

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА С УЧЕТОМ ЕГО ОБЪЕМА В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Ю.А. МИТЬКИН, О.С. МЕЛЬНИКОВА
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: mitkinya@mail.ru, o.c.melnikova@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время выбор главной изоляции трансформатора осуществляется без учета влияния объема трансформаторного масла. Для учета этого влияющего фактора необходимо изучить статистические характеристики электрической прочности масла и на этой основе разработать методику их оценки.

Материалы и методы: Использовалась статистическая модель формирования пробоя трансформаторного масла. Исследование влияния объема масла на его статистические характеристики электрической прочности проводилось с применением трехпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, которое отражает физические процессы при пробое масла.

Результаты: Предложен метод оценки статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла, позволяющий учитывать влияние объема и качества масла на их изменение. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета.

Выводы: Установлено, что предложенный метод с достаточной точностью позволяет определять характеристики электрической прочности масла, включая и нижний предел пробивной напряженности и может использоваться при выборе главной изоляции трансформатора с учетом оценки влияния объема трансформаторного масла на характеристики его электрической прочности.

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

DETECTION OF STATISTICAL PERFORMANCES OF TRANSFORMER OIL ELECTRICAL STRENGTH WITH ACCOUNT OF ITS VOLUME IN TRANSFORMERS

Yu.A. MIT'KIN, O.S. MEL'NIKOVA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: mitkinya@mail.ru, o.c.melnikova@mail.ru

Abstract

Background: Nowadays the basic insulation of transformer is chosen without taking into account the influence of transformer oil volume. In order to take this factor into account the authors have to study statistical performances of oil electrical strength and develop the methodology for their evaluation.

Materials and methods: The authors used the statistical model of transformer oil fault. The research about the influence of oil volume on statistical performances of strength was carried out with the usage of the Gnedenko - Weibull three-parameter distribution, which indicates physical processes in oil breakdown.

Results: The authors suggest the evaluation method of statistical performances of transformer oil electrical strength. This method takes into consideration the influence of oil volume and quality on their variation. The comparison of experimental data and calculation results is carried out.

Conclusions: The authors prove that the suggested method allows to determine characteristics of electrical oil strength, including the lower point of fault tension and may be used for choosing the basic insulation of transformer taking into account the evaluation of transformer oil volume influence on it.

Key words: transformer, transformer oil, electrical strength, statistical performances.

Для удовлетворения возрастающей потребности народного хозяйства в электроэнергии ведется непрерывная работа по созданию и внедрению в энергетическую отрасль новых силовых трансформаторов, рассчитанных на более высокие номинальные напряжения и мощности. При этом существенно возрастают габариты и масса этого оборудования. Это в полной мере относится и к главной изоляции силовых трансформаторов, состоящей из че-

редующихся слоев (каналов) трансформаторного масла и барьеров из электротехнического картона [1].

Отмечается [2], что с ростом номинального напряжения и мощности трансформатора существенно возрастает объем масла в баке трансформатора и, как следствие, во всех масляных каналах главной изоляции. Увеличение объема масла приводит к снижению его электрической прочности. В первую очередь это

проявляется в наиболее напряженном первом масляном канале, расположенном вблизи обмотки высшего напряжения [1]. Пробой первого масляного канала может привести к повреждению (обугливание) поверхности электротехнического картона, способного далее инициировать развитие поверхностного разряда. В связи с этим методика выбора главной изоляции трансформатора предусматривает ее расчет по условию отсутствия пробоев первого масляного канала [3]. С учетом этого уделяется большое внимание исследованию электрической прочности трансформаторного масла для промежутков, характерных для главной изоляции трансформаторов.

Такой подход отражается в методиках выбора главной изоляции трансформатора [4, 5], в которых учитывается зависимость электрической прочности масляного канала от его ширины. При этом зависимость пробивной напряженности масла от ширины масляного канала представляется эмпирическими формулами в виде степенных функций:

- согласно [4],

$$E = \frac{A}{l_{МК}^n}; \quad (1)$$

- согласно [5],

$$E = B + \frac{C}{l_{МК}^{0,5}}; \quad (2)$$

где A , B , C , n – эмпирические коэффициенты, определяемые из эксперимента на моделях узлов трансформаторов для различных видов воздействующих электрических напряжений; $l_{МК}$ – ширина масляного канала.

Результаты расчета по этим методикам имеют определенные различия [3].

Следует отметить, что влияние объема масла на его электрическую прочность обусловлено статистической природой формирования предпробивных процессов, причем пробой в канале возникает в наиболее слабом месте [1]. В силу этого важно изучить и установить основные статистические характеристики электрической прочности трансформаторного масла и на этой основе с учетом опыта проектирования [3] разработать методику их оценки при изменении объема масла в широком диапазоне применительно к главной изоляции силовых трансформаторов.

Для получения достоверной информации модель большого объема трансформаторного масла представляется в виде параллельно соединенных одинаковых m элементарных (единичных) объемов масла [1]. При этом распределение электрической прочности единичного объема целесообразно выбрать в виде трехпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла, которое отражает физический смысл формирования пробоя в трансформаторном масле [6, 7].

Тогда зависимость вероятности пробоя масла от числа параллельно соединенных элементов масла (от объема масла) принимает вид [7]

$$F(m, E) = 1 - \exp \left[-m \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^\alpha \right], \quad (3)$$

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

Вид функции $F(m, E)$ для различных значений m представлен на рис. 1.

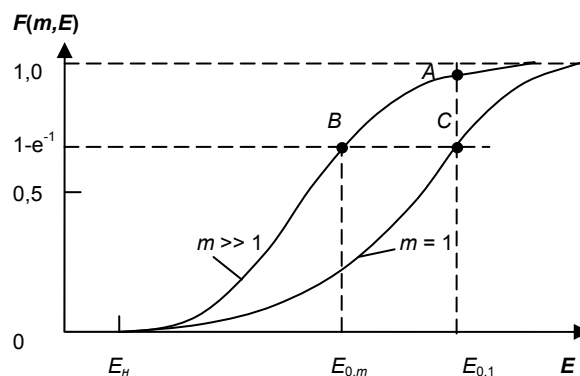


Рис. 1. Функция распределения пробивной напряженности трансформаторного масла при различных его объемах

Сдвиг функции распределения пробивной напряженности масла в область меньших значений при увеличении его объема (рис. 1) обусловлен чисто статистической природой формирования пробоя. При возрастании объема масла увеличивается количество примесей, участвующих в формировании предпробивной ситуации, что приводит к возрастанию вероятности возникновения пробоя и, соответственно, к уменьшению пробивной напряженности масла. При этом важно учесть, что пробой формируется в наиболее слабом месте при любых объемах масла, поэтому вид распределения пробивной напряженности должен оставаться неизменным и соответствовать распределению Гнеденко-Вейбулла. Нижний предел пробивной напряженности трансформаторного масла по физическим соображениям остается неизменным для заданного качества масла.

Тогда для произвольного объема масла распределение пробивной напряженности запишется в виде

$$F(m, E) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E - E_H}{E_{0,m} - E_H} \right)^{\alpha_m} \right], \quad (4)$$

где $E_{0,m}$ – пробивная напряженность масляного канала при $F(E_{0,m}) = 1 - e^{-1}$; α_m – безразмерный параметр для заданного значения m .

Тогда остается установить изменение других статистических характеристик электри-

ческой прочности масла ($E_{0,m}$ и α_m) при изменении его объема.

При этом учтем, что выражения (3) и (4) совпадают друг с другом по физическим соображениям. Тогда из сравнения правых частей выражений (3) и (4) для точки А (рис. 1) при $E = E_{0,1}$ имеем

$$1 - \exp(-m) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H}\right)^{\alpha_m}\right]. \quad (5)$$

Из (5) получаем

$$m = \left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H}\right)^{\alpha_m}. \quad (6)$$

Аналогично для точки В (рис. 1) с учетом выражений (3) и (4) запишем равенство в виде

$$1 - \exp\left[-m\left(\frac{E_{0,m} - E_H}{E_{0,1} - E_H}\right)^{\alpha_1}\right] = 1 - \exp(-1). \quad (7)$$

В результате из (7) имеем

$$m = \left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H}\right)^{\alpha_1}. \quad (8)$$

С учетом выражений (6) и (8) запишем тождество

$$\left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H}\right)^{\alpha_m} = \left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H}\right)^{\alpha_1}. \quad (9)$$

Из этого следует, что данное выражение (9) будет тождеством при $\alpha_m = \alpha_1$.

Таким образом, при изменении объема масла (параметра m) в распределении пробивных напряженностей трансформаторного масла заданного качества, имеющем вид распределения Гнеденко-Вейбулла, изменяется только параметр $E_{0,m}$, а два других параметра (E_H и α) остаются неизменными.

Тогда выражение (4) для распределения пробивной напряженности при произвольном объеме масла примет вид

$$F(m, E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E - E_H}{E_{0,m} - E_H}\right)^{\alpha}\right]. \quad (10)$$

В свою очередь, вместо выражений (6) и (8) для m запишем общее выражение:

$$m = \left(\frac{E_{0,1} - E_H}{E_{0,m} - E_H}\right)^{\alpha}. \quad (11)$$

Из (11) найдется выражение для определения параметра $E_{0,m}$:

$$E_{0,m} = E_H + \frac{E_{0,1} - E_H}{m^{1/\alpha}}. \quad (12)$$

Выражение (12) следует сопоставить с эмпирическими формулами (1) и (2), которые при заданной площади электродов можно рассматривать как зависимости пробивной напряженности трансформаторного масла от его объема. В результате этого сопоставления следует отметить, что в большей степени вы-

ражению (12) отвечает формула (2), предложенная Пановым и Морозовой [5]. Тогда в выражении (2) коэффициенты В и С по физическому смыслу должны отражать, в соответствии с (12), нижний предел пробивной напряженности и разность ($E_{0,1} - E_H$). Кроме того, показатель степени для ℓ в (2) принят детерминированным (равным 0,5). Однако, в соответствии с полученным результатом (12), этот показатель (параметр α) будет зависеть от заданного качества масла.

В свою очередь, формула (1) отражает изменение пробивной напряженности масла от расстояния между электродами (объема масла) в узком диапазоне и по этой причине имеет ограниченную область применения.

Таким образом, выражение (12), в отличие от эмпирических формул (1) и (2), отражает физический смысл влияния объема трансформаторного масла и его качества на пробивную напряженность. Кроме того, по сравнению с имеющимися работами [7], предложенная методика позволяет оценить нижний предел пробивной напряженности масла.

При расчетах электрической прочности масляных промежутков в высоковольтном маслонаполненном оборудовании важно знать изменение пробивной напряженности E_p при заданной вероятности пробоя P_3 в зависимости от объема масла.

В этом случае выражение (3) примет вид

$$F(m, E_p) = P_3 = 1 - \exp\left[-m\left(\frac{E_{p,m} - E_H}{E_{0,1} - E_H}\right)^{\alpha}\right]. \quad (13)$$

В результате преобразований из (13) находится выражение для определения пробивной напряженности $E_{p,m}$:

$$E_{p,m} = E_H + (E_{0,1} - E_H) \cdot \left[\frac{-\ln(1 - P_3)}{m}\right]^{1/\alpha}. \quad (14)$$

Заметим, что если в выражении (14) принять $P_3 = 1 - e^{-1}$, то формула (14) переходит в выражение (12), определяющее пробивную напряженность $E_{0,m}$.

Для реализации предложенного метода нужно определить параметры распределения пробивной напряженности для единичного образца. При этом следует выделить случаи большой и малой выборки экспериментальных данных. При большой выборке параметры распределения $E_{0,1}$, E_H , α находятся с применением (3), эмпирической функции распределения $F(1, E)$ и метода наименьших квадратов.

В случае малой выборки, что имеет место при испытании масла в стандартном маслопробойнике при шести пробоях, применение такого подхода требует привлечения дополнительных информационных эмпирических характеристик. В качестве таких характеристик можно принять среднее значение $\langle E \rangle$ и сред-

неквадратичное отклонение пробивной напряженности масла. Тогда следует связать эти характеристики с параметрами рассматриваемого распределения Гнеденко-Вейбулла для различных объемов масла.

В общем виде выражения для математического ожидания и дисперсии пробивной напряженности соответственно запишутся [6]:

$$M(E) = \int_{E_H}^{\infty} E f(E) dE; \quad (15)$$

$$D(E) = \int_{E_H}^{\infty} (E - \langle E \rangle)^2 f(E) dE. \quad (16)$$

Дифференциальная функция распределения пробивной напряженности $f(E)$ найдется из (3):

$$f(m, E) = F'(m, E) = \frac{\alpha_m}{E_{0,1} - E_H} \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^{\alpha - 1} \times \exp \left[-m \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^{\alpha} \right]. \quad (17)$$

В качестве оценки математического ожидания выступает экспериментально определяемое значение средней пробивной напряженности [6], т. е. $M(E) = \langle E \rangle$, а для дисперсии $-D(E) = \sigma^2$.

Тогда выражения (15) и (16) с учетом вышеизложенного соответственно примут вид:

$$\frac{\alpha_m}{E_{0,1} - E_H} \int_{E_H}^{\infty} E \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^{\alpha - 1} \times \exp \left[-m \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^{\alpha} \right] dE = \langle E \rangle; \quad (18)$$

$$\frac{\alpha_m}{E_{0,1} - E_H} \left\{ \int_{E_H}^{\infty} E^2 \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^{\alpha - 1} \times \exp \left[-m \left(\frac{E - E_H}{E_{0,1} - E_H} \right)^{\alpha} \right] dE \right\} - \langle E \rangle^2 = \sigma^2. \quad (19)$$

В результате параметры распределения найдутся из (18) и (19) численными методами. Для ускорения решения этой задачи важно установить диапазоны изменения определяемых параметров. Так, в соответствии с [8], диапазон изменения параметра α составляет $2,0 < \alpha < 3,3$. Для параметра E_H имеем $0 < E_H < \langle E \rangle$. Оценку диапазона изменения параметра $E_{0,1}$ можно получить из (3) для единичного образца при анализе соотношения

$$\frac{E_{0,1}}{\langle E \rangle_1} = \frac{1}{N} - \frac{E_H}{\langle E \rangle_1} \left(\frac{1}{N} - 1 \right), \quad (20)$$

где $N = \ln[-(1 - F(\langle E \rangle_1))]^{1/\alpha}$.

С учетом вышеуказанных диапазонов изменения параметров α и E_H диапазон изменения соотношения $E_{0,1}/\langle E \rangle_1$ в соответствии с выражением (20) определяется как

$$1,0 < (E_{0,1}/\langle E \rangle_1) < 1,2. \quad (21)$$

Выражение (21) указывает на близость значений параметров $E_{0,1}$ и $\langle E \rangle_1$.

Далее проведем сопоставление результатов расчета по предложенной методике с экспериментальными данными при различных объемах трансформаторного масла. С учетом имеющихся в специальной литературе сведений для различных по качеству трансформаторных масел, сопоставление расчетных и экспериментальных результатов целесообразно провести с применением относительных значений электрической прочности масла. В качестве базисной величины удобно принять объем масла для единичного образца ($m = 1$), а в качестве основной характеристики принять параметр E_0 . Тогда выражение (12) в относительных единицах примет вид

$$\frac{E_{0,m}}{E_{0,1}} = \frac{E_H}{E_{0,1}} + \frac{1}{m^{1/\alpha}} \left(1 - \frac{E_H}{E_{0,1}} \right). \quad (22)$$

На рис. 2 представлена рассчитанная по (22) зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от его объема, а также экспериментальные данные по [9] при $(E_H/E_{0,1}) = 0,68$, $\alpha = 2,2$. Отмечается, что в диапазоне исследуемых кратностей изменения объема масла $1 \leq m \leq 80$ наблюдается хорошее совпадение полученных по выражению (12) и экспериментальных результатов.

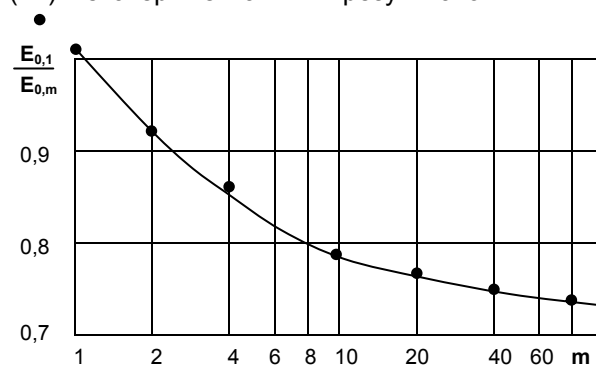


Рис. 2. Зависимость пробивной напряженности трансформаторного масла от его объема ($m = V_m / V_1$): ● — эксперимент по [9] ($V_1 = 5 \cdot 10^2 \text{ см}^3$); — — расчет по (22)

Заключение

Предложенный метод оценки статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла позволяет более

обоснованно учитывать влияние объема и качества масла на их изменение. При этом определяется нижний предел пробивной напряженности масла, имеющий большое значение при выборе главной изоляции силовых высоковольтных трансформаторов.

Список литературы

1. **Изоляция** установок высокого напряжения: учеб. для вузов / под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. С.-Петербургское отделение, 2003. – 608 с.
2. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
3. **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.
4. **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: VII International Symposium on High Voltage Engineering / – Dresden, 1991.
5. **РТМ 16.800.853-81.** Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110–750 кВ. Методика расчета изоляции между обмотками. 1981.
6. **Гумбель Э.** Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. – 351 с.
7. **Электрофизические основы техники высоких напряжений:** учеб. для вузов / под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионовой. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
8. **Митькин Ю.А., Вихарев А.В., Прусаков М.В.** Оценка нижнего предела пробивного напряжения трансформаторного масла по результатам эксплуатационных испытаний / Электрическая изоляция – 2010: сб. науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 302 с.
9. **Nelson J., Salvage B., Sharpley W.** Electric strength of transformer oil large electrode areas // Proc. IEEE. – 1971. – Vol. 118. – № 2.

Митькин Юрий Алексеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
e-mail: mua@vetf.ispu.ru

Мельникова Ольга Сергеевна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант,
e-mail: mua@vetf.ispu.ru

References

1. *Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya: ucheb. dlya vuzov* [Insulation of High-voltage Installations: Guide for Institutions of Higher Education], Sankt-Petersburg: Energoatomizdat. St. Petersburg dep-t, 2003, 608 p.
2. **Tikhomirov, P.M.** *Raschet transformatorov: ucheb. posobie dlya vuzov* [Calculation of Transformers: Guide for Institutions of Higher Education], Moscow: Energoatomizdat, 1986, 528 p.
3. **Lohanin, A.K., Larin, V.S., Matveev, D.A.** *Elektrichestvo*, 2005, issue 3, pp. 82–85.
4. **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, in Transformerboard Interface: VII International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 1991.
5. **RTM 16.800.853-81.** *Transformatory silovye maslyanye obshchego naznacheniya klassov napryazheniya 110–750 kV. Metodika rascheta izolyatsii mezhdru obmotkami* [Power Oil Transformers of general-duty voltage classes 110–750 kV. Methodology of insulation calculation between windings], 1981.
6. **Gumbel', E.** *Statistika ekstremal'nykh znacheniy* [Statistics of Extreme Values], Moscow: Mir, 1965, 351 p.
7. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy: ucheb. dlya vuzov* [Electrophysical Foundations of High Voltage Engineering: Guide for Institutions of Higher Education], Moscow: Energoatomizdat, 1993, 543 p.
8. **Mit'kin, Yu.A., Vikharev, A.V., Prusakov, M.V.** Ot-senka nizhnego predela probivnogo napryazheniya transformatornogo masla po rezul'tatam ekspluatatsionnykh ispytaniy [Evaluation of lower bound of transformer oil breakdown voltage according to results of operation tests], in *Elektricheskaya izolyatsiya – 2010: sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electrical Insulation – 2010: Collected works of the 5th international scient. and tech. conf.], Sankt-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikeskogo universiteta, 2010, 302 p.
9. **Nelson, J., Salvage, B., Sharpley, W.** Electric strength of transformer oil large electrode areas, in Proc. IEEE, 1971, vol. 118, no. 2.