

isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

11. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. *ETZ*, 1917, pp. 47–48.

12. Peters, J.F., Slepian, J. Voltage Induced by Foreign Grounds. *Tr. AIEE*, 1928, P. 478.

13. Khalilov, F.Kh., Evdokunin, G.A., Polyakov, V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV grids against overvoltages]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2002. 272 p.

14. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk'yantsev, N.M. Dugovye замыканиа на zemlyu v kabel'nykh setyakh [Arc earth fault in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

15. Belyanin, A.A., Lachugin, V.F., Ivanov, S.V. Opyt vnedreniya selektivnoy zashchity ot замыканий на zemlyu v seti 6–35 kV [Experience in implementing selective protection against earth faults in 6–35 kV network]. *Releyshchik*, 2013, no. 2, pp. 24–27.

Тютиков Владимир Валентинович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, проректор по научной работе, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов, e-mail: tvv@ispu.ru
Tyutikov Vladimir Valentinovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Vice-Rector for Research, Head of Technological Processes Automation Department, e-mail: tvv@ispu.ru

Кутумов Юрий Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: rza@rza.ispu.ru
Kutumov Yuri Dmitriyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Master student of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: rza@rza.ispu.ru

Шадрикова Татьяна Юрьевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: stu@rza.ispu.ru

Shadrikova Tatyana Yuryevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: stu@rza.ispu.ru

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: vshuin@mail.ru

Shuin Vladimir Alexandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, telephone (4932) 26-99-06, e-mail: vshuin@mail.ru

УДК 621.321

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

О.С. МЕЛЬНИКОВА

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В целях продления сроков службы и обеспечения работоспособности маслонеполненного трансформаторного оборудования в эксплуатации большое внимание уделяется разработке методов контроля состояния их маслобарьерной изоляции. При контроле технического состояния трансформаторного масла определяется класс чистоты жидкости в зависимости от номинального

напряжения оборудования, вместе с тем влияние параметров механических примесей на пробивное напряжение не учитывается, тем самым требования к качеству маслобарьерной изоляции занижаются. В связи с этим актуальным является исследование влияния распределения частиц примесей по размеру на электрическую прочность внутренней изоляции силовых трансформаторов и определение параметров частиц механических примесей для обоснования занижения показателей качества трансформаторного масла в эксплуатации.

Материалы и методы. Использованы методы математической статистики с применением распределения Гнеденко-Вейбулла на основе нормативных значений классов чистоты жидкости. Определение максимальных и минимальных напряжений осуществлялось на основе нормативных значений средних пробивных напряжений и результатов эксплуатационных испытаний трансформаторного масла в стандартном разряднике.

Результаты. Установлена связь размера частиц механических примесей и пробивного напряжения трансформаторного масла. Получено распределение частиц примесей по размерам для 12-го и 13-го классов чистоты жидкости для силовых трансформаторов напряжением 110–750 кВ. Найден диапазон размера частиц, определяющий максимальные и минимальные значения пробивных напряжений, установлены значения предельных концентраций механических частиц.

Выводы. Полученные параметры частиц примесей, определяющие максимальные и минимальные пробивные напряжения эксплуатационных масел, могут использоваться для оценки показателей технического состояния при диагностировании внутренней изоляции силовых трансформаторов в целях повышения их эксплуатационной надежности, а также для корректировки нормативных требований к качеству эксплуатационного трансформаторного масла по содержанию механических примесей.

Ключевые слова: трансформатор, трансформаторное масло, пробивное напряжение, статистические характеристики электрической прочности, механические примеси, класс чистоты жидкости

IMPACT OF DISTRIBUTION OF IMPURITY PARTICLES ON ELECTRIC STRENGTH OF TRANSFORMER OIL

O.S. MELNIKOVA

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Abstract

Background. To extend the service life and ensure the operability of oil-filled transformer equipment, the attention is paid to the development of methods for monitoring the state of oil-barrier insulation. When monitoring the technical condition of transformer oil, the class of liquid purity is determined depending on the rated voltage of the equipment. However, the influence of the parameters of mechanical impurities on the breakdown voltage is not taken into account, thereby lowering the requirements for the quality of oil barrier insulation. This makes it relevant to study the influence of the size distribution of impurity particles on the electric strength of the internal insulation of power transformers and determine the parameters of particles of mechanical impurities to justify the underestimation of the quality indicators of transformer oil in operation.

Materials and methods. Methods of mathematical statistics were employed using the Gnedenko-Weibull distribution based on the standard values of liquid purity classes. To determine the maximum and minimum voltages, the standard values of the average breakdown voltages and the results of operational tests of transformer oil in a standard spark gap were used.

Results. The relation between the particle size of mechanical impurities and the breakdown voltage of transformer oil has been established. The particle size distribution of impurities has been obtained for 12 and 13 classes of liquid purity for power transformers with a voltage of 110–750 kV. The particle size range that defines the maximum and minimum breakdown voltages has been determined, and the values of limit concentrations of mechanical particles have been established.

Conclusions. The obtained parameters of impurity particles which determine the maximum and minimum breakdown voltages of the operating oils can be used to evaluate the technical condition when diagnosing the internal insulation of power transformers in order to increase their operational reliability, as well as to adjust the regulatory requirements for the quality of operational transformer oil according to the content of mechanical impurities.

Key words: transformer, transformer oil, breakdown voltage, electric strength, statistical characteristics, mechanical impurities, liquid purity class

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.041-049

Введение. В процессе эксплуатации силовых маслонаполненных трансформаторов происходит снижение электрической прочности маслосодержащей изоляции [1, 2]. Уменьшение электрической прочности трансформаторного масла наблюдается при постепенном возрастании содержания механических примесей в масле. Примеси возникают в процессе изготовления изоляции, при эксплуатации из-за отрыва частиц от твердых барьеров из электротехнического картона, а также при старении масла и оказывают значительное влияние на изоляцию всей конструкции [3].

В целях продления сроков службы и обеспечения работоспособности силовых трансформаторов в эксплуатации [4, 5] актуальным становится решение задачи совершенствования методов контроля состояния маслосодержащей изоляции и устаревшей нормативно-технической документации [6]. Используемые классы напряжения стали значительно выше, а требования к трансформаторному маслу остались прежними. В настоящее время в РФ для эксплуатационных трансформаторных масел, используемых в высоковольтном оборудовании, в соответствии с РД 34.45-51.300-97¹ принят межгосударственный стандарт ГОСТ 17216 – 2001², по которому определяются классы чистоты жидкости в зависимости от числа частиц загрязнителя. С учетом классов напряжения для обеспечения заданного уровня электрической прочности изоляции нормативные значения классов чистоты жидкости установлены соответственно для оборудования напряжением до 220 кВ – 13-й класс, для оборудования напряжением от 220 до 750 кВ – 12-й класс. С повышением класса напряжения требования к качеству масла на наличие механических примесей ужесточаются, номер класса чистоты жидкости при этом уменьшается.

В научно-технической литературе обсуждается вопрос улучшения качества трансформаторных масел в РФ. Предлагаются варианты, устанавливающие классы

чистоты масла 10 и 11 в зависимости от классов напряжения оборудования. Нормативные показатели, принятые в РФ³, отличаются от рекомендуемых международными организациями СИГРЭ и МЭК⁴ в сторону уменьшения качества изоляции. По рекомендации СИГРЭ, предусмотрен для эксплуатации 9-й класс чистоты жидкости [3]. Повышение качества трансформаторного масла по параметру содержания механических частиц примесей встречает сопротивление со стороны эксплуатирующих энергетических предприятий, так как это влечет дополнительные эксплуатационные расходы. К этому следует добавить повышение качества трансформаторного масла, которое оценивается по коэффициенту вариаций пробивных напряжений. Согласно ГОСТ 1516.3-96⁵, он должен быть менее 20 %. На основе накопленного опыта по анализу пробивных напряжений масла в стандартном разряднике наиболее вероятный коэффициент вариаций находится в диапазоне 4–5 % (максимальное значение достигает 8–9 %) [7]. По стандарту, принятому в США, коэффициент вариаций составляет 6 %⁶.

С учетом вышеизложенного в исследованиях поставлены и решены задачи по определению распределения частиц примесей по размерам с учетом классов чистоты жидкости и их влияния на характеристики электрической прочности трансформаторного масла. На основе разработанной методики по оценке распределения частиц примесей по размерам найдены параметры частиц для 12-го и 13-го классов чистоты жидкости, которые определяют минимальные и максимальные пробивные напряжения в стандартном разряднике.

Методика исследования. Определение и анализ влияния распределения частиц примесей на характеристики электрической прочности трансформаторного масла проводились с применением методов математической статистики [8, 9].

³ Там же.

⁴ IEC 60422(2013). Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance.

⁵ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81). Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.

⁶ ASTM D1816-67 (1971, США). Метод определения пробивного напряжения нефтяных электроизоляционных масел с помощью VDE-электродов // Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов / пер. с англ. под ред. проф. Н.В. Александрова. – М.: Энергия, 1979.

¹ РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под ред. Б.А. Алексева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – Изд. 6-е, с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.

² ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – Введ. 2001. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001.

Распределение частиц примесей по размеру с 3 по 15 класс для каждого класса чистоты жидкого диэлектрика получено в соответствии со стандартом ГОСТ 17216-2001⁷ и представлено в табл. 1.

Функция распределения частиц примесей $F(l)$ по размерам может быть описана трехпараметрическим распределением Гнеденко-Вейбула [10, 11]:

$$F(l) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{l-l_H}{l_0-l_H}\right)^\alpha\right), \quad (1)$$

где α – мера крутизны зависимости $F(l)$; l_H – нижний предел размера частиц в соответствии с классом чистоты жидкости; l_0 – значение параметра при $F(l) = 1 - e^{-1} = 0,631$; $l = l_H$ – при $F(l_H) = 0$; $l \rightarrow \infty$ – при $F(l \rightarrow \infty) = 1$.

На основании (1) простое экспоненциальное распределение при $\alpha = 1$ имеет вид

$$F(l) = 1 - \exp\left(-\frac{l-l_H}{l_0-l_H}\right). \quad (2)$$

Для определения параметров распределения необходимо подобрать показатель степени, чтобы выполнялось условие

$$F(l_M) = F_{\text{эксп}}(l_M), \quad (3)$$

где $F_{\text{эксп}}(l_M)$ – экспериментальное значение функции распределения частиц примесей в характерной точке A при размере частицы l_M .

Зависимость экспериментальной функции распределения частиц механических примесей от диапазона размеров частиц для определения параметров распределения представлена на рис. 1.

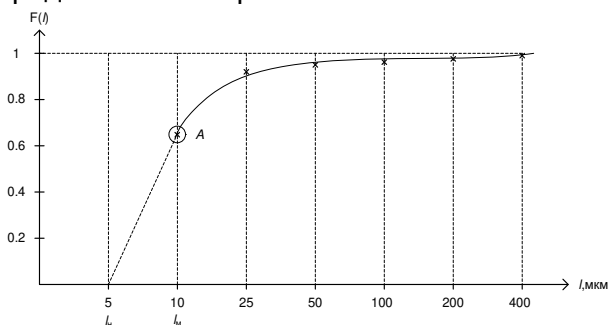


Рис. 1. Зависимость экспериментальной функции распределения частиц механических примесей от диапазона размеров частиц

Экспериментальное значение функции распределения частиц примесей примет следующий вид:

$$F(l) = 1 - \exp\left(-A\left(\frac{l-l_H}{l_0-l_H}\right)\right). \quad (4)$$

Плотность вероятности этого распределения есть производная

$$F'(l) = \frac{A}{l_H} \cdot e^{\left(-A\left(\frac{l-l_H}{l_0-l_H}\right)\right)}, \quad (5)$$

где A – безразмерный параметр, который определяется с применением (1).

Необходимо подобрать показатель степени, чтобы выполнялось вышеприведенное условие (3). При выполнении данного условия

$$F_{\text{эксп}}(l_M) = 1 - e^{\left(-A\left(\frac{l_M-l_H}{l_0-l_H}\right)\right)}. \quad (6)$$

Выражение для параметра A примет вид

$$A = \frac{-\ln(1 - F_{\text{эксп}}(l_M))}{\frac{l_M-l_H}{l_0-l_H}}. \quad (7)$$

В результате проделанного анализа получены полуэмпирические выражения функции распределения частиц примесей – интегральная и дифференциальная формы:

$$F(l) = e^{\left(-A\left(\frac{l-l_H}{l_0-l_H}\right)\right)}; \quad (8)$$

$$f(l) = F'(l) = \frac{A}{l_H} \cdot e^{\left(-A\left(\frac{l-l_H}{l_0-l_H}\right)\right)}. \quad (9)$$

Далее определяются статистические параметры распределения частиц примесей по размеру в зависимости от класса чистоты жидкости.

Значения l_0 для каждого класса чистоты жидкого диэлектрика определяются с помощью метода наименьших квадратов:

$$\Phi'(l) = \sum_{l=1}^n (F(l) - F_{\text{эксп}}(l))^2 = 0; \quad (10)$$

$$\Phi'(l) = \sum_{l=1}^n \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{l-l_H}{l_0-l_H}\right)\right) - F_{\text{эксп}}(l)\right)^2 = 0. \quad (11)$$

Погрешности интегральной расчетной и экспериментальной функций распределения оцениваются следующим образом:

$$\delta = \frac{F_{\text{расч}}(l) - F_{\text{эксп}}(l)}{F_{\text{эксп}}(l)} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Результаты полученных вычислений представлены в табл. 2.

⁷ ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – Введ. 2001. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.

Таблица 1. Определение экспериментального распределения частиц примесей по размеру для каждого класса чистоты жидкого диэлектрика

Классы чистоты жидкости	Экспериментальная функция распределения частиц механических примесей по размерам					
	свыше 5 до 10, мкм	свыше 10 до 25, мкм	свыше 25 до 50, мкм	свыше 50 до 100, мкм	свыше 100 до 200, мкм	волокна 200–400, мкм
3	0,631	0,949	0,989	0,999		
4	0,641	0,961	0,991	0,998		
5	0,641	0,962	0,994	0,999	1,0	
6	0,641	0,962	0,994	0,998	0,999	1
7	0,641	0,962	0,994	0,998	0,999	1
8	0,642	0,962	0,994	0,998	0,999	1
9	0,642	0,9629	0,99498	0,99905	1	1
10	0,642	0,963	0,9951	0,9991	1,0001	1
11	0,638	0,962	0,994	0,998	0,999	0,9992
12	0,642	0,9629	0,99498	0,99905	0,99947	0,9997
13	–	0,896	0,9856	0,997	0,9998	1
14	–	0,896	0,986	0,997	0,9994	1
15	–	–	0,859	0,967	0,994	0,999

Таблица 2. Статистические параметры распределения частиц примесей по размерам в зависимости от класса чистоты жидкости

Параметр распределения	Классы чистоты													
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
l_H , мкм	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10	25	
l_M , мкм	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	25	25	50	
l_H/l_M	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2,5	2,5	2	
l_0 , мкм	10,11	9,936	9,934	9,934	9,934	9,92	9,92	9,92	9,974	9,92	16,65	16,65	37,85	
A	0,997	1,013	1,024	1,024	1,024	1,027	1,027	1,027	1,027	1,027	1,5	1,509	1,509	
$F_{э,А}(l_M)$	0,631	0,637	0,641	0,641	0,641	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642	0,896	0,896	0,859	

Максимальное расхождение значений функций составило 3,421 % для 3-го класса чистоты жидкости. Среднее расхождение для всех классов чистоты жидкости составило 2,2 %.

Значения коэффициента A в зависимости от класса чистоты изменяется в пределах от 0,997 до 1,959. Для классов чистоты с 3 до 12 включительно параметр A изменяется вблизи 1. Однако для классов чистоты 13, 14 и 15 имеет место возрастание коэффициента A : $A = 1,5; 1,509; 1,959$ соответственно. Это обусловлено, видимо, тем, что экспериментальное распределение частиц сдвинуто в область больших значений размеров частиц, что влияет на параметры распределения. Значение параметра распределения l_0 при $F(l) = 1 - e^{-1} = 0,631$ для классов чистоты с 3 до 12 включительно находится вблизи 10 мкм, что совпадает с методикой расчета параметра A .

В результате для последующего определения распределения пробивной напряженности принимаются найденные аналитические выражения распределения вида (8) и (9).

Для определения среднего размера частиц с учетом нормативного распределения частиц по размерам выполнен анализ функции распределения случайной величины, представленной на рис. 2.

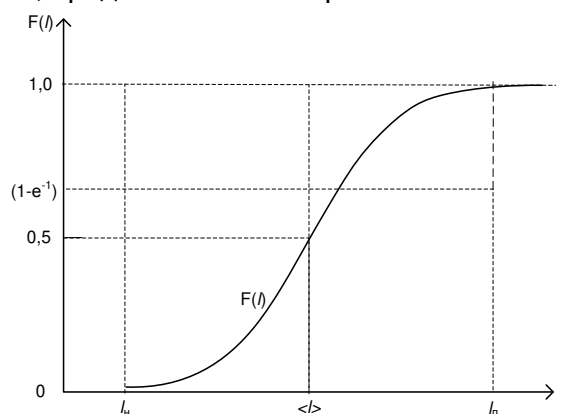


Рис. 2. Функция распределения случайной величины

Применительно к задачам техники высоких напряжений имеется ограничение слева $l \geq l_H$.

В дальнейшем анализе при определении среднего значения размера частиц $\langle l \rangle$ необходимо рассмотреть два вида граничных условий:

- 1) $l_n \leq l < \infty$;
- 2) $l_n \leq l < l_{\text{пред}}$.

Среднее значение случайной величины имеет вид [10]

$$\langle l \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} l \cdot f(l) dl. \quad (13)$$

Для первого вида граничных условий в нормативном распределении задана граница справа.

В соответствии с записанным выражением для среднего значения случайной величины (13) определяется среднее значение размеров частиц для нормативного распределения их по размерам:

$$\langle l \rangle = \int_{l_n}^{\infty} l \cdot \frac{A}{l_n} e^{-A \left(\frac{l}{l_n} - 1 \right)} dl. \quad (14)$$

Решение интеграла в правой части (14) позволит получить следующий результат:

$$\begin{aligned} l &= \int \left(l \cdot e^{-A \left(\frac{l}{l_n} - 1 \right)} \right) dl = \int \left(l \cdot e^{-\frac{A}{l_n} l + A} \right) dl = \\ &= \int \left(l \cdot e^{-\frac{A}{l_n} l} \cdot e^A \right) dl = e^A \int l \cdot e^{-\frac{A}{l_n} l} dl. \end{aligned} \quad (15)$$

Полученный интеграл является табличным. В результате раскрытия выражение примет следующий вид:

$$\langle l \rangle = l_n \left(1 + \frac{1}{A} \right). \quad (16)$$

Анализ полученного выражения (16) показывает, что среднее значение размера частиц при заданном аналитическом выражении зависит от значения нижнего предела l_n и безразмерного параметра A .

Предыдущий анализ показал, что значение коэффициента A для подавляющего количества классов чистоты находится вблизи 1.

Нижний предел распределения l_n для этих классов имеет одинаковое значение (исключение составляют классы чистоты 13,14,15, для которых имеет место сдвиг нижнего предела в область больших значений). Классы 14 и 15 применительно к высоковольтному маслonaполненному оборудованию не рассматриваются.

Таким образом, для основных классов чистоты среднее значение размеров частиц примесей будет одинаковым.

Для второго случая граничных условий $l_n \leq l < l_n$, где l_n – предельное значение размера частиц в соответствии с классом чистоты жидкости. Распределение частиц примесей по размерам (13) остается прежним, изменяется верхний предел.

Решение интеграла в правой части выражения (14) позволит получить следующий результат для среднего значения размеров частиц примесей:

$$\langle l \rangle = \frac{e^A \cdot l_n}{A} e^{-\frac{A \cdot l_n}{l_n}} \left(-A \frac{l_n}{l_n} - 1 \right) + l_n \left(1 + \frac{1}{A} \right). \quad (17)$$

В предположении, что величина l_n возрастает ($l_n \rightarrow \infty$), выражение (17) принимает вид

$$\frac{e^A \cdot l_n}{A} e^{-\frac{A \cdot l_n}{l_n}} \left(-A \frac{l_n}{l_n} - 1 \right) \rightarrow 0. \quad (18)$$

Таким образом, выражение (17) для среднего значения размера частиц при $l_n \leq l \leq l_n$ и $l_n \rightarrow \infty$ будет иметь вид

$$\langle l \rangle = l_n \left(1 + \frac{1}{A} \right). \quad (19)$$

Анализ полученных результатов показал, что для второго вида граничных условий при больших значениях l_n выражение (19) для среднего значения размера частиц примесей будет аналогично выражению для первого вида граничных условий (16).

Таким образом, полученное выражение (17) при больших значениях l_n будет принимать вид выражения (19), т. е. средние распределения будут одинаковыми для большинства классов чистоты. Что касается небольших значений l_n , то их нужно исследовать дополнительно с учетом влияния размеров частиц на электрическую прочность масляной изоляции. Окончательное аналитическое распределение частиц примесей по размерам в результате имеет вид (19).

Для каждого класса чистоты число крупных частиц, определяющих минимальное пробивное напряжение, должно быть не менее $N_{\text{пред}}$. Минимальное пробивное напряжение масла будет определяться максимальным размером частиц, который указан в нормативном документе по классам чистоты. В качестве критерия пробы жидкого диэлектрика в разряднике рассматривается условие, при котором между электродами раз-

рядника будет находиться по крайней мере одна крупная частица:

$$n_{0,\text{пред}} V_p = 1, \quad (20)$$

где $n_{0,\text{пред}}$ – предельная концентрация частиц, при которой в объеме между электродами будет хотя бы одна частица; $V_p = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – объем масла между электродами стандартного разрядника по ГОСТ 1516.3-96.

Из (20) следует

$$n_{0,\text{пред}} = \frac{1}{V_p}. \quad (21)$$

В нормативной табл. 1 задано число частиц N , причем это число содержится в $V = 100 \text{ см}^3$. Тогда удельная концентрация будет рассчитываться по формуле

$$n_0 = \frac{N}{V}. \quad (22)$$

Для выполнения условия формирования пробоя концентрация масла должна быть не более $n_{0,\text{пред}}$. Следовательно, для того чтобы условие сохранилось, необходимо выполнение равенств (21) и (22). Тогда

$$N_{\text{пред}} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 50 \text{ частиц.}$$

С учетом полученного условия для каждого из классов чистоты жидкости возможно определить наибольший размер частиц, при котором выполняется это условие. Для каждого класса должно быть 50 частиц и более.

Результаты. Определение минимальных и максимальных пробивных напряжений в стандартном разряднике в зависимости от размера частиц. Следует учесть, что экспериментальные результаты, которые удается получить в лаборатории, занимают область вероятностей от 5–10 до 90–95 % по интегральной функции распределения. Для получения информации о пробивном напряжении при небольших вероятностях пробоя необходимо провести очень большое количество опытов.

Для оценки влияния частиц примесей принимаются во внимание результаты экспериментальных испытаний [8].

В данном случае (при определении границы частиц слева) трудно подобрать физическое обоснование критерия пробоя с учетом числа и размера частиц. Поэтому к этому вопросу можно подойти также на основе анализа эксплуатационных испытаний масла на пробой. В ряде стран в качестве одного из показателей электрической проч-

ности масла используют диагностический статистический параметр

$$k_{Up} = \frac{U_{p,\text{макс}}}{U_{p,\text{мин}}}. \quad (23)$$

По стандарту ASTM D1816-67 (1971, США)⁹, k_{Up} составляет значение менее 1,33.

По результатам анализа эксплуатационных испытаний трансформаторного масла в РФ, значение k_{Up} может достигать до 2. Можно ожидать значение и до 3 кратностей [8].

Минимальное значение пробивных напряжений, в соответствии с РД 34.45-51.300-97 (табл. 25.4)¹⁰, для класса 110 кВ составляет 35 кВ и принят 13-й класс чистоты. Для напряжения более 220 кВ и до 750 кВ включительно предусматривается 12-й класс чистоты масла и минимальное среднее пробивное напряжение составляет 45 кВ. Для данного класса чистоты ограничение размера частиц справа 100–200 мкм.

Для класса напряжения 110 кВ в эксплуатации трансформаторного масла наибольшая вероятность среднего пробивного напряжения в стандартном разряднике составляет 50–60 кВ. Для высших классов напряжения эксплуатационные данные показывают, что наибольшая вероятность значений среднего пробивного напряжения в стандартном разряднике составляет 70–80 кВ.

Тогда пробивное напряжение для трансформаторного масла, предназначенного для класса оборудования 110 кВ, изменяется с 35 до 70 кВ. Минимальное пробивное напряжение $U_{p,\text{мин}} = 35 \text{ кВ}$ будет определяться крупными частицами – 200 мкм.

Зная найденный размер, определяющий значения пробивного напряжения, с учетом кратности максимального и минимального напряжения и функциональной зависимости U_p можно определить размер частиц, которые будут определять максимальные пробивные напряжения:

$$l = \frac{\langle l \rangle}{k_{Up}}. \quad (24)$$

⁹ ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – Введ. 2001. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.

¹⁰ РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под ред. Б.А. Алексева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – Изд. 6-е, с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.

С учетом (19) для 13-го класса чистоты жидкости (соответственно при $l_n = 100$ мкм)

$$\langle l \rangle = 100 \left(1 + \frac{1}{1,05} \right) = 166,7 \text{ мкм.}$$

Для оценки нижнего предела по размеру частиц (минимальный размер) с учетом (24) можно оценить искомый размер:

$$l_{\min} = \frac{166,7}{1,33} = 125,3 \text{ мкм.}$$

В эксплуатации кратность максимального и минимального напряжения, как отмечено выше, составляет 2. С учетом этого наименьший размер рассчитывается как

$$l_{\min} = \frac{166,7}{2} = 83,3 \text{ мкм.}$$

Вместе с тем, как было отмечено выше, k_{Up} может достигать значения 3, тогда

$$l_{\min} = \frac{166,7}{3} = 55,6 \text{ мкм.}$$

Для 12-го класса чистоты жидкости $l_{\min} = 65,7$ мкм.

Таким образом, определены изменения размеров частиц в диапазоне от 65,7 до 200 мкм для 12-го класса чистоты и от 55,6 до 200 мкм для 13-го класса чистоты, которые соответствуют максимальному и минимальному значениям пробивных напряжений.

Выводы. На основе нормативных значений всех классов чистоты жидкости с применением распределения Гнеденко-Вейбулла определены статистические параметры механических частиц примесей по размеру в зависимости от класса чистоты жидкости.

По результатам исследования получено распределение частиц примесей по размерам для 12-го и 13-го классов чистоты жидкости, при котором найден диапазон размера частиц, определяющий максимальное и минимальное пробивные напряжения и устанавливающий соответствующую концентрацию этих частиц по размерам в соответствии с нормативным распределением частиц по размерам. Определена связь размера частиц примесей и пробивного напряжения трансформаторного масла.

С понижением качества жидкости (номер класса чистоты уменьшается) размеры допустимых частиц, определяющих пробивное напряжение жидкости, уменьшаются. Ограничение распределения частиц примесей по размеру справа (см. рис. 1) с увеличением качества жидкости сдвигается влево, в область меньших значений размеров частиц, что свидетельствует о том, что норма-

тивные показатели отличаются в сторону понижения качества масляной изоляции силовых трансформаторов.

Список литературы

1. **Львов М.Ю.** Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // *Электричество*. – 2010. – № 2. – С. 27–31.

2. **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.

3. **Методологические** аспекты развития частичных разрядов и контроля изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации / М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов, В.Б. Комаров и др. // *Энергетик*. – 2017. – № 9. – С. 16–20.

4. **Прогнозирование** срока службы силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей / А.В. Майоров, М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов и др. // *Энергетик*. – 2018. – № 11. – С. 17–20.

5. **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.

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. **Митькин Ю.А., Мельникова О.С.** Диагностические статистические характеристики пробивных напряжений масла действующих силовых трансформаторов 110 кВ // *Вестник ИГЭУ*. – 2016. – Вып. 3. – С. 40–46.

8. **Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1965. – 512 с.

9. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

10. **Гумбель Э.** Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. – 351 с.

11. **Техника** высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров и др.; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 2003. – 608 с.

References

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

2. Vanin, B.V., L'vov, Yu.N., L'vov, M.Yu. O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov

napryazheniem 110–500 kV v ekspluatatsii [Damage of power transformers with voltage 110–500 kV during exploitation]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 9, pp. 53–58.

3. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Komarov, V.B., Kulyukhin, S.A., Mit'kin, Yu.A., Vdoviko, V.P. Metodologicheskie aspekty razvitiya chastichnykh razryadov i kontrolya izolyatsii silovykh transformatorov v ekspluatatsii [Methodological aspects of the development of partial discharges and insulation control of power transformers during operation]. *Energetik*, 2017, no. 9, pp. 16–20.

4. Mayorov, A.V., L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Komarov, V.B., Ershov, B.G. Prognozirovaniye sroka sluzhby silovykh transformatorov i avtotransformatorov elektricheskikh setey [Prediction of operating age of power transformer and electric networks autotransformers]. *Energetik*, 2018, no. 11, pp. 17–20.

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

6. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Cherezov, A.V. Razvitiye sistemy normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii dlya obespecheniya ekspluatatsionnoy

nadezhnosti silovykh transformatorov i avtotransformatorov napryazheniem 110 kV i vyshe [Development of system of technical documentation to ensure operational reliability of power transformers and autotransformers of 110 kV and above]. *Elektricheskie stantsii*, 2013, no. 11, pp. 54–59.

7. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Diagnosticheskie statisticheskie kharakteristiki probivnykh napryazheniy masla deystvuyushchikh silovykh transformatorov 110 kV [Diagnostic statistical characteristics of oil breakdown voltage of 110 kV power transformers]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 3, pp. 40–46.

8. Smirnov, N.V., Dunin-Barkovskiy, I.V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy* [The course of probability theory and mathematical statistics for technical applications]. Moscow: Nauka, 1965. 512 p.

9. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 1969. 576 p.

10. Gumbel', E. *Statistika ekstremal'nykh znacheniy* [Statistics of extreme values]. Moscow: Mir, 1965. 351 p.

11. Bogatenkov, I.M., Bocharov, Y.N., Gumerova, N.I. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [Technique of high voltages]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. 608 p.

Мельникова Ольга Сергеевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, адрес: Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 124, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Melnikova Olga Sergeevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate professor of the Department of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electrophysics, address: 34 Rabfakovskaya street, building A, room 124, Ivanovo, Russia, 153003, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

УДК 621.316.925

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДАЛЬНЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТОКИ ПИТАЮЩИХ СТОРОН, ДЛЯ ЛИНИИ С НЕСКОЛЬКИМИ ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Л.М. КОЛЕСОВ¹, В.В. МОЖЖУХИНА²,

¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

²ООО «ВиВа Энерго», г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mvv277@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса. На ЛЭП 110–220 кВ в качестве резервной защиты от междуфазных коротких замыканий используется третья ступень дистанционной защиты. Основной проблемой ее использования при наличии на линии нескольких ответвлений является обеспечение эффективности дальнего резервирования при коротких замыканиях за трансформаторами ответвлений. Решение проблемы дальнего резервирования возможно при расширении информационно-формационной базы защиты. В настоящее время выпол-