

УДК 629.039.58

*Запорожец К.А.,  
студент*

*5 курс, факультет «Энергетический»  
Ростовский государственный университет путей сообщения  
Россия, г. Ростов-на-Дону*

*Долина А.С.,  
студент*

*5 курс, факультет «Энергетический»  
Ростовский государственный университет путей сообщения  
Россия, г. Ростов-на-Дону*

*Боровинская О.Н.,  
студент*

*5 курс, факультет «Энергетический»  
Ростовский государственный университет путей сообщения  
Россия, г. Ростов-на-Дону*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*Аннотация: Результаты анализа данных по аварийности силовых трансформаторов свидетельствуют о том, что одной из основных причин их отказов является снижение диэлектрической прочности изоляции. Для снижения отказов и увеличения срока службы силовых трансформаторов в эксплуатации становится актуальным вопрос совершенствования методик оценки состояния их внутренней изоляции. В настоящее время при выборе основной изоляции трансформаторов учитывают зависимость диэлектрической прочности масляного канала от его ширины. Специалисты обсуждают вопросы, связанные с выбором основной изоляции, принимая во*

*внимание влияние обобщенного фактора - объема маслопропускной способности. Решение этой проблемы во многом зависит от изучения статистических характеристик диэлектрической прочности маслопроводов различного объема и влияния на них номинальных параметров трансформаторов. Эффективность применения таких диагностических характеристик зависит от объема имеющихся по ним исследований и установления их стандартизированных параметров. В статье предложена методика оценки изменения объема трансформаторного масла в напряженных маслопроводах главной изоляции высоковольтных силовых трансформаторов. Показано, что степень влияния технических параметров трансформатора на статистические характеристики диэлектрической прочности маслопроводов зависит от качества трансформаторного масла, которое подвергается изменению в условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** *силовые трансформаторы; изоляция трансформаторов; диагностические характеристики; объем трансформаторного масла; масляные каналы; метод оценки изменений.*

**Annotation:** *The results of the analysis of data on the accident rate of power transformers indicate that one of the main reasons for their failures is a decrease in the dielectric strength of insulation. In order to reduce failures and increase the service life of power transformers in operation, the issue of improving methods for assessing the state of their internal insulation becomes urgent. Currently, when choosing the main insulation of transformers, the dependence of the dielectric strength of the oil channel on its width is taken into account. Experts discuss issues related to the choice of the main insulation, taking into account the influence of a generalized factor - the volume of oil transmission capacity. The solution to this problem largely depends on the study of the statistical characteristics of the dielectric strength of oil pipelines of various volumes and the influence of nominal parameters of transformers on them. The effectiveness of the use of such diagnostic characteristics depends on the volume of available studies on them and the*

*establishment of their standardized parameters. The article proposes a method for estimating the change in the volume of transformer oil in stressed oil pipelines of the main insulation of high-voltage power transformers. It is shown that the degree of influence of the technical parameters of the transformer on the statistical characteristics of the dielectric strength of oil pipelines depends on the quality of transformer oil, which is subject to change in operating conditions.*

***Key words:** power transformers; isolation of transformers; diagnostic characteristics; volume of transformer oil; oil channels; method of assessing changes.*

## **1. Введение**

Энергетические компании, проводя техническую политику, связанную с обеспечением эффективной работы оборудования [1] в условиях цифровой трансформации энергетики [2,3], предъявляют все более высокие требования к надежности силовых трансформаторов [4]. В настоящее время трансформаторы должны иметь срок службы не менее 30 лет и гарантийный срок не менее 5 лет со дня ввода в эксплуатацию, при этом они не должны иметь капитальный ремонт и допрессовку обмоток в течение всего срока эксплуатации. срок службы.

Для обеспечения надежности и продления срока службы силовых трансформаторов [6], как новых, так и давно находящихся в эксплуатации, важно выяснить влияние комплекса влияющих факторов. Выводы анализа данных об авариях в силовых трансформаторах свидетельствуют о том, что одной из основных причин отказов является снижение диэлектрической прочности трансформаторного масла в процессе эксплуатации, являющегося как внутренней изоляцией, так и охлаждающей средой. Достаточно часто отказы приводят к воспламенению трансформаторного масла с последующим пожаром и взрывом. Для удовлетворения растущей потребности в надежности

энергосистем проводятся работы по созданию и внедрению в энергетику новых трансформаторов с улучшенными характеристиками [4].

Согласно данным, представленным в [5], в России наиболее частые аварии трансформаторов происходят из-за внутренних коротких замыканий в изоляции, в высоковольтных вводах и устройствах РПН. Зарегистрировано более 250 несчастных случаев из-за повреждения этих функциональных узлов.

Следует отметить, что применение современных терминалов дифференциальной защиты трансформаторов на базе систем искусственного интеллекта от внешних коротких замыканий позволяет значительно сократить время срабатывания защиты до 0,5 периода, что заметно снижает последствия повреждения. Однако повреждаемость трансформаторов из-за нарушения диэлектрической прочности изоляции по-прежнему высока.

Оценка диэлектрической прочности изоляции и разработка мероприятий по своевременному техническому вмешательству позволит перейти на эксплуатацию трансформаторов по риску отказа [1] с учетом ранжирования состояния по результатам осмотра.

## **2. Обзор литературы и постановка проблемы**

С увеличением номинального напряжения силовых трансформаторов возрастают требования к надежности масляной изоляции. Это подтверждается тем, что нормативный документ предполагает определение среднего напряжения пробоя трансформаторного масла как диагностического параметра, характеризующего техническое состояние масляной изоляции с учетом номинального класса напряжения оборудования. Согласно нормативным документам напряжение пробоя определяют в штатном разряднике.

В то же время в нормативных документах не определено влияние номинальной мощности силовых трансформаторов на диэлектрическую прочность масляной изоляции. Увеличение мощности трансформатора при заданном номинальном напряжении влечет за собой увеличение диаметра

стержня сердечника, что приводит к увеличению размеров электроизоляционной конструкции внутри бака трансформатора и трансформатора в целом.

Трансформаторы с одинаковой номинальной мощностью могут иметь разные классы номинального напряжения. Это свидетельствует о том, что трансформаторы с одинаковым номинальным напряжением, но разной мощностью, и наоборот, имеют существенные различия в габаритных размерах. Увеличение габаритных размеров изоляционных конструкций увеличивает стоимость силовых трансформаторов, у которых стоимость изоляционных конструкций, включая трансформаторное масло, составляет 15-20 % от стоимости всего трансформатора.

Увеличение габаритных размеров трансформатора с ростом его мощности сопровождается увеличением объема трансформаторного масла в баке. С увеличением объема масла диэлектрическая прочность масляной изоляции снижается, что связано с вероятностным характером образования пробоя в масле. С увеличением объема масла возрастает вероятность появления элемента с низкой диэлектрической прочностью, что приводит к снижению прочности масла данного объема. Это указывает на то, что объем масла действует как обобщенный влияющий фактор, который при его увеличении снижает диэлектрическую прочность. Наиболее существенное процентное снижение прочности масла отмечается для масел, содержащих повышенное количество примесей. Наличие примесных частиц определяет статистический характер образования пробоя масла. Следовательно, снижение пробивной прочности с увеличением объема масла определяется статистическими закономерностями развития пробоя масла [3].

Это в полной мере относится и к основной изоляции силовых трансформаторов.

Основной изоляцией силовых трансформаторов является масляная изоляция между: обмотками и сердечником; обмотки одного стержня

сердечника на всю высоту обмоток; обмотки соседних стержней сердечника (между фазами); обмотки и стенки бака. В практике, принятой в этой стране, основная изоляция относится к маслобарьерному типу, состоящему из чередующихся масляных каналов и барьеров из картона.

Экспериментальные исследования показывают, что при приложении к основной изоляции переменного и импульсного напряжения наибольшие значения напряженности электрического поля имеют место в масляном переходе между высоковольтной обмоткой и барьером, где возникают частичные разряды с интенсивностью от  $10^{-7}$  до  $10^{-6}$  С и более. Этот проход называется первым масляным проходом [3]. Его пробой приводит к необратимому повреждению пресс-карты, что в зависимости от интенсивности частичных разрядов приводит к разряду по поверхности пресс-карты или внутри нее, а в дальнейшем возможен полный пробой изоляции. При эксплуатации и испытаниях оборудования возникновение таких повреждений недопустимо. Поэтому диэлектрическая прочность маслобарьерной изоляции определяется прочностью первого прохода масла.

Методы выбора основной изоляции трансформаторов в настоящее время основываются на результатах экспериментального определения пробойной прочности трансформаторного масла на моделях [4]. Исследования диэлектрической прочности маслобарьерной изоляции проводятся при различной ширине прохода масла, что характерно для реальных силовых трансформаторов [3]. Для сравнения допустимых прочностей, полученных на моделях маслобарьерной изоляции трансформаторов, с расчетными значениями, в современных методиках используются зависимости между минимальной пробойной прочностью и шириной масляного канала, примыкающего к обмотке ВН, при различных электрических воздействиях. По эмпирическим формулам определяют зависимость прочности на разрыв масляного канала от его ширины.

Исследования диэлектрической прочности трансформаторного масла, однако, как указывалось выше, позволили установить, что величина пробивной прочности зависит не только от ширины масляного канала, но и от площади электродов. В то же время существующие методы выбора основной изоляции трансформаторов учитывают влияющие факторы лишь косвенным введением постоянного поправочного коэффициента.

Таким образом, совершенствование существующих методик и создание новых методик оценки состояния и анализа основной изоляции силовых трансформаторов в настоящее время является актуальной задачей.

В соответствии с установленными характеристиками методов электрических испытаний электроизоляционных жидких материалов [2] предполагается, что для оценки состояния трансформаторного масла следует определять статистический коэффициент вариации, характеризующий изменение пробивного Напряжения:

$$V = \frac{\sigma_u \cdot 100}{\langle U \rangle_{br}}$$

where  $\sigma_u$  среднеквадратическая ошибка среднего арифметического напряжения пробоя (стандартное отклонение);  $\langle U \rangle_{br}$  среднее арифметическое напряжения пробоя.

Согласно стандарту [2] предельное значение коэффициента вариации составляет 20 %, что значительно превышает значения для технически чистых минеральных масел, которые достигают значений 10–15 %. Механизм пробоя трансформаторного масла носит статистический характер, и если коэффициент вариации превышает эти статистические значения, это свидетельствует о снижении качества трансформаторного масла, а значит, и об ухудшении его технического состояния.

Согласно исследованию [2], коэффициент вариации находится в диапазоне от 9% до 37% при доверительном уровне 95%, что означает, что разброс значений может быть еще больше.



Таким образом, использование нормированного значения коэффициента вариации, не имеющего научного обоснования, означает существенное ослабление требований к качеству трансформаторного масла в эксплуатации, что приводит к увеличению вероятности пробоя изоляции.

Коэффициент вариации является статистическим параметром напряжения пробоя. При повышенном разбросе напряжений пробоя трансформаторного масла возрастает вероятность пробоя [5] маслопроводов в изоляции трансформаторов при меньших значениях приложенного напряжения, что приводит к снижению технического состояния и эксплуатационной надежности трансформаторов. трансформаторы.

В стандартном испытании [3] приведен метод определения величины разности максимального  $U_{max}$  и минимального  $U_{min}$  напряжения пробоя для каждой взятой пробы масла, умноженной на три, как статистической характеристики диэлектрической прочности масла. Полученный таким образом результат должен быть меньше минимального напряжения пробоя.

Вышеуказанные нормы устанавливают разные значения статистических нормируемых параметров электрической прочности масла, а также не отражают особенностей влияния на электрическую прочность маслопроводов номинальной мощности и особенностей конструкции силовых трансформаторов.

Следует также отметить, что в настоящее время в научно-технической литературе мало внимания уделяется анализу результатов статистических характеристик пробивного напряжения трансформаторных масел в штатном ОПН, что затрудняет выбор разработать более обоснованные диагностические статистические характеристики диэлектрической прочности масла для силовых трансформаторов с учетом как их мощности, так и класса напряжения.

Таким образом, на основании изложенного необходимо исследовать и установить основные статистические характеристики диэлектрической



прочности трансформаторного масла в основных проходах изоляции для широкого диапазона номинальных технических параметров силовых трансформаторов. Для этого, опираясь на имеющийся опыт проектирования, необходимо разработать методику оценки статистических характеристик и подобрать для них такие диагностические параметры, которые обеспечивали бы требуемый уровень диэлектрической прочности основной изоляции в процессе эксплуатации.

На основании результатов испытаний и опыта эксплуатации установлено, что статистические характеристики напряжений пробоя масла являются параметрами нормального распределения случайной величины. Однако с увеличением объема масла в трансформаторе интегральная зависимость смещается в область отрицательных значений напряжения пробоя, что противоречит физическому смыслу этого процесса.

Третий предельный закон распределения крайних членов выборки, который имеет ограничения слева, нижний предел напряжения пробоя, успешно применяется при пересчете напряжений пробоя с малых образцов на большие. Это связано с тем, что пробой происходит в самом слабом месте масляной изоляции, где создаются более благоприятные условия для его развития. Следовательно, напряжения пробоя отражают распределение крайних членов образца. Все это указывает на то, что физический смысл образования пробоя в трансформаторном масле соответствует третьему предельному закону распределения крайних членов выборки. В прикладных работах, в том числе при определении диэлектрической прочности трансформаторного масла, это распределение известно как распределение Гнеденко–Вейбулла [3].

В исследованиях, посвященных определению статистических характеристик диэлектрической прочности с помощью трехпараметрического распределения Гнеденко–Вейбулла, модель большого объема трансформаторного масла рассматривается в виде  $m$  одинаковых

элементарных (единичных) объемов из масла, подключенного параллельно. На рис. 1 показан вид функции распределения пробивного напряжения для единичного объема  $m = 1$  и для произвольного объема  $m \gg 1$  трансформаторного масла.

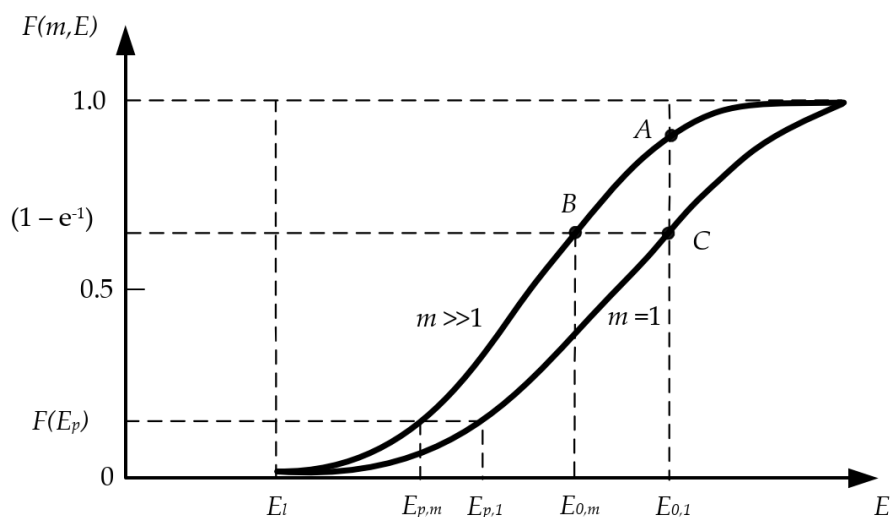


Рис. 1. Функция распределения напряжения пробоя для единицы объема  $m = 1$  и произвольного объема  $m \gg 1$  трансформаторного масла.

### Выводы

В работе проанализировано влияние на диэлектрическую прочность основной изоляции силовых трансформаторов различных габаритов и объема масла в зависимости от номинальных параметров мощности и класса напряжения.

Разработана методика расчета статистических характеристик электрической прочности масла в первом маслопроводе главной изоляции трансформаторов с учетом влияния мощности и класса напряжения трансформаторов, а также статистических параметров напряжения пробоя оригинального трансформаторного масла. На основе предложенного метода разработан последовательный алгоритм расчета статистических характеристик электрической прочности изоляции и определения расстояния между обмотками трансформатора высшего и низшего напряжения. Расчет статистических характеристик диэлектрической прочности масла с использованием трехпараметрического распределения Гнеденко–Вейбулла,

позволяющего учесть влияние объема масла для различных трансформаторов на номинальное напряжение 110 кВ при изменении их мощности от 105 до 108 ВА.

Определены статистические характеристики диэлектрической прочности трансформаторного масла с использованием трехпараметрического распределения Гнеденко–Вейбулла, позволяющего учесть влияние объема масла.

### **Использованные источники:**

1. Баширов М.Г. Диагностика электрических сетей и электрооборудования промышленных предприятий: Учеб. пособие для вузов / М.Г. Баширов, В.Н. Шикунов. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. - 220 с.
2. Баширов М.Г. Электротехнологические установки и электротехнические системы нефтегазового комплекса / М.Г. Баширов, А.С. Хисматуллин // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». - М.: Институт управления образованием Российской академии образования, 2015. - № 12. - С. 113.
3. Хисматуллин А.С. Новые методы охлаждения силовых масляных трансформаторов / А.С. Хисматуллин, И.М. Гареев // Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения. - Уфа: УГНТУ, 2015. - С. 290-292.
4. Хисматуллин А.С. Эффективное охлаждение масляных трансформаторов / А.С. Хисматуллин, А.М. Янчурина, А.С. Климкович // Современные тенденции развития науки и технологий. - Белгород: Из-во «Индивидуальный предприниматель Ткачева Екатерина Петровна», 2015. - № 1-2. - С. 135-136.
5. Салиева Л.М. Хроматографический метод оценки технического состояния силовых и масляных трансформаторов / Л.М. Салиева, И.Ф. Зайнакова, И.Г.

Хуснутдинова и др. // Экологические системы и приборы. - М.: Научтехлитиздат, 2015. - № 12. - С. 35-41.

6. Хорошев Н.И. Оценка технического состояния силового маслonaполненного электротехнического оборудования в различных режимах его работы // Известия ТПУ. 2013. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-silovogo-maslonapolnennogo-elektrotehnicheskogo-oborudovaniya-v-razlichnyh-rezhimah-ego-raboty> (дата обращения: 02.06.2023).