

Выбор и расчет статистических характеристик электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов в целях повышения эффективности ее диагностики

О.С. Мельникова
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Диагностика электрической прочности масляных каналов главной изоляции проводится по значениям статистических характеристик пробивного напряжения масла в маслопробойнике, установленным без учета мощности трансформатора, влияние которой обусловлено вероятностной природой пробоя масла. Исследования на основе вероятностного подхода также не учитывают влияние мощности трансформаторов. В связи с этим актуальной является разработка методики расчета статистических характеристик прочности масляных каналов и выбора значений статистических характеристик масла в маслопробойнике, обеспечивающих нужный уровень электрической прочности главной изоляции с учетом мощности трансформаторов.

Материалы и методы: Статистические характеристики электрической прочности масляных каналов и диагностические статистические характеристики эксплуатационного трансформаторного масла определены с применением трехпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла с учетом влияния объема масла в каналах и результатов испытаний электрической прочности эксплуатационного масла для трансформаторов различной мощности.

Результаты: Разработаны методика, алгоритм и программа расчета статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале главной изоляции трансформаторов с учетом их технических параметров и качества эксплуатационного масла. Предложены рациональные значения статистических характеристик электрической прочности эксплуатационного масла для диагностики главной изоляции трансформаторов.

Выводы: Разработанные методика, алгоритм и программа расчета статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла, а также предложенные рациональные характеристики прочности эксплуатационного масла могут применяться в целях повышения эффективности диагностики изоляции трансформаторов с учетом их технических параметров.

Ключевые слова: трансформатор, главная изоляция, трансформаторное масло, электрическая прочность, статистические характеристики, диагностика.

Selection and calculation of transformer main insulation oil channel electric strength statistical characteristics for increasing the diagnosis efficiency

O.S. Mel'nikova
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Abstract

Background: Diagnosis of electrical strength of main insulation oil channels is based on statistical characteristics of the breakdown voltage of oil in the oil piercer, installed without taking into account the transformer power, the influence of which is determined by the probabilistic nature of the oil breakdown. The existing works based on the probabilistic approach do not take into consideration the influence of transformer power either. Therefore, it is important to develop a technique of calculating the statistical characteristics of oil duct strength and to select statistical characteristics of oil in the oil piercer providing the desired level of electrical strength of main insulation taking into account the transformer power.

Materials and methods: The statistical characteristics of oil channel electric strength and diagnostic characteristics of operating transformer oil were determined with the help of Gnedenko-Weibull three-parameter distribution taking into account the influence of the oil volume in channels and the results of testing the oil electric strength in transformers of different power.

Results: Methods, an algorithm and a calculation program have been developed to determine statistical characteristics of oil electric strength in the first channel of transformer main insulation with their technical parameters and the quality of exploiting oil taken into account. Reasonable statistical characteristics of electric strength operating oil were suggested to diagnose the main insulation of transformers.

Conclusions: It is shown that these methods, algorithm and program of calculating oil electric strength in the first channel of main insulation as well as the proposed reasonable statistical characteristics of operating oil strength can be used to improve the efficiency of diagnosing the main insulation of transformers by their technical parameters.

Key words: transformer, main insulation, transformer oil, electric strength, statistical characteristics, diagnosis.

В эксплуатации диагностика электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов осуществляется по нормативным значениям статистических характеристик пробивного напряжения масла, определяемого в маслопробойнике¹. Эти значения установлены с учетом только номинального напряжения оборудования².

Исследованиями последних лет показано [1, 2, 3], что электрическая прочность масляных каналов имеет вероятностную природу и поэтому зависит от их объема, который, в свою очередь, определяется мощностью трансформаторов.

В эксплуатации также отмечаются повреждения главной изоляции трансформаторов как в период нормативного срока службы, так и за его пределами, причем наблюдается возрастание повреждаемости для трансформаторов большей мощности [4, 5].

В настоящее время для оценки качества масла в качестве статистических характеристик его прочности в нашей стране³ применяются среднее пробивное напряжение и его среднее квадратичное отклонение. В зарубежной практике⁴ применяется дополнительная характеристика в виде отношения максимального пробивного напряжения в маслопробойнике к минимальному его значению для испытываемой пробы масла.

В этих методиках нормативные значения статистических характеристик масла установлены без учета влияния мощности трансформаторов.

Обсуждаются вопросы по выработке рекомендаций для нормативных статистических характеристик электрической прочности масла в трансформаторах с учетом вероятностной природы его пробоя [6]. Эти вопросы рассматриваются без учета влияния мощности трансформаторов.

С учетом этого нормативные статистические характеристики электрической прочности масла в маслопробойнике необходимо устанавливать с учетом не только класса номинального напряжения, но и мощности трансформаторов.

Для решения этих вопросов поставлена задача разработать методику расчета, установить основные статистические характеристики электрической прочности трансформаторного масла в каналах главной изоляции трансформаторов в широком диапазоне их мощностей и на-

пряжений, на этой основе с привлечением результатов испытаний эксплуатационного трансформаторного масла выбрать рациональные диагностические значения статистических характеристик масла в маслопробойнике, обеспечивающих требуемый уровень электрической прочности главной изоляции в эксплуатации для трансформаторов с различными номинальными техническими параметрами.

Методика расчета статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале главной изоляции трансформатора. Расстояние между обмотками высшего и низшего напряжений $I_{ВН-НН}$ можно определить [7] как

$$I_{ВН-НН} = \frac{k_{из} U_{расч}}{k_{П.Е} E_{мк.пр.мин}}, \quad (1)$$

где $U_{расч}$ – расчетное напряжение, действующее на главную изоляцию; $k_{из} = 1,1-1,2$ – коэффициент, учитывающий увеличение напряженности электрического поля в масляном канале из-за наличия барьеров и цилиндричности конструкции главной изоляции; $E_{мк.пр.мин}$ – минимальная пробивная напряженность, определяемая при заданной вероятности пробоя P_3 ; $k_{П.Е}$ – поправочный коэффициент, учитывающий небольшое количество опытов, использованное для получения этой зависимости, меньшее по сравнению с реальным трансформатором размеры модельного образца, возможные отклонения в размерах элементов изоляции.

В соответствии с [2], минимальная пробивная напряженность масла найдется так:

$$E_{мк.пр.мин} = E_H + (E_{0,1} - E_H) \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}, \quad (2)$$

где $E_{0,1}$, $E_{0,m}$ – величины пробивной напряженности единичного масляного канала и канала, увеличенного в m_k раз, при которых вероятности пробоя равны: $F(E_{0,1}) = F(E_{0,m}) = 1 - e^{-1}$; E_H – нижний предел пробивной напряженности масляного канала; α – безразмерный параметр; P_3 – заданная вероятность пробоя масла, которая при выборе изоляции принимается [7] равной 0,05.

Параметр m_k отражает увеличение объема масла в каналах трансформаторов по сравнению с единичным (исходным) каналом.

С учетом (2) выражение (1) примет вид

$$I_{ВН-НН} = \frac{k_{из} U_{расч}}{k_{П.Е}} \left(E_H + (E_{0,1} - E_H) \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)^{-1}. \quad (3)$$

¹ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81). Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.

² РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2004. – 355 с.

³ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81).

⁴ Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов / пер. с англ. под ред. проф. Н.В. Александрова. – М.: Энергия, 1979. – 344 с.

Тогда с учетом методики [2] и формулы (3) выражение для определения объема масла в первом масляном канале запишется следующим образом:

$$V_{\text{мк.1,ВН}} = \pi I_{\text{мк.1,ВН}} (1,02 \cdot 10^{-2} \times \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3U_{\text{р}} \left(\frac{k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}}/k_{\text{П.Е}}}{E_{\text{Н}} + (E_{0,1} - E_{\text{Н}}) \left[\frac{-\ln(1-P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}}} \right)} + 2I_{\text{с-НН}} + 2,42 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}} + \frac{2k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}}/k_{\text{П.Е}}}{\left(E_{\text{Н}} + (E_{0,1} - E_{\text{Н}}) \left[\frac{-\ln(1-P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)} - I_{\text{мк.1,ВН}}). \quad (4)$$

Выражение (4) содержит неизвестный параметр

$$m_k = \frac{V_{\text{мк.1,ВН}}}{V_{\text{мк.Б}}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{мк.Б}}$ – объем масляного канала базовой модели главной изоляции трансформатора (единичный образец изоляции).

В качестве базовой модели главной изоляции трансформатора целесообразно выбрать модель, которая применялась для исследования характеристик электрической прочности трансформаторной изоляции в ряде стран, включая и нашу страну [7]. Тогда объем масляного канала базовой модели главной изоляции трансформатора на единицу его высоты определится как

$$V_{\text{мк.Б}} = \pi I_{\text{мк.Б}} (2r_{\text{ВН,Б}} - I_{\text{мк.Б}}), \quad (6)$$

где $I_{\text{мк.Б}}$, $r_{\text{ВН,Б}}$ – ширина масляного канала и радиус обмотки высокого потенциала базовой модели соответственно.

Для определения параметра m_k выражение (4) записывается в безразмерном виде с учетом (5) и (6):

$$m_k = (I_{\text{мк.1,ВН}}/I_{\text{мк.Б}} (2r_{\text{ВН,Б}} - I_{\text{мк.Б}})) \times (1,02 \cdot 10^{-2} \times \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3U_{\text{р}} \left(\frac{k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}}/k_{\text{П.Е}}}{E_{\text{Н}} + (E_{0,1} - E_{\text{Н}}) \left[\frac{-\ln(1-P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}}} \right)} + 2I_{\text{с-НН}} + 2,42 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}} + \frac{2k_{\text{из}} \cdot U_{\text{расч}}/k_{\text{П.Е}}}{\left(E_{\text{Н}} + (E_{0,1} - E_{\text{Н}}) \left[\frac{-\ln(1-P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha} \right)} - I_{\text{мк.1,ВН}}). \quad (7)$$

С учетом (1) и (2) находятся относительные значения характерных параметров:

$$\frac{E_{0,m}}{E_{0,1}} = \frac{1 + \left(\frac{E_{0,1}}{E_{\text{Н}}} - 1 \right) (m_k)^{-1/\alpha}}{\frac{E_{0,1}}{E_{\text{Н}}}}; \quad (8)$$

$$\frac{E_{\text{мк.пр.мин,м}}}{E_{\text{мк.пр.мин,1}}} = \frac{1 + \left(\frac{E_{0,1}}{E_{\text{Н}}} - 1 \right) \left[\frac{-\ln(1-P_3)}{m_k} \right]^{1/\alpha}}{1 + \left(\frac{E_{0,1}}{E_{\text{Н}}} - 1 \right) \left[-\ln(1-P_3) \right]^{1/\alpha}}. \quad (9)$$

Полученные результаты приняты за основу при разработке алгоритма расчета статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале главной изоляции трансформаторов при различных значениях их номинальной мощности.

Разработанный алгоритм предусматривает следующую последовательность действий:

1. Задаются параметры распределения электрической прочности базового канала $E_{\text{Н}}$, $E_{0,1}$, α с учетом охвата различных случаев, возникающих в условиях эксплуатации.

2. Задается текущее значение мощности трансформатора с учетом ее изменения в заданном классе номинального напряжения.

3. С применением выражения (7) численным методом находится параметр m_k .

4. С учетом выражений (8) и (9) находятся относительные значения параметров $E_{0,m}/E_{0,1}$ и $E_{\text{мк.пр.мин,м}}/E_{\text{мк.пр.мин,1}}$.

5. С применением выражения (3) определяется расстояние между обмотками высшего и низшего напряжений $l_{\text{ВН-НН}}$.

Расчет и построение графиков выполнены в программе MathCad.

Расчет статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале главной изоляции трансформаторов.

В соответствии с предложенной методикой выполнены расчеты изменения объемов масла в первом масляном канале и их электрической прочности для двухобмоточных трехфазных трансформаторов на 110 кВ при изменении их мощностей в диапазоне 10^5 – 10^8 ВА.

При расчетах приняты следующие исходные условия: $P_3 = 0,05$, $K_{\text{П.Е}} = 1$, так как в расчетной модели учитываются статистические характеристики электрической прочности масла; $K_{\text{из}} = 1,1$; $U_{\text{р}} = 0,2$ (реактивная составляющая напряжения короткого замыкания); $l_{\text{с-НН}} = 18 \cdot 10^{-3}$ м [8]; $r_{\text{ВН,Б}} = 0,0625$ м; $I_{\text{мк.Б}} = 8 \cdot 10^{-3}$ м [7]; $I_{\text{мк.1,ВН}} = 8 \cdot 10^{-3}$ м; $U_{\text{расч}} = 2 \cdot 10^5$ В; $E_{0,1} = 10,1 \cdot 10^6$ В/м [7].

Расчеты проводились при различных значениях параметров $E_{0,1}/E_{\text{Н}}$ и α . Результаты расчета представлены на рис. 1–7.

Выполненные расчеты показали, что с увеличением мощности трансформатора объем масла в первом канале возрастает, причем его относительные значения m_k изменяются от 2,2 до 8,5 при соответствующем изменении мощности трансформатора от 10^5 до 10^8 ВА.

На рис. 1 представлено изменение относительного значения пробивной напряженности масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ от мощности трансформатора для заданного $\alpha = 2,5$ при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_H$.

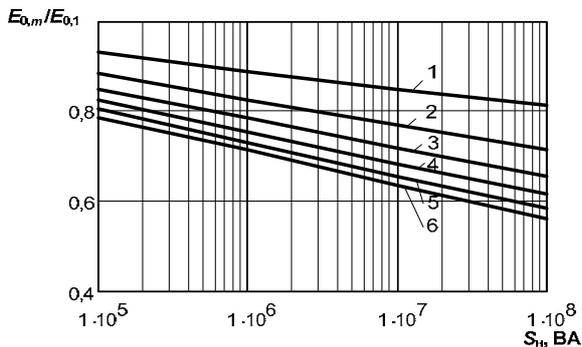


Рис. 1. Зависимости относительного значения пробивной напряженности масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ от мощности трансформатора для $\alpha = 2,5$ при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_H$: 1 – $E_{0,1}/E_H = 1,5$; 2 – $E_{0,1}/E_H = 2$; 3 – $E_{0,1}/E_H = 2,5$; 4 – $E_{0,1}/E_H = 3$; 5 – $E_{0,1}/E_H = 3,5$; 6 – $E_{0,1}/E_H = 4$

Отмечается, что электрическая прочность первого масляного канала $E_{0,m}/E_{0,1}$ с увеличением мощности трансформатора от 10^5 до 10^8 ВА уменьшается на 23 %. При этом для заданной мощности трансформатора по мере увеличения отношения $E_{0,1}/E_H$ происходит уменьшение $E_{0,m}/E_{0,1}$.

На рис. 2 представлены зависимости относительного значения минимальной пробивной напряженности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ от мощности трансформатора при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_H$. При этом отмечается уменьшение $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ с ростом мощности трансформатора, причем уменьшение пробивной напряженности в исследуемом диапазоне S_n происходит на 16 %. Одновременно с этим наблюдается существенное уменьшение $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ при увеличении отношения $E_{0,1}/E_H$.

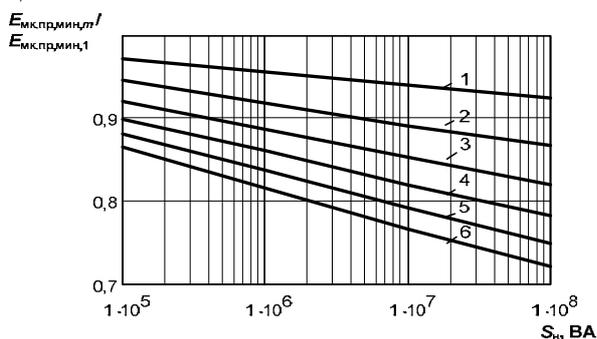


Рис. 2. Зависимости относительного значения минимальной пробивной напряженности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ от мощности трансформатора для $\alpha = 2,5$ при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_H$: 1 – $E_{0,1}/E_H = 1,5$; 2 – $E_{0,1}/E_H = 2$; 3 – $E_{0,1}/E_H = 2,5$; 4 – $E_{0,1}/E_H = 3$; 5 – $E_{0,1}/E_H = 3,5$; 6 – $E_{0,1}/E_H = 4$

На рис. 3 представлены зависимости относительного значения минимальной пробивной напряженности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ от параметра распределения α для мощности $S_n = 10^8$ ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_H$.

Отмечается, что изменение α в исследуемом диапазоне оказывает заметное (до 5 %) влияние на минимальную электрическую прочность масла, причем наблюдается минимум значений пробивной напряженности $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ вблизи значения $\alpha = 2,5$.

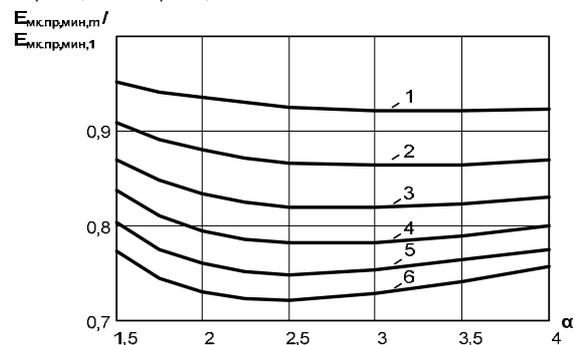


Рис. 3. Зависимости относительного значения минимальной пробивной напряженности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ от параметра распределения α для мощности $S_n = 10^8$ ВА при различных значениях отношения $E_{0,1}/E_H$: 1 – $E_{0,1}/E_H = 1,5$; 2 – $E_{0,1}/E_H = 2$; 3 – $E_{0,1}/E_H = 2,5$; 4 – $E_{0,1}/E_H = 3$; 5 – $E_{0,1}/E_H = 3,5$; 6 – $E_{0,1}/E_H = 4$

На рис. 4 представлены зависимости относительного значения пробивной напряженности масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ от отношения $E_{0,1}/E_H$ для параметра $\alpha = 2,5$ при различных значениях мощности трансформаторов. На рис. 5 приведены аналогичные зависимости относительного значения минимальной пробивной напряженности масла $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ от отношения $E_{0,1}/E_H$.

В обоих случаях при увеличении отношения $E_{0,1}/E_H$ от 1,5 до 4 отмечается существенное уменьшение пробивных напряженностей масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ (в 1,36 и 1,44 раза) и $E_{мк.пр.мин,m}/E_{мк.пр.мин,1}$ (в 1,17 и 1,28 раза). В большей степени это уменьшение пробивных напряженностей наблюдается при возрастании мощностей трансформаторов.

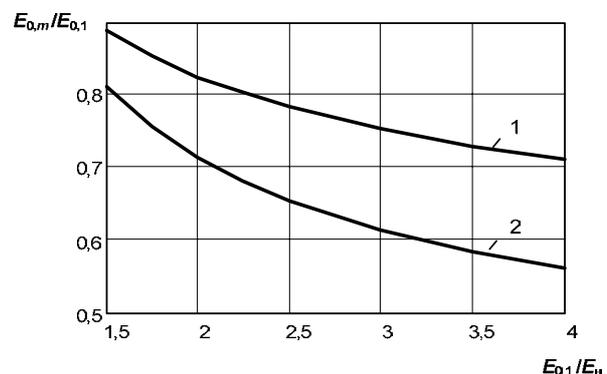


Рис. 4. Зависимости относительного значения пробивной напряженности масла $E_{0,m}/E_{0,1}$ от отношения $E_{0,1}/E_H$ для параметра $\alpha = 2,5$ при различных значениях мощности трансформаторов: 1, 2 – для мощности трансформаторов 10^6 и 10^8 ВА соответственно

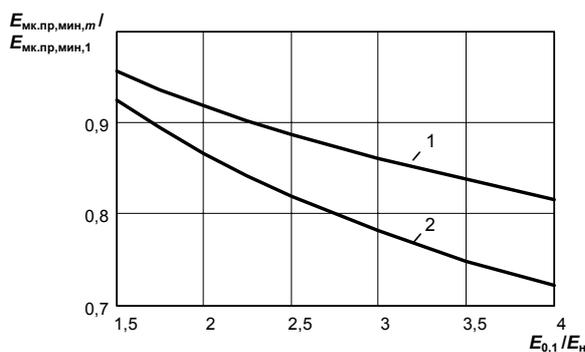


Рис. 5. Зависимости относительного значения минимальной пробивной напряженности масла $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$ от отношения $E_{0,1}/E_n$ для параметра $\alpha = 2,5$ при различных значениях мощности трансформаторов: 1, 2 – для мощности трансформаторов 10^6 и 10^8 ВА соответственно

При выборе масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов важно определить рациональные статистические параметры распределения пробивной напряженности масла так, чтобы электрическая прочность масляных каналов была не меньше заданного значения для исходной мощности трансформатора при соответствующем номинальном напряжении.

При этом учтем, что основным комплексным параметром, определяющим изменение пробивной напряженности масла, как было отмечено выше, служит отношение $E_{0,1}/E_n$. При уменьшении этого отношения параметр $E_{0,1}$ приближается к E_n , что свидетельствует об уменьшении области разброса пробивной напряженности. В свою очередь это проявляется в уменьшении степени снижения пробивной напряженности масла при возрастании мощности трансформатора.

Влияние параметра α проявляется в меньшей степени, и его значение, как отмечалось выше, можно принять равным 2,5.

В результате выбор комплексного параметра $E_{0,1}/E_n$ следует производить из условия равенства относительной минимальной пробивной напряженности $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$ заданному значению для исходных номинальных параметров трансформатора (мощность и напряжение) при $\alpha = 2,5$. В этом случае значения пробивных напряженностей $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$ при выбранном для рассматриваемых условий отношении $E_{0,1}/E_n$ будет выше заданного значения при всех других α .

Для этих выбранных условий проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 6 в виде изменения отношения $E_{0,1}/E_n$ в зависимости от мощности трансформаторов для параметра $\alpha = 2,5$ при заданных постоянных относительных значениях минимальной пробивной напряженности масла: $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1} = 0,85; 0,9; 0,95$.

Анализ полученных зависимостей (рис. 6) показывает, что значения комплексного параметра $E_{0,1}/E_n$ для исходного масла в модели трансформатора уменьшаются с ростом мощно-

сти трансформатора, а также с возрастанием допустимой минимальной пробивной напряженности масла $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$.

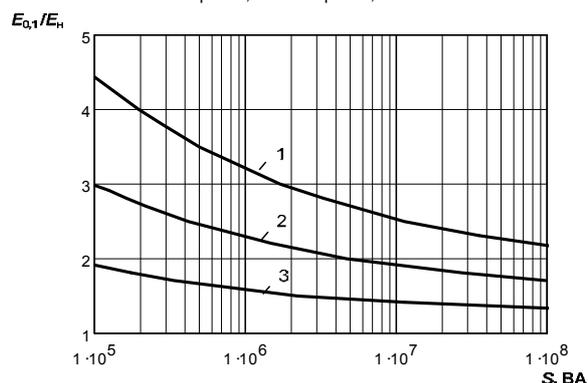


Рис. 6. Зависимости отношения $E_{0,1}/E_n$ от мощности трансформаторов для параметра $\alpha = 2,5$ при заданных постоянных значениях минимальной пробивной напряженности масла $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1}$: 1, 2, 3 – для $E_{\text{мк.пр.мин},m}/E_{\text{мк.пр.мин},1} = 0,85, 0,9$ и $0,95$ соответственно

Следовательно, для трансформаторов с большей мощностью качество масла должно быть выше, а значения отношения $E_{0,1}/E_n$, соответственно, должны быть ниже.

Выбор и обоснование рациональных статистических характеристик электрической прочности эксплуатационного масла для диагностики главной изоляции трансформаторов. Для обеспечения заданного уровня электрической прочности трансформаторного масла, установленного при выборе главной изоляции (рис. 6), в процессе эксплуатации необходимо выбрать и обосновать статистические характеристики, отражающие по физическому смыслу отношение $(E_{0,1}/E_n)_{\text{пр}}$.

Аналогом отношения $E_{0,1}/E_n$ при эксплуатационных испытаниях масла в маслопробойнике может служить отношение пробивных напряжений U_0/U_n , которое определяется по результатам этих испытаний. Тогда можно выбрать параметр $(U_0/U_n)_{\text{пр}}$, эквивалентный параметру $(E_{0,1}/E_n)_{\text{пр}}$.

При выборе характерного параметра $(U_0/U_n)_{\text{пр}}$ важно установить его качественную корреляционную связь с параметром $(E_{0,1}/E_n)_{\text{пр}}$.

При этом важно учесть, что при пересчете результатов исследования с малых образцов на большие для заданного качества трансформаторного масла значение его нижнего предела электрической прочности остается неизменным, а параметр $E_{0,1}$ и, соответственно, отношение $E_{0,1}/E_n$ уменьшаются.

В результате значение отношения U_0/U_n , полученное по результатам испытаний в маслопробойнике (малый образец), будет больше соответствующего отношения $E_{0,1}/E_n$ для модели главной изоляции трансформатора.

Тогда, если принять в качестве основного условия равенство

$$(E_{0,1}/E_n)_{\text{пр}} = (U_0/U_n)_{\text{пр}}, \quad (10)$$

то выполнение этого условия обуславливает повышение требований к качеству эксплуатационного трансформаторного масла.

В результате в качестве одной из основных рациональных статистических характеристик электрической прочности эксплуатационного трансформаторного масла следует принять отношение $(U_0/U_H)_{пр}$, предельные значения которого определяются в соответствии с (10).

Дальнейшее обоснование принятого условия (10) произведено на основе анализа статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла, полученных по предложенной [2] и традиционным⁵ методикам при обработке результатов определения пробивных напряжений 40 проб эксплуатационного масла для трансформаторов класса 110 кВ.

По этим данным установлена корреляционная связь между близкими по физическому смыслу статистическими характеристиками масла U_0/U_H и $U_{пр,макс}/U_{пр,мин}$:

$$U_0/U_H = \exp(1,396 \cdot (U_{пр,макс}/U_{пр,мин} - 1)^{1,01}), \quad (11)$$

где $U_{пр,макс}$, $U_{пр,мин}$ – максимальное и минимальное экспериментальные значения пробивных напряжений в испытуемой пробе масла.

С учетом этого на рис. 7 представлены рациональные значения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла для различных мощностей трансформаторов при заданном отношении $E_{мк.пр.мин,т}/E_{мк.пр.мин,1}$. Здесь отношение $(E_{0,1}/E_H)_{пр}$ определено в соответствии с данными на рис. 6, отношение $(U_0/U_H)_{пр}$ – по (10), а отношение $(U_{пр,макс}/U_{пр,мин})_{пр}$ определены из корреляционных связей этого параметра с отношением U_0/U_H по (11).

Анализ полученных значений (рис. 7) показывает, что расчетные U_0/U_H и экспериментальные $U_{пр,макс}/U_{пр,мин}$ статистические характеристики имеют одинаковую тенденцию спада при увеличении мощности трансформаторов. При этом их значения приближаются друг к другу и при мощности трансформатора 10^8 ВА и $E_{мк.пр.мин,т}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,95$ (рис. 7, в) составляют: $U_0/U_H = 1,32$, $U_{пр,макс}/U_{пр,мин} = 1,2$.

В дополнение к этому отметим, что, в соответствии со стандартом США⁶, отношение $U_{пр,макс}/U_{пр,мин}$ регламентировано, причем масло считается пригодным для эксплуатации при выполнении условия $U_{пр,макс}/U_{пр,мин} < 1,33$.

Сопоставление приведенных выше результатов свидетельствует о правомерности предложенных статистических характеристик U_0 и U_H , а также их отношения U_0/U_H в качестве диагностической характеристики, определяющей качество

масла, необходимое по условию электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформатора с учетом его мощности.

Заключение

Разработанные методика, алгоритм и программа расчета статистических характеристик электрической прочности масла в первом канале главной изоляции трансформаторов с учетом их мощностей, напряжений и качества масла, а также предложенные рациональные статистические характеристики электрической прочности эксплуатационного масла в маслопробойнике могут применяться для повышения эффективности диагностики главной изоляции трансформаторов различной мощности.

Список литературы

1. Ларин В.С., Лоханин А.К., Матвеев Д.А. Вопросы расчета изоляции силовых трансформаторов // Сборник научных трудов к 85-летию ВЭИ. – М., 2006. – С. 22–34.
2. 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.
3. Krause Ch., Piovani U., Tschudi D. Building Reliable AC and DC UHV Power Transformers-Dielectric Design Principles, Suitable Pressboard Insulation and Issues Related to HVDC Testing // Proceedings of International Conference on UHV Transmission. – Beijing, China, 2009.
4. О повреждении силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
5. Лоханин А.К., Соколов В.В. Обеспечение работоспособности маслонаполненного оборудования после расчетного срока службы // Электро. – 2002. – № 1. – С. 10–16.
6. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Черезов А.В. Развитие системы нормативно-технической документации для обеспечения эксплуатационной надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Электрические станции. – 2013. – № 11. – С. 54–59.
7. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

References

1. Larin, V.S., Lokhanin, A.K., Matveev, D.A. Voprosy rascheta izoljatsii silovykh transformatorov [Problems of power transformer insulation calculation]. *Sbornik nauchnykh trudov k 85-letiju VEI* [Collection of scientific works – 85th anniversary of the All-Russia Electrical Engineering Institute]. Moscow, 2006, pp. 22–34.
2. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Vliyanie moshchnosti i napryazheniya transformatorov na statisticheskie kharakteristiki elektricheskoy prochnosti maslyanykh kanalov glavnoy izoljatsii [Influence of transformer capacity and voltage on statistical characteristics of oil channel electrical strength]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 17–21.
3. Krause, Ch., Piovani, U., Tschudi, D. Building Reliable AC and DC UHV Power Transformers-Dielectric Design Principles, Suitable Pressboard Insulation and Issues Related to HVDC Testing. *Proceedings of International Conference on UHV Transmission*. Beijing, China, 2009.

⁵ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81); Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов / пер. с англ. под ред. проф. Н.В. Александрова. – М.: Энергия, 1979. – 344 с.

⁶ Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов.

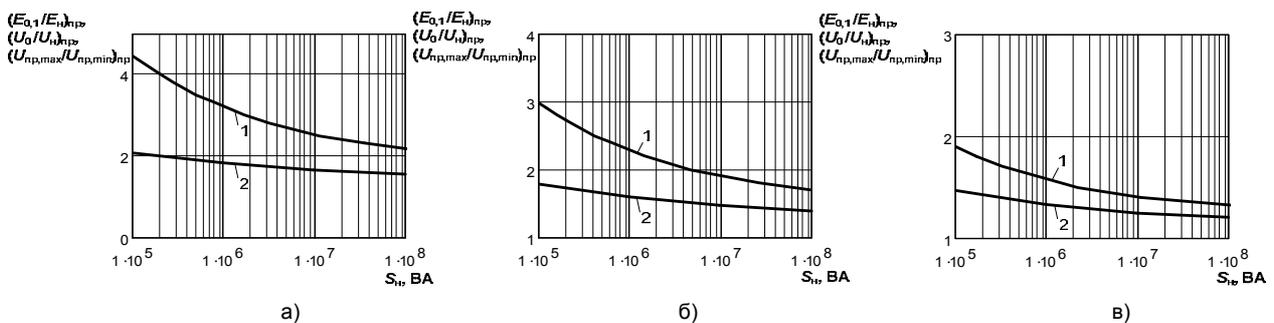


Рис. 7. Зависимости статистических характеристик $(E_{0,1}/E_{н})_{пр}$, $(U_0/U_{н})_{пр}$ (1), $(U_{пр,макс}/U_{пр,мин})_{пр}$ (2) от мощности силовых трансформаторов при различных значениях минимальной пробивной напряженности масла $E_{мк.пр.мин,л}/E_{мк.пр.мин,1}$: а – $E_{мк.пр.мин,л}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,85$; б – $E_{мк.пр.мин,л}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,9$; в – $E_{мк.пр.мин,л}/E_{мк.пр.мин,1} = 0,95$

4. Vanin, B.V., L'vov, Yu.N., L'vov, M.Yu. O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniem 110–500 kV v ekspluatatsii [110–500 kV power transformer damages in operation]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 9, pp. 53–58.

5. Lokhanin, A.K., Sokolov, V.V. Obespechenie rabotosposobnosti maslonapolnennogo oborudovaniya posle raschetnogo sroka sluzhby [Oil-filled equipment operation securing after estimated life cycle expiry]. *Elektro*, 2002, no. 1, pp. 10–16.

6. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Cherezov, A.V. Razvitie sistemy normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii dlya obe-

specheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti silovykh transformatorov i avtotransformatorov napryazheniem 110 kV i vyshe [Development of a normative-technical documentation system for ensuring the operational reliability of power transformers and autotransformers with a voltage of 110 kV and over]. *Elektricheskie stantsii*, 2013, no. 11, pp. 54–59.

7. Lizunov, S.D., Lokhanin, A.K. *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga* [Power transformers. Handbook]. Moscow, Energoizdat, 2004. 616 p.

8. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Transformer design]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 528 p.

Мельникова Ольга Сергеевна,
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 ассистент,
 e-mail: o.c.melnikova@mail.ru