

УДК 621.321

Ольга Сергеевна Мельникова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Владимир Сергеевич Кузнецов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: vldmirk@ya.ru

Метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов

Авторское резюме

Состояние вопроса. К числу наиболее повреждаемых узлов силовых трансформаторов относится главная изоляция маслябярного типа. Нарушение такой изоляции происходит в результате пробоя масляного канала вблизи обмотки высшего напряжения. В соответствии с традиционными методиками расчета электрической изоляции, значение пробивной напряженности определяется с помощью эмпирических формул в зависимости от выбранной ширины канала. В существующих методиках не учитываются влияния объема канала, статистических характеристик прочности масла, конструктивных особенностей изоляции трансформаторов и не содержатся рекомендации по созданию расчетных моделей. В связи с этим актуальным является повышение точности расчета путем разработки метода оценки электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов с учетом объема и параметров распределения пробивной напряженности масла, особенностей конструкции.

Материалы и методы. Использованы результаты исследований пробивной напряженности в масляных каналах с различным объемом масла. Для повышения точности расчета и с учетом особенностей конструкции модель главной изоляции силовых трансформаторов выполнена в программе ANSYS с учетом граничных условий и с допущением линейного распределения напряжения по обмоткам трансформатора.

Результаты. Предложен метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов с учетом объема и параметров распределения пробивной напряженности масла. В отличие от существующих методов, при расчете минимальной пробивной напряженности в модели главной изоляции учтены конструктивные особенности силовых трансформаторов и обоснованы допущения для повышения точности расчета. В соответствии с методикой выполнен расчет электрической прочности масла в масляном канале обмотки высшего напряжения и установлено, что по мере увеличения относительного значения пробивной напряженности электрическая прочность масляного канала уменьшается, что соответствует физическому смыслу формирования пробоя.

Выводы. Предложенный метод расчета электрической прочности трансформаторного масла может быть использован при выборе главной изоляции силовых трансформаторов в проектировании.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, трансформаторное масло, маслябярная изоляция, масляные каналы, главная изоляция, электрическая прочность, пробивная напряженность

Olga Sergeevna Melnikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the High-voltage Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Vladimir Sergeevich Kuznetsov

Ivanovo State Power Engineering University, Master student of the High-voltage Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: vldmirk@ya.ru

Method of calculating the electric strength of oil channels of the main insulation of power transformers

Abstract

Background. The most damage-sensitive unit of power transformers is the main insulation of the oil barrier type. The breakdown of such insulation occurs as a result of the breakdown of the oil channel near the high voltage winding. In accordance with traditional methods of calculating the dielectric strength of insulation, the value of the breakdown strength is determined by empirical formulas depending on the selected width of the oil channel. The existing methods do not consider the influence of the oil channel volume, of the electric strength the statistical characteristics of the oil, the design features of the insulation of power transformers, and do not contain recommendations for creating design models. Thus, to improve the calculation accuracy, it is relevant to develop the evaluation method of dielectric strength of the main insulation of power transformers taking into account the volume and parameters of the breakdown voltage distribution of transformer oil, design features

Materials and methods. The research results of the breakdown tension in oil channels with different volumes of transformer oil were used. To improve the accuracy of the calculation and taking into account the design features, the model of the main insulation of power transformers was made in the ANSYS program. Boundary data and assumption of linear stress distribution of transformer coils were considered.

Results. A method for calculating the dielectric strength of oil channels of the main insulation of power transformers, considering the volume and parameters of the breakdown voltage distribution of transformer oil was proposed. Unlike the existing methods, when calculating the minimum breakdown strength in the model of the main insulation, the design features of power transformers are taken into account and assumptions are justified to improve the accuracy of the calculation. In accordance with the methodology, the parameters of the dielectric strength of the transformer oil in the oil channel of the high voltage winding of the transformer were calculated. It was concluded that with increase of relative value of breakdown tension, dielectric strength of oil channel is decreasing, and it corresponds to physical sense of breakdown.

Conclusions. The method for calculating the dielectric strength of transformer oil can be used when choosing the main insulation of power transformers in design.

Key words: power transformers, transformer oil, oil barrier insulation, oil channels, main insulation, dielectric strength, breakdown voltage

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.048-055

Введение. Основной причиной отказов силовых маслонаполненных трансформаторов является снижение электрической прочности внутренней изоляции [1, 2]. Главная изоляция в полной мере относится к числу наиболее повреждаемых узлов внутренней изоляции [3]. Такая повреждаемость обусловлена конструктивными особенностями силовых трансформаторов, изоляция которых выполняется маслобарьерного типа и представляет собой чередование барьеров из электротехнического картона и масляных каналов.

Нарушение маслобарьерной изоляции происходит в результате пробоя масляного канала вблизи обмотки высшего напряжения. Электрическая прочность трансформаторного масла существенно меньше, чем у электротехнического картона, в связи с этим наибольшая напряженность электрического поля наблюдается именно в масляном канале. К повреждениям масляного канала приводят частичные разряды при интенсивности 10^{-7} – 10^{-6} Кл и

более, в результате которых происходят необратимые повреждения барьеров [4]. Поэтому пробой масляного канала обмотки ВН является критерием нарушения электрической прочности электроизоляционной конструкции силового трансформатора.

С ростом номинальных напряжения и мощности силовых трансформаторов повышаются требования к их изоляции. При одном и том же заданном номинальном напряжении мощность трансформатора может изменяться в широком диапазоне¹, и также стоит отметить обратное. Увеличение мощности при переходе на более высокие классы номинального напряжения приводит в значительной мере к возрастанию габаритов электроизоляционной конструкции [5], что влечет за собой увеличение габаритов трансформаторов и, соот-

¹ ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВА и более. Ряд номинальных мощностей: введ. 1979-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 4 с.

ветственно, объема трансформаторного масла в каналах главной изоляции. В этом случае важно отметить, что с ростом объема масла происходит снижение электрической прочности маслобарьерной изоляции [6]. Это обусловлено статистической природой формирования пробивных процессов в трансформаторном масле [7, 8].

Методы выбора главной изоляции трансформаторов в настоящее время основаны на результатах экспериментального определения пробивной напряженности трансформаторного масла на моделях [9, 10]. Исследования электрической прочности маслобарьерной изоляции проводят при различной ширине масляного канала, характерной для реальных силовых трансформаторов. Для сравнения допустимых напряженностей, полученных на моделях маслобарьерной изоляции трансформаторов, с расчетными значениями в действующих отечественных² и зарубежных методиках [11, 12, 13] используются зависимости минимальной пробивной напряженности от ширины масляного канала, прилегающего к обмотке ВН, при различных электрических воздействиях. Зависимость пробивной напряженности масляного канала $E_{м.к.пр}$ от его ширины $S_{м.к.}$ определяется с применением эмпирических формул:

$$E_{м.к.пр} = A/S_{м.к.}^{-0,37}, \quad (1)$$

$$E_{м.к.пр} = B + C/S_{м.к.}^{0,5}, \quad (2)$$

где A , B , C – эмпирические коэффициенты, зависящие от различных электрических воздействий.

В расчетах допустимой напряженности электрического поля при соответствующих испытательных воздействиях принимается

$$E_{доп. м.к.} = k_{\Gamma} E_{м.к. пр. мин}, \quad (3)$$

где $E_{м.к. пр. мин}$ – минимальная пробивная напряженность; k_{Γ} – коэффициент, учитывающий влияние различных факторов. Обычно значение этого коэффициента при расчетах принимается равным $k_{\Gamma} = 0,8-0,9$.

Однако исследования электрической прочности трансформаторного масла позволили установить, что значения пробивной напряженности зависит не только от ширины масляного канала, но и от площа-

ди электродов [14, 15]. Вместе с тем в существующих методиках выбора главной изоляции трансформаторов учет влияющих факторов осуществляется лишь косвенным введением постоянного поправочного коэффициента.

Таким образом, при выборе электрических характеристик маслобарьерной изоляции одним из направлений решения этой задачи можно рассматривать разработку метода определения электрической прочности трансформаторного масла для различных его объемов.

Метод расчета. Сложность при расчетах главной изоляции силовых трансформаторов заключается в том, что электрическое поле в масляных каналах является неоднородным.

Неоднородные электрические поля по коэффициенту неоднородности k_n разделяются на два вида [9]: слабонеоднородные и резко неоднородные. Коэффициент неоднородности рассчитывается по формуле

$$k_n = \frac{E_{max}}{E_{cp}}, \quad (4)$$

где E_{max} – максимальная напряженность электрического поля; E_{cp} – средняя напряженность электрического поля, определяемая по

$$E_{cp} = \frac{U}{S}, \quad (5)$$

где U – воздействующее напряжение; S – расстояние между электродами.

Принято считать, что слабонеоднородные электрические поля имеют место при коэффициентах неоднородности электрического поля $k_n < 2$. В случаях, когда $k_n \geq 4$, электрическое поле принято считать резко неоднородным. В слабо неоднородных полях происходит постепенное развитие разряда. То есть при таких электрических полях возникновение критических разрядов приводит к образованию разрядного канала, как и в случае однородного поля. Нарушение маслобарьерной изоляции в неоднородных электрических полях происходит вблизи электродов с наибольшей кривизной, где напряженность электрического поля максимальна.

Таким образом, следует отметить, что появление критических частичных разрядов в жидком диэлектрике приводит к полному пробоею промежутков в случае однородных и слабо неоднородных полей или к

² РТМ 16.800.853-81. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110–750 кВ. Методика расчета изоляции между обмотками. 1981.

постепенному электрическому старению под действием критических частичных разрядов для резко неоднородных полей.

Основываясь на рассмотренных выше физических процессах, ряд исследователей полагают [8], что образование критических разрядов в объеме масла происходит у электрода с максимальной напряженностью. С учетом этого объем масла оценивается как объем, расположенный между поверхностями с напряженностями, соответственно, E_{\max} и $0,9E_{\max}$, получивший название «напряженного объема» масла.

При расчетах главной изоляции в качестве объекта выбраны трехфазные двухобмоточные силовые трансформаторы с номинальным напряжением 110 кВ (рис. 1). Для таких трансформаторов удается сохранять принцип подобия конструкции электродов при широком диапазоне номинальных мощностей. Также стоит отметить, что число трансформаторов данного класса напряжения в электрических сетях, по сравнению с другими классами, достаточно велико. При этом рассматривается плоская стержневая система с концентрическим расположением обмоток, каналы между обмотками заполнены трансформаторным маслом.

Наибольшее значение напряженности, как отмечалось выше, имеет место в первом масляном канале вблизи обмотки ВН. Напряженный объем масла в первом масляном канале оценивается как объем, расположенный между поверхностями, соответствующими обмотке ВН, и первым барьером из электрокартона. Следующие результаты представлены для этого случая.

С учетом отмеченного выше и в соответствии с обозначениями на рис. 1

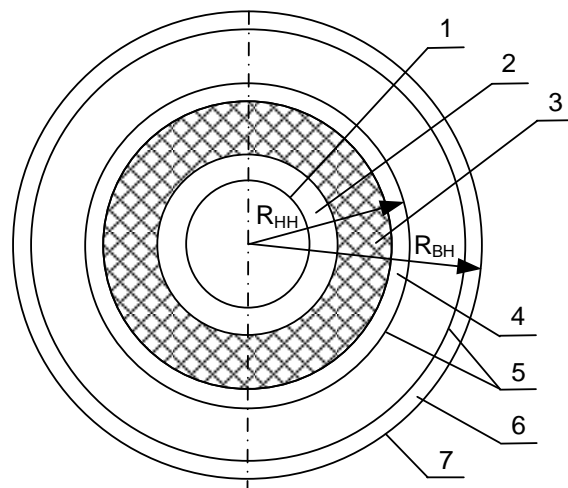


Рис. 1. Схема главной изоляции двухобмоточного силового трансформатора 110 кВ

объем масла в первом масляном канале обмотки ВН составляет

$$V_{\text{м.к.ВН}} = \pi H S_{\text{м.к.ВН}} (2 \cdot R_{\text{ВН}} - S_{\text{м.к.ВН}}). \quad (6)$$

В [16] для конструкции таких трансформаторов были получены выражения для определения основных размеров изоляции и объема масла в первом масляном канале с учетом минимальной пробивной напряженности:

$$V_{\text{м.к.ВН}} = \pi H S_{\text{м.к.ВН}} (1,02 \cdot 10^{-2} \times \\ \times 4 \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3 \cdot U_{\text{р}}}} \left(\frac{k_{\text{из}} U_{\text{расч}}}{k_{\text{Г}} E_{\text{м.к.прмин}}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}} \right) + \\ + 2 \cdot S_{\text{с-НН}} + 2,42 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}} + \frac{2 \cdot k_{\text{из}} U_{\text{расч}}}{k_{\text{Г}} E_{\text{м.к.прмин}}} - S_{\text{м.к.ВН}}), \quad (7)$$

где $S_{\text{м.к.ВН}}$ – ширина масляного канала обмотки ВН; $S_{\text{Н}}$ – номинальная мощность трансформатора; $U_{\text{расч}}$ – воздействующее испытательное напряжение; $k_{\text{из}} = 1,1-1,2$ – коэффициент, учитывающий влияние наличия барьеров и цилиндричности конструкции изоляции; $S_{\text{с-НН}}$ – толщина изоляции обмотки НН от стержня.

Как отмечалось выше, в соответствии с традиционными методиками расчета электрической прочности изоляции, значение минимальной пробивной напряженности определяется с помощью эмпирических формул (1), (2) в зависимости от выбранной ширины первого масляного канала без учета влияния объема и статистических характеристик электрической прочности масла и конструктивных особенностей изоляции силовых трансформаторов. А также традиционные методики не содержат рекомендаций по созданию расчетных моделей.

- 1 – стержень магнитопровода;
- 2 – толщина изоляции обмотки НН от стержня;
- 3 – обмотка низшего напряжения;
- 4 – масляный канал вблизи обмотки НН
- 5 – барьеры из электрокартона;
- 6 – масляный канал вблизи обмотки ВН
- 7 – обмотка высшего напряжения;

В настоящее время существуют программные комплексы, которые с достаточной точностью выполняют расчеты электрических полей высокого напряжения [17]. В основе программных комплексов лежит метод конечных элементов. Расчетная область разбивается на малые участки, называемые конечными элементами, в которых и происходит точечный расчет электрических характеристик. Однако для повышения точности расчета необходимо создание модели главной изоляции трансформатора с учетом конструктивных особенностей и статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла.

Расчет электрического поля главной изоляции сводится к расчету минимальной напряженности поля в первом масляном канале обмотки ВН. Силовые трансформаторы имеют достаточно сложную систему, состоящую из множества различных участков и элементов. Основными элементами являются обмотки с межвитковой изоляцией, цилиндрические барьеры и угловые шайбы из электрокартона, емкостные кольца, улучшающие конфигурацию электрического поля на краю обмотки, шайбы, прессующие кольца, различные прокладки и прошивные рейки, и все эти элементы должны быть представлены в расчетной модели.

Обмотки ВН силовых трансформаторов 110 кВ и выше состоят из катушек, содержащих несколько витков провода, обмотки НН выполняются винтовыми. Поэтому для обеспечения высокой точности расчета напряженностей электрического поля необходимо обмотки представить в виде прямоугольных катушек с учетом витковой изоляции.

Напряжение в обмотках распределяется неравномерно, в зависимости от электрических воздействий. В качестве расчетных принимаются наибольшие напряжения, воздействующие на участки главной изоляции при испытательных воздействиях. При испытаниях трансформатора рабочим и одноминутным напряжениями промышленной частоты имеет место практически линейное распределение напряжения по обмоткам. Поэтому в расчетной модели принимается допущение о линейном распределении потенциала на катушках обмотки при испытании рабочим напряжением.

В соответствии с результатами, полученными в [8], значение пробивной напряженности при различных объемах трансформаторного масла с заданными исходными характеристиками находится по выражению с применением распределения Гнеденко-Вейбулла:

$$E_{0,V_i} = E_n + \frac{E_{0,1} - E_n}{V_{\text{м.к.ВН}}^{1/\alpha}}, \quad (8)$$

где $E_{0,1}$ – величина пробивной напряженности единичного масляного канала, при которой $F(E_{0,1}) = 1 - e^{-1}$; E_n – нижний предел пробивной напряженности; α – безразмерный параметр.

В качестве единичного объема выбирается объем масла в первом канале главной изоляции $V = V_{\text{м.к.ВН}}$.

Алгоритм расчета электрической прочности масляных каналов изоляции трансформаторов с различным объемом масла в неоднородных полях представляет последовательность действий:

1. Определяются основные размеры трансформатора в соответствии с методикой расчета и с учетом значения изменения мощности в заданном классе номинального напряжения.
2. Определяется минимальная пробивная напряженность трансформаторного масла при заданной ширине первого масляного канала.
3. Определяется напряженный объем масла в наиболее нагруженном первом масляном канале обмотки ВН.
4. При заданном первичном объеме трансформаторного масла определяются параметры распределения пробивной напряженности $E_{0,1}$, E_n , α .
5. Определяется пробивная напряженность трансформаторного масла E_{0,V_i} при объеме масла в первом масляном канале $V_{\text{м.к.ВН}}$.

Результаты. Для исследования электрического поля трансформатора и определения пробивной напряженности в первом масляном канале используется программа ANSYS MAXWEL. Данная программа позволяет с высокой точностью воспроизвести реальное распределение напряженности электрического поля внутри бака трансформатора.

Для принятой ширины первого масляного канала определяется расчетная допустимая напряженность в масляном канале при соответствующем нормативном ис-

пытательном напряжении, в качестве которого принимается испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты $U_{50Гц,1мин}$, равное 200 кВ для рассматриваемых трансформаторов класса 110 кВ. При этом в расчете изоляции силовых трансформаторов учитывается, что электрическая прочность масляного канала определяется средней напряженностью вдоль силовых линий от угла катушки до изоляционного барьера.

Для создания простых элементов модели используется встроенная система проектирования ANSYS, а для создания более сложных элементов, в частности емкостных колец и угловых шайб, используется AutoCAD – двух- и трехмерная система автоматизированного проектирования и черчения. Расчетная модель соответствует главной изоляции двухобмоточного трансформатора 110 кВ (рис. 2).

При испытании изоляции одноминутным напряжением промышленной частоты напряжение по обмотке трансформатора распределяется нелинейно. Здесь имеет место сложный электромагнитный переходный процесс. Для задачи потенциала на катушках обмотки принята разность потенциала между соседними катушками, равная 1 %. Далее потенциал будет сни-

жаться на 1 % симметрично вверх и вниз обмотки. В данной задаче необходимо задать граничные условия на стенки бака трансформатора и на стержень. Для задания граничных условий необходимо выбрать все линии, ограничивающие расчетную область, которые соответствуют стенкам бака и стержню, и задать на них потенциал, равный нулю. Следующим этапом является задание физических свойств каждому элементу модели. Обмотки выполнены из меди. Изоляция обмоток выполнена из конденсаторной бумаги с диэлектрической проницаемостью 3,5, удельная проводимость 9 нСм/м. Далее цилиндрам, емкостным кольцам, угловым шайбам и остальной части изоляции присваиваются свойства электрокартона с диэлектрической проницаемостью 4, проводимостью 1 пСм/м. Пространству вокруг обмоток присваивается среда «Трансформаторное масло». Диэлектрическая проницаемость масла – 2,2, проводимость – 1 пСм/м.

С учетом таких допущений получены значения пробивной напряженности: в верхнем крае обмотки ВН в первом масляном канале $E_{МК} = 7,75$ кВ/мм; в середине обмотки ВН в первом масляном канале $E_{МК} = 4,83$ кВ/мм; в нижнем крае обмоток в первом масляном канале $E_{МК} = 11,43$ кВ/мм.

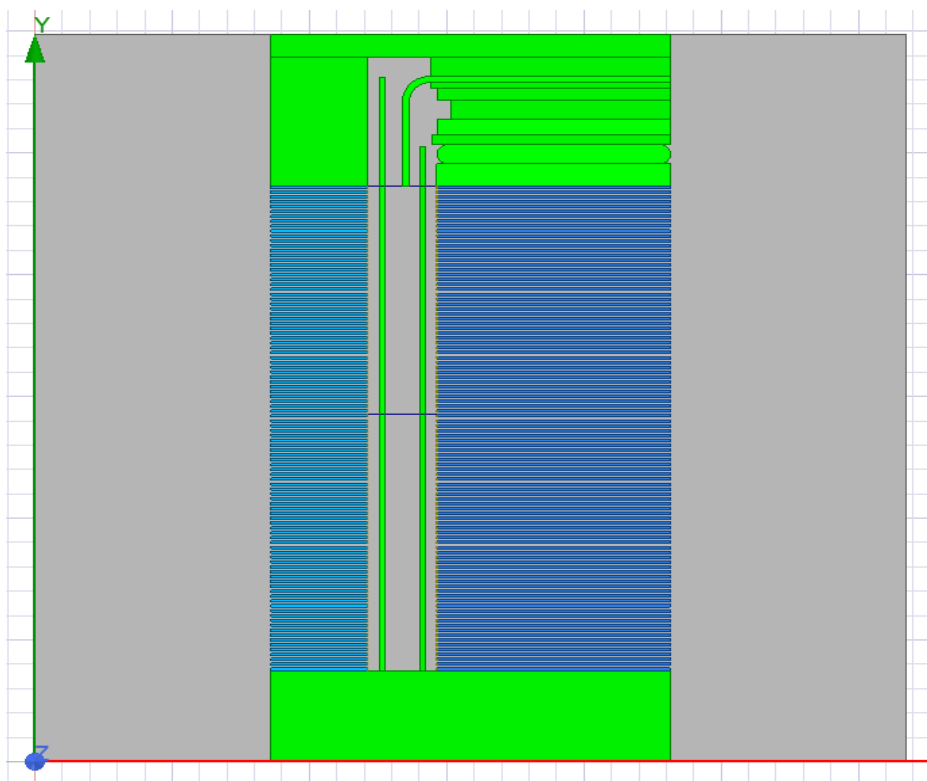


Рис. 2. Модель для расчета электрического поля двухобмоточного трансформатора 110 кВ

Для применения предложенного метода расчета необходимо знать параметры распределения пробивной напряженности трансформаторного масла для масляного канала E_n , $E_{0,1}$, α . Параметры распределения напряженности определяются по результатам экспериментов для заданных моделей [9, 10]. В настоящее время такие данные отсутствуют, поэтому при расчете рассматриваются изменения соотношений $E_{0,1} / E_n$. По (5) определяется напряженный объем масла в наиболее нагруженном первом масляном канале обмотки высшего напряжения $V_{\text{мк ВН}}$.

Ниже рассчитаны параметры электрической прочности трансформаторного масла в масляном канале обмотки ВН трансформатора. При этом выражение (8) получено в безразмерном виде:

$$\frac{E_{0,Vi}}{E_{0,1}} = \frac{1 + \left(\frac{E_{0,1}}{E_n} - 1 \right) \frac{1}{\alpha}}{\frac{E_{0,1}}{E_n}} \quad (9)$$

На рис. 3 представлена расчетная зависимость относительной пробивной напряженности трансформаторного масла $E_{0,Vi}/E_{0,1}$ при заданной мощности от отношения $E_{0,1}/E_n$. Отмечается, что по мере увеличения относительного значения $E_{0,1}/E_n$ электрическая прочность масляного канала $E_{0,Vi}/E_{0,1}$ при заданной мощности трансформатора уменьшается, что соответствует физическому смыслу формирования пробоя.

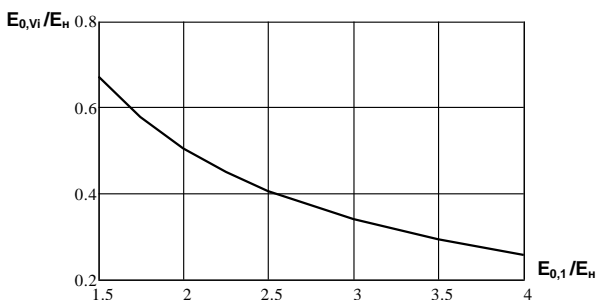


Рис. 3. Расчетная зависимости относительной пробивной напряженности масла $E_{0,Vi}/E_{0,1}$ при заданной мощности от отношения $E_{0,1}/E_n$ для параметра $\alpha = 2,5$

Выводы. Предложенный метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов, в отличие от существующих методов, при расчете минимальной пробив-

ной напряженности в модели главной изоляции учитывает конструктивные особенности (объем и параметры распределения пробивной напряженности трансформаторного масла) силовых трансформаторов и обосновывает допущения для повышения точности расчета.

На основе предложенного метода разработан алгоритм расчета для выбора главной изоляции силовых трансформаторов. В соответствии с методикой и алгоритмом выполнен расчет параметров электрической прочности трансформаторного масла в масляном канале обмотки ВН трансформатора.

Список литературы

1. **Серебряков А.С., Семенов Д.А.** Определение оставшегося ресурса главной изоляции распределительных трансформаторов // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 2–8.
2. **Львов М.Ю.** Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Электричество. – 2010. – № 2. – С. 27–31.
3. **Алексеев Б.А.** Крупные силовые трансформаторы. Эксплуатационная надежность, контроль состояния и оценка работоспособности // Энергетика за рубежом: прил. к журн. «Энергетик». – М., 2008. – Вып. 2. – С. 3–56.
4. **Кучинский Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
5. **Видмар М.** Трансформатор в эксплуатации. – М.; Л.: ГНТИ, 1931. – 292 с.
6. **Мельникова О.С.** Влияние мощности и номинального напряжения действующих силовых трансформаторов на объем масла в главной изоляции // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 14–18.
7. **Митькин Ю.А., Мельникова О.С.** Определение статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с учетом его объема в трансформаторах // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 21–25.
8. **Сканави Г.И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.
9. **Черноготский В.М., Джуль Л.П.** Методология выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока / Электро. – 2009. – № 4. – С. 19–25.
10. **Панов А.В., Морозова Т.И.** Электрические характеристики и методы расчета главной изоляции мощных высоковольтных трансформаторов // Труды ВЭИ. Вопросы трансформаторостроения. – 1969. – Вып. 79. – С. 12–32.

11. Moser H. Transformerboard // Scientia Electrica. – 1979.

12. Development of a Design Method for Insulating Structures Exposed to Electric Stress in Long Oil Gaps and Along Oil / F. Derver, H.J. Kirch, Ch. Krause, E. Schneider. Transformerboard Interface: 7-th International Symposium on High Voltage Engineering. – Dresden, 1991.

13. Davindenm V., Schultz K., Kuchler A. Function of Solid Insulation in Transformers // Transform, 98.

14. Ушаков В.Я., Лопатин В.В., Багин В.В. Эффект площади электродов при пробое трансформаторного масла // Изв. вузов. Физика. – 1964. – № 4. – С. 147–149.

15. Palmer S., Scharpley W.A. Electric strength of transformer oil. Proc. IEE. – 1966. – Vol. 116, No.12. – P. 2029–2035.

16. Митькин Ю.А., Мельникова О.С. Влияние мощности и напряжения трансформаторов на статистические характеристики электрической прочности масляных каналов главной изоляции // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 17–21.

17. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Инженерный метод расчета электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения // Электричество. – 2005. – № 3. – С. 82–85.

References

1. Serebryakov, A.S., Semenov, D.A. Opredele nie ostavshegosya resursa glavnoy izolyatsii raspredelitel'nykh transformatorov [Determination of usable lifespan of the main insulation of distribution transformers]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 6, pp. 2–8.

2. L'vov, M.Yu. Analiz povrezhdaemosti silovykh transformatorov napryazheniem 110 kV i vyshe [Damage analysis of power transformers with voltage of 110 kV and higher]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 2, pp. 27–31.

3. Alekseev, B.A. Krupnye silovye transformatory. Ekspluatatsionnaya nadezhnost', kontrol' sostoyaniya i otsenka rabotosposobnosti [Large power transformers. Operational reliability, condition monitoring and assessment of performance]. *Energetika za rubezhom: prilozhenie k zhurnalу «Energetik»*, 2008, issue 2, pp. 3–56.

4. Kuchinskiy, G.S. Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruktsiyakh [Partial discharges in high voltage structures]. Leningrad: Energiya, 1979. 224 p.

5. Vidmar, M. Transformator v ekspluatatsii [Transformer in operation]. Moscow; Leningrad: GNTI, 1931. 292 p.

6. Mel'nikova, O.S. Vliyanie moshchnosti i nominal'nogo napryazheniya deystvuyushchikh silovykh transformatorov na ob'em masla v glavnoy izolyatsii [Definition of transformer oil elec-

trical strength statistical performances with account of its volume in transformers]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 14–18.

7. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Opredele nie statisticheskikh kharakteristik elektricheskoy prochnosti transformatornogo masla s ucheto m ego ob'ema v transformatorakh [Definition of transformer oil electrical strength statistical performances with account of its volume in transformers]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 21–25.

8. Skanavi, G.I. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh poley)* [Physics of dielectrics (strong fields)]. Moscow: GIFML, 1958. 907 p.

9. Chornogotskiy, V.M., Dzhun', L.P. Metodologiya vybora izolyatsii transformatornogo oborudovaniya UVN peremennogo toka [Methodology of isolation transformer equipment UHV AC selection]. *Elektra*, 2009, no. 4, pp. 19–25.

10. Panov, A.V., Morozova, T.I. Elektricheskie kharakteristiki i metody rascheta glavnoy izolyatsii moshchnykh vysokovol'tnykh transformatorov [Electrical performances and calculation methods of power high-voltage transformers basic insulation]. *Trudy VEI. Voprosy transformatorostroeniya*, 1969, issue 79, pp. 12–32.

11. Moser, H. Transformerboard. Scientia Electrica, 1979.

12. Derver, F., Kirch, H.J., Krause, Ch., Schneider, E. Development of a Design Method for Insulating Structures Exposed to Electric Stress in Long Oil Gaps and Along Oil. Transformerboard Interface: 7-th International Symposium on High Voltage Engineering. Dresden, 1991.

13. Davindenm, V., Schultz, K., Kuchler, A. Function of Solid Insulation in Transformers. Transform, 98.

14. Ushakov, V.Ya., Lopatin, V.V., Bagin, V.V. Effekt ploshchadi elektrodov pri probroe transformatornogo masla [The effect of the area of the electrodes during the breakdown of transformer oil]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1964, no. 4, pp. 147–149.

15. Palmer, S., Scharpley, W.A. Electric strength of transformer oil. Proc. IEE, 1966, vol. 116, no. 12, pp. 2029–2035.

16. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Vliyanie moshchnosti i napryazheniya transformatorov na statisticheskie kharakteristiki elektricheskoy prochnosti maslyanykh kanalov glavnoy izolyatsii [Effect of capacity basic insulation and voltage of transformer on statistical performances of oil channels electrical strength]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 17–21.

17. Lokhanin, A.K., Larin, V.S., Matveev, D.A. Inzhenernyy metod rascheta elektricheskoy prochnosti glavnoy izolyatsii silovykh transformatorov vysokogo napryazheniya [Engineering method for calculating the dielectric strength of the main insulation of high voltage power transformers]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 3, pp. 82–85.