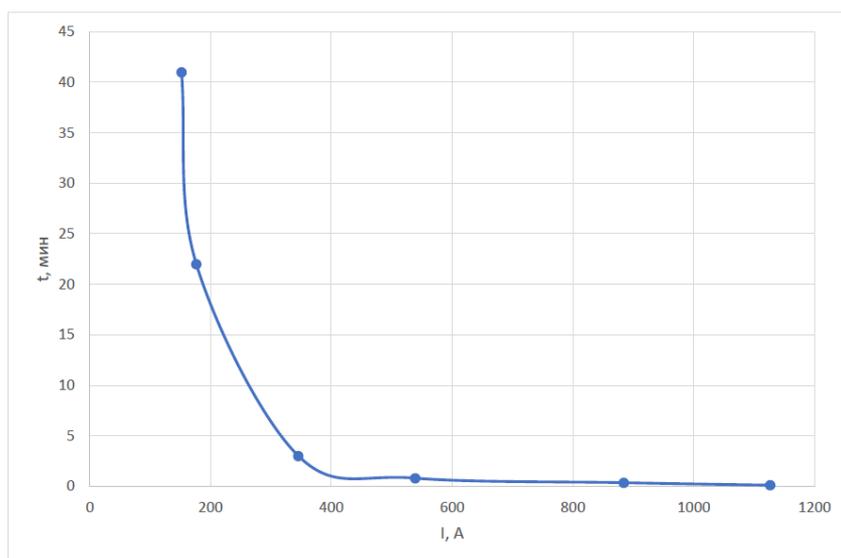


Рис.12. Время-токовая характеристика предельно допустимых режимов работы трансформатора

Fig.12. Time-current characteristics of the maximum permissible operating modes of the transformer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Феррорезонансные явления возникают в трехфазных сетях, когда линейные емкости и индуктивные элементы сети взаимодействуют с нелинейными индуктивностями, такими как обмотки силовых и измерительных трансформаторов, установленных на магнитопроводе определенной формы. В таких контурах феррорезонанс представляет собой нелинейный резонанс, который сопровождается значительными увеличениями напряжений на элементах цепи и токов в них [15].

Одна из ключевых причин феррорезонанса заключается в резком изменении индуктивной проводимости на землю одной из фаз во время переходных процессов. Также, избыточный заряд на емкостях сети может смещать нейтраль, что ведет к насыщению магнитопровода трансформатора на одной из фаз и создает заметную асимметрию фазных параметров относительно земли. Это смещение может усугубляться, приводя к длительно сохраняющемуся повышению напряжения в нейтрали сети [16].

Рассматривалось возникновение резонансных явлений в сети, включающей однофазный силовой трансформатор. Проведение анализа электромагнитных процессов в условиях резонанса в такой сети способствует выявлению причин повреждений в трехфазном силовом трансформаторе. Эксперимент планируется проводить с разомкнутой вторичной обмоткой. Схема сети, предназначенной для исследования, представлена на рисунке 13.

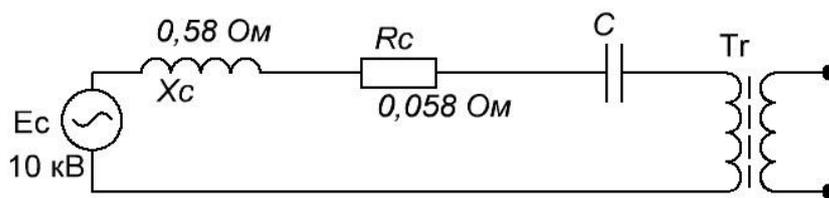


Рис.13. Расчетная схема сети

Fig.13. Program operation algorithm

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследование однофазного трансформатора проводилось с использованием численной модели, созданной в программе EMTP. С помощью данной модели определялось резонансное значение емкости внешней сети. На осциллограмме, определенной на рисунке 14, показан переходный процесс сети при возникновении феррорезонанса. В этом режиме пиковое значение тока в обмотке ВН достигает 15 А, а кратность перенапряжения составляет 2,6.

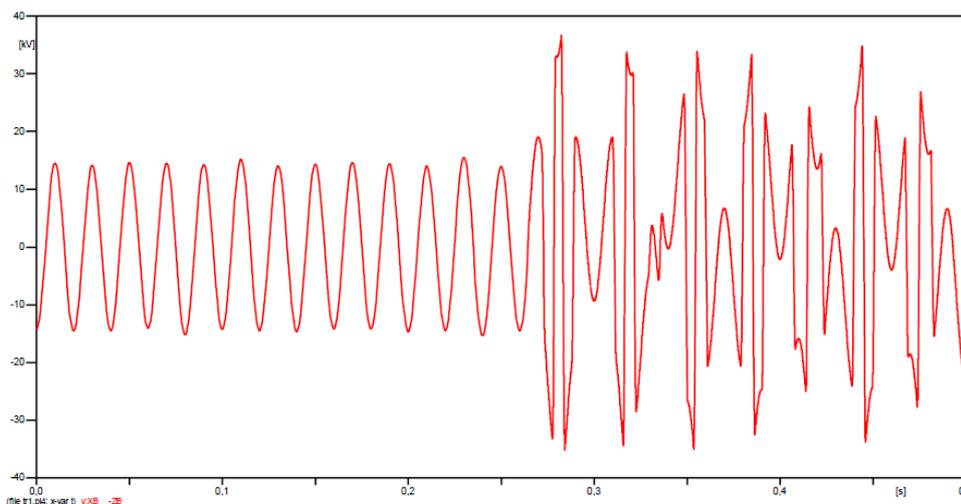


Рис.14. Осциллограммы напряжения обмотки ВН

Fig.14. Voltage oscillograms of the HV winding

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании значения емкости, полученного в программе EMTP, осуществляется численное моделирование данного режима в программе COMSOL. Из-за сложности вычислений и ограничения вычислительных ресурсов было принято решение ограничить время расчета до 0,1 секунды.

На осциллограммах рисунков 15 и 16 проиллюстрировано, что пиковое значение тока составило 13,5 А, а кратность перенапряжения – 2,4, что совпадает с результатами, полученными при расчете в EMTP.

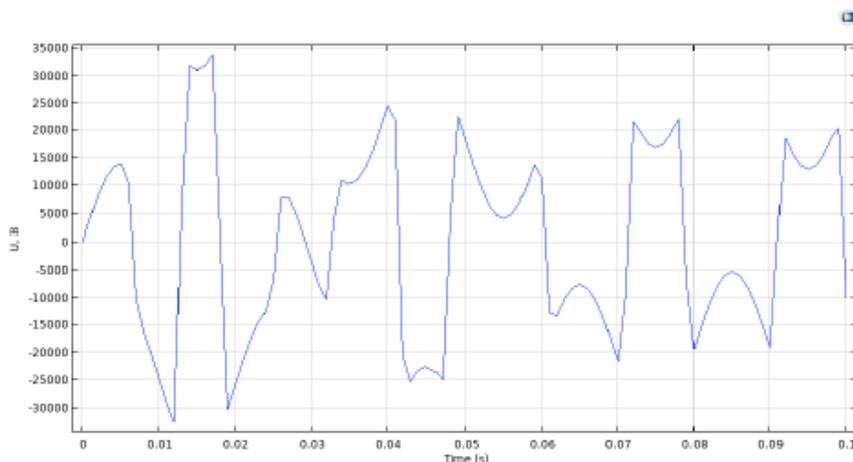


Рис.15. Осциллограмма тока обмотки ВН

Fig.15. Oscillogram of HV winding current

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

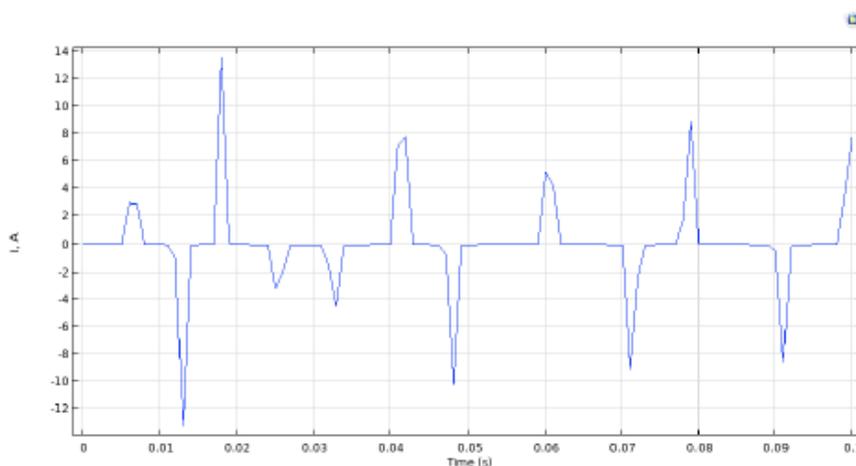


Рис.16. Осциллограмма напряжения обмотки ВН

Fig.16. Voltage oscillogram of the HV winding

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На графике, представленном на рисунке 17, показано изменение температуры обмотки высокого напряжения за короткий промежуток времени в 0,1 секунды. За этот период температура обмотки увеличилась всего на 0,0012 °С. Такое незначительное увеличение температуры можно объяснить малым временем наблюдения и кратковременными импульсами тока, протекающего через обмотку. Поскольку нагрев трансформатора происходит по экспоненциальному закону то, для определения времени, достаточного для возникновения повреждения при данном режиме, можно использовать метод экспоненциальной экстраполяции графика изменения температуры, как показано на рисунке 16.

При построении прогнозной кривой нужно учесть, что в случае продолжительного воздействия режима нагрева температура будет увеличиваться экспоненциально и достигнет критических значений, если режим сохранится достаточно долго. Это позволит определить, какое время существования режима может быть предельным для трансформатора и потребует вмешательства для предотвращения перегрева. Постоянная времени нагрева, описывающая инерционность процесса теплопередачи, является ключевым параметром для этой оценки, поскольку она указывает на скорость достижения температуры предела нагревостойкости изоляции. Задание постоянной времени нагрева необходимо для точного расчета предельно допустимой продолжительности воздействия подобных режимов, что поможет в разработке эффективных защитных мер для управления тепловыми рисками в работе трансформатора. Постоянная времени нагрева определяется по формуле (5):

$$\tau_{\text{тепл}} = \frac{G \cdot c}{k \cdot F} = \frac{V_{\text{вн}} \cdot \rho \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot (r_4 \cdot K_2 + r_3 \cdot K_1)} = 2318 \text{ c} \quad (5)$$

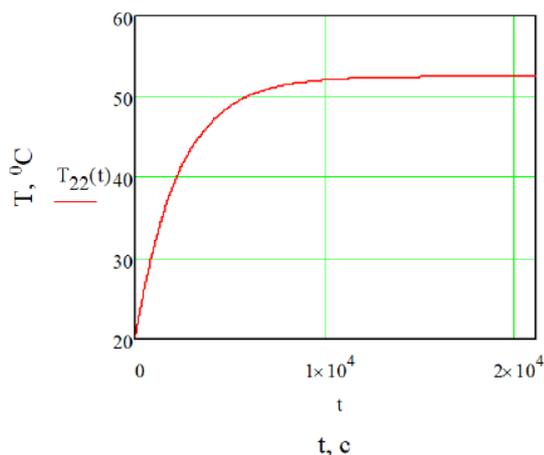


Рис.17. График изменения температуры обмотки ВН Fig.17 Program operation algorithm

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Предельно допустимая температура для изоляции обмоток класса нагревостойкости F составляет $155\text{ }^{\circ}\text{C}$, а установившееся значение температуры в данном режиме соответствует $53\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что выход из строя однофазного трансформатора ввиду его перегрева в таком режиме невозможен. Однако, данный вывод был сделан из условия, что начальная температура обмотки составляет $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На самом деле, рабочая температура обмотки ВН трансформатора в номинальном режиме составляет $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. К тому же, при последовательном возникновении нескольких аварийных режимов обмотка трансформатора может иметь температуру значительно выше в момент феррорезонанса, что может привести к большему перегреву. Например, возникновение КЗ длительностью 1 с может привести к нагреву обмотки на $16\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим возможный вариант развития событий:

1) Трансформатор работает в номинальном режиме, температура обмотки ВН составляет $33\text{ }^{\circ}\text{C}$;

2) В сети возникает КЗ длительностью 1 с , температура обмотки ВН увеличивается до $49\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3) После отключения КЗ трансформатор переходит в режим ХХ, в котором возникает феррорезонанс.

Используя формулу (6), можно оценить температуру обмотки при таком развитии событий.

$$\theta = \frac{I^2 \cdot R}{k \cdot F} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot F}{G \cdot c}} \right) \quad (6)$$

Трансформатор достигнет установившегося значения температуры $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ за $1,6$ часа работы. При этом проводится анализ поведения изоляции в режиме феррорезонанса в сети с трехфазным силовым трансформатором. В результате моделирования выявлено, что наличие дополнительной пары обмоток в трехфазном трансформаторе способствует повышению температуры в различных его частях по сравнению с однофазным трансформатором. Для упрощения расчета в этом исследовании несинусоидальный ток в обмотке высокого напряжения заменяется на синусоидальный ток, который имеет эквивалентное тепловое воздействие. Для реализации этой замены необходимо определить среднее значение тепловой мощности, выделяемой в обмотке высокого напряжения в течение времени расчета. Расчёт производится с использованием встроенных функций моделирования в программе *COMSOL*. В результате получено, что среднее значение тепловой мощности составляет 291 Вт .

Далее, чтобы продолжить анализ, определим действующее значение синусоидального тока по формуле (7), который окажет эквивалентное тепловое воздействие. Эта величина позволит нам моделировать реальный тепловой эффект на обмотку, что важно для корректного определения режима работы трансформатора при воздействии феррорезонанса.

$$I_{BH} = \sqrt{\frac{P_{cp}}{R_{BH}}} = 3,1\text{ A} \quad (7)$$

Режим феррорезонанса оказывает значительное влияние на тепловые характеристики трансформатора, сравнимое с работой при двухкратной перегрузке по току от номинального значения ($\approx 2 \times I_{\text{ном}}$). Это подчеркивает необходимость тщательного анализа и учета таких режимов в проектировании и эксплуатации трансформаторного оборудования.

Следующим этапом исследования явилось рассмотрение ситуации возникновения феррорезонанса в фазе «В» после устранения однофазного замыкания на землю. Начальная температура в этом случае составляет 38 °С, а вторичная обмотка трансформатора находится в разомкнутом состоянии. В результате установившееся значение температуры обмотки высокого напряжения фазы «В» достигает около 69 °С, что иллюстрируется на рисунке 18. Спустя 1,5 часа работы в таком режиме температура трансформатора снижается до 58 °С, как показано на рисунке 19. Эти колебания температуры свидетельствуют о значительном воздействии феррорезонанса на тепловые параметры устройства. Важно учитывать, что такие изменения могут привести к повышенному старению изоляции и снижению надежности трансформатора, что подчеркивает необходимость разработки мер по предотвращению и контролю подобных режимов. В таких случаях необходима установка температурных датчиков и систем мониторинга, которые способны своевременно обнаруживать и предупреждать о перегреве, а также использование автоматического вспомогательного охлаждения.

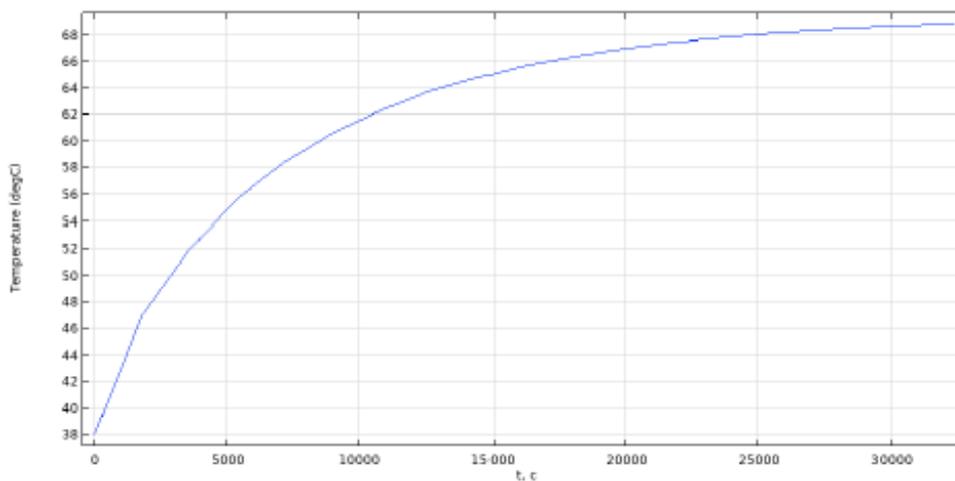


Рис.18. График изменения температуры обмотки ВН Fig.18. HV winding temperature change graph
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

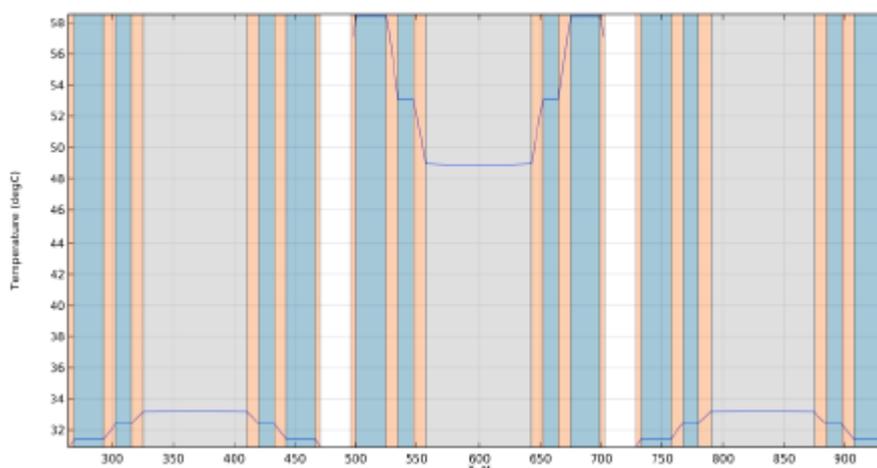


Рис.19. Распределение температуры трансформатора через время t=9 ч (оранжевый – изоляция; синий – обмотка; серый – сердечник) Fig.19. Transformer temperature distribution after time t=9 hours (orange – insulation; blue – winding; gray – core)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При возникновении сценария, описанного для однофазного трансформатора, температура обмотки ВН фазы «В» возрастет до 82°С за 2,5 ч (рис. 20).

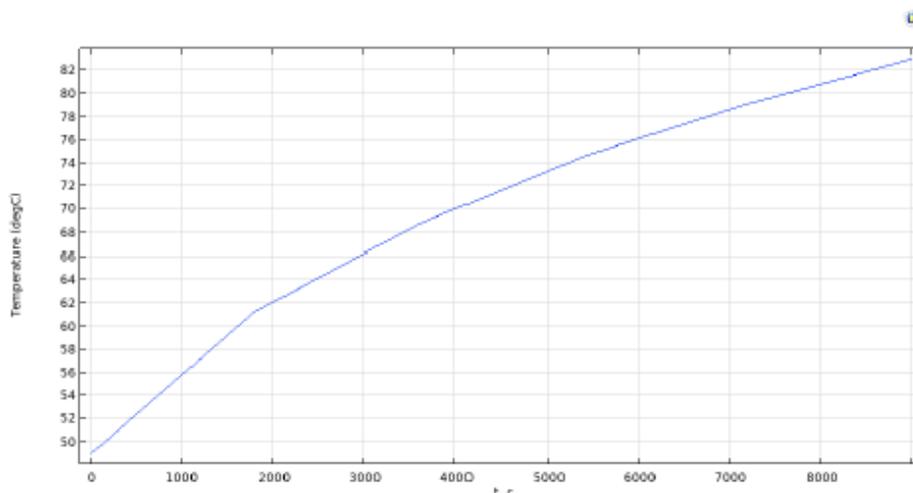


Рис.20. График изменения температуры обмотки ВН фазы «В» трансформатора

Fig.20. Graph of changes in the temperature of the HV winding of phase “B” of the transformer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение или Выводы (Conclusions)

Особенностью конструкции трансформатора с литой изоляцией ТЛС-25 10/0,4 Д/Ун-11 является наличие твёрдой компаундной «рубашки», которая, в отличие от масляной изоляции, слабо приспособлена к перегрузкам. Длительно существующие в электрической сети аварийные режимы, например феррорезонанс, сопровождаются увеличением рабочих токов в обмотках высшего напряжения и могут привести к перегреву и тепловому повреждению изоляции трансформатора.

Анализ переходных и установившихся режимов в сети и их влияния на нагрев сухого трансформатора в программном комплексе *COMSOL* была разработана численная модель трансформатора ТЛС-25 10/0,4 Д/Ун-11. Методика создания численной модели основана на задании полной геометрии трансформатора на основе данных производителя и задании уравнений и граничных условий для описания необходимых физических законов, по которым модель будет работать.

Результаты расчётов показали, что наличие в сети феррорезонанса может привести к тепловому повреждению изоляции. Такое возможно при возникновении феррорезонанса после отключения значительного возмущения в сети, например трёхфазного КЗ. При этом, в случае предварительного нагрева трансформатора до 49 °С, температура обмоток может увеличиться до 82 °С за 2,5 ч. Несмотря на то, что изоляция трансформатора относится к классу нагревостойкости *F* и имеет предельно допустимую температуру работы 155 °С, старение изоляции компаунда вследствие множественных перегрузок может привести к изменению свойств материала и снижению допустимой температуры.

Литература

1. Кузьмин И., Шувалов С. Зарубежный опыт эксплуатации сухих силовых трансформаторов до 72, 5 кВ //Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – №. S4. – С. 14-17.
2. Гандымов А. М. Экономия электрической энергии за счет замены трансформаторов масляной изоляцией на сухие //Перспективы развития науки в современном мире. – 2021. – С. 60-64.
3. Вариводов В. Н. и др. Особенности применения литой эпоксидной изоляции и композиций на ее основе для высоковольтного оборудования //Электричество. – 2024. – №. 10. – С. 67-75.
4. Воронкина А. Н., Мясоедова М. А. Краткий обзор основных неисправностей силовых трансформаторов в условиях эксплуатации //Электроэнергетика сегодня и завтра. – 2023. – С. 142-144.
5. Громько И. Л., Мирош Д. В., Галушко В. Н. Диагностирование параметров качества изоляции обмоток трансформаторов при ее увлажнении. – 2022.
6. Вафин Д. Б., Шайхиев И. М. Опыт замены масляного трансформатора сухим трансформатором в условиях нефтехимического производства //Евразийское Научное Объединение. – 2021. – №. 5-1. – С. 27-28.
7. Волчанина М. А., Курманов Р. С., Кузнецов А. А. Моделирование тепловых характеристик силового трансформатора при переменной токовой нагрузке //Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности. – 2022. – С. 170.
8. Сарсенов А. У. Моделирование электродинамических и тепловых режимов силовых трансформаторов для оценки эффективности надежности эксплуатации //Энергетика и энергосбережение: теория и практика. – 2020. – С. 254-1-254-4.

9. Бапфутвабо Л., Кубарев А.Ю., Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Гарифуллин М.Ш. Исследование характеристик поверхностных частичных разрядов на границе раздела воздух/стекло между металлическими электродами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 3 (63). С. 35- 43.

10. Choudhary K. 3D modelling and finite element analysis of three phase transformer with integrated inductors in COMSOL Multiphysics. – 2020.

11. Khaleel D., Tang X., Abu-Zaher M. Advanced Simulation and Empirical Validation of High-Efficiency Induction Heating System Via COMSOL Multiphysics //2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). – IEEE, 2024. – С. 2912-2917.

12. Basova A. V. et al. 2D&3D models for numerical calculation of electric fields in high-voltage transformers and reactors //Transformers Magazine. – 2024. – Т. 11. – №. 1. – С. 92-104

13. Yin Q. et al. Analysis and Treatment of a Partial Discharge Fault in a 220kV Transformer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2800. – №. 1. – С. 012020..

14. Yanjing Z. et al. Optimal Design of Dry-Type Air-Core Shunt Reactor Structure Based on Response Surface Method //Frontier Academic Forum of Electrical Engineering. – Springer, Singapore, 2025. – С. 605-613.

15. Ларин В. С., Зененко А. С., Фортальнов С. А. Перенапряжения на изоляции нейтрали сухих трансформаторов при импульсных испытаниях //Электричество. – 2024. – №. 2. – С. 11-17.

16. Гусев О. Ю., Гусев Ю. П., Южанин А. Е. Оценка термической стойкости трансформатора напряжения при броске тока намагничивания, вызванного однофазным замыканием на землю //Электричество. – 2024. – №. 8. – С. 36-41.

Авторы публикации

Балобанов Руслан Николаевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: rassel_ipek@mail.ru,

Булатова Венера Михайловна – канд. пед. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: bulatovavenera@mail.ru.

References

1. Kuz'min I., Shuvalov S. Zarubezhnyi opyt ekspluatatsii sukhikh silovykh transformatorov do 72, 5 kV //Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. – 2019. – №. S4. – S. 14-17.

2. Gandymov A. M. Ekonomiya elektricheskoi energii za schet zameny transformatorov maslyanoi izolyatsiei na sukhie //Perspektivy razvitiya nauki v sovremennom mire. – 2021. – S. 60-64.

3. Varivodov V. N. i dr. Osobennosti primeneniya litoi epoksidnoi izolyatsii i kompozitsii na ee osnove dlya vysokovol'nogo oborudovaniya //Elektrichestvo. – 2024. – №. 10. – S. 67-75.

4. Voronkina A. N., Myasoedova M. A. Kratkii obzor osnovnykh neispravnostei silovykh transformatorov v usloviyakh ekspluatatsii //Elektroenergetika segodnya i zavtra. – 2023. – S. 142-144.

5. Gromyko I. L., Mirosh D. V., Galushko V. N. Diagnostirovanie parametrov kachestva izolyatsii obmotok transformatorov pri ee uvlazhnenii. – 2022.

6. Vafin D. B., Shaikhiev I. M. Opyt zameny maslyanogo transformatora sukhim transformatorom v usloviyakh neftekhimicheskogo proizvodstva //Evraziiskoe Nauchnoe Ob"edinenie. – 2021. – №. 5-1. – S. 27-28.

7. Volchanina M. A., Kurmanov R. S., Kuznetsov A. A. Modelirovanie teplovykh kharakteristik silovogo transformatora pri peremennoi tokovoi nagruzke //Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti. – 2022. – S. 170.

8. Sarsenov A. U. Modelirovanie elektrodinamicheskikh i teplovykh rezhimov silovykh transformatorov dlya otsenki effektivnosti nadezhnosti ekspluatatsii //Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika. – 2020. – S. 254-1-254-4.

9. Bapfutvabo L., Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Boboev Sh.A., Garifullin M.Sh. Issledovanie kharakteristik poverkhnostnykh chastichnykh razryadov na granitse razdela vozdukh/steklo mezhdu metallichesкими elektrodami // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2024. Т. 16. № 3 (63). S. 35- 43.

10. Choudhary K. 3D modelling and finite element analysis of three phase transformer with integrated inductors in COMSOL Multiphysics. – 2020.

11. Khaleel D., Tang X., Abu-Zaher M. Advanced Simulation and Empirical Validation of High-Efficiency Induction Heating System Via COMSOL Multiphysics //2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). – IEEE, 2024. – S. 2912-2917.

12. Basova A. V. et al. 2D&3D models for numerical calculation of electric fields in high-voltage transformers and reactors //Transformers Magazine. – 2024. – Т. 11. – №. 1. – S. 92-104

13. Yin Q. et al. Analysis and Treatment of a Partial Discharge Fault in a 220kV Transformer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2800. – №. 1. – S. 012020..

14. Yanjing Z. et al. Optimal Design of Dry-Type Air-Core Shunt Reactor Structure Based on Response Surface Method //Frontier Academic Forum of Electrical Engineering. – Springer, Singapore, 2025. – S. 605-613.

15. Larin V. S., Zenenko A. S., Fortal'nov S. A. Perenapryazheniya na izolyatsii neutrali sukhikh transformatorov pri impul'snykh ispytaniyakh //Elektrichestvo. – 2024. – №. 2. – S. 11-17.

16. Gusev O. Yu., Gusev Yu. P., Yuzhanin A. E. Otsenka termicheskoi stoikosti transformatora napryazheniya pri broске toka namagnichivaniya, vyzvannogo odnofaznym замыканием на zemlyu //Elektrichestvo. – 2024. – №. 8. – S. 36-41.

Authors of the publication

Ruslan N. Balobanov– Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Venera M. Bulatova– Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика».

Получено **10.01.2025 г.**

Отредактировано **05.02.2025 г.**

Принято **15.02.2025 г.**