

УДК 621.321

Диагностические статистические характеристики пробивных напряжений масла действующих силовых трансформаторов 110 кВ

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Совершенствование методов диагностики внутренней изоляции маслонаполненных трансформаторов обусловило применение для диагностирования этой изоляции статистических характеристик электрической прочности масла, которые определяются по результатам его испытаний в стандартном маслопробойнике. Эффективность применения таких диагностических характеристик зависит от их изученности и установления их нормативных параметров. В связи с этим актуальным является проведение исследований, позволяющих более обоснованно выбрать диагностические статистические характеристики пробивных напряжений эксплуатационных масел и их нормативных показателей, отражающих особенности работы трансформаторов.

Материалы и методы: Диагностические статистические характеристики пробивных напряжений эксплуатационных масел определены с использованием результатов эксплуатационных испытаний трансформаторного масла в маслопробойнике из действующих трансформаторов, которые обрабатывались методами теории вероятностей и математической статистики.

Результаты: Определены диагностические статистические характеристики пробивных напряжений эксплуатационных масел в маслопробойнике по традиционной методике и с применением параметров распределения Гнеденко-Вейбулла. Установлены пределы изменения значений этих характеристик и их соответствие нормативным значениям. Выявлено, что нормативное значение коэффициента вариации среднего пробивного напряжения обуславливает снижение требований к качеству эксплуатационного масла трансформаторов. Показано, что значения нижнего предела пробивного напряжения масла отражают наличие частиц примесей в масле.

Выводы: Полученные значения диагностических статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационных масел и их пределов изменения могут использоваться при выборе более обоснованных нормативных показателей диагностических характеристик внутренней изоляции трансформаторов в целях повышения их эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: диагностические характеристики, силовой трансформатор, трансформаторное масло, пробивное напряжение, электрическая прочность, статистические характеристики.

Diagnostic statistical characteristics of breakdown oil voltage of 110 kV power transformers in operation

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: Improvement of internal insulation diagnostic methods of oil-filled transformers made it possible to apply for insulation diagnosis the oil electric strength statistical characteristics which are determined by the results of oil tests in a standard oil-testing device. The efficiency of such diagnosis depends on how well these characteristics are known and on their standard values. In this regard, it is relevant to conduct studies that would enable a more reasonable choice of the statistical diagnostic characteristics of breakdown voltages of the operating oils and of their standard indicators reflecting the characteristics of transformer operation.

Materials and methods: Statistical diagnostic parameters of breakage voltages of operating oils were determined based on oil tests in an oil-testing device for the transformers in operation by applying methods of probability theory and mathematical statistical theory.

Results: Statistical diagnostic parameters of breakage voltages of operating oils in an oil-testing device were determined by traditional methods and by using the Weibull-Gnedenko distribution parameters. The variation of these characteristics range and their regulatory values were identified. It was revealed that the normative value of the average breakdown voltage variation coefficient causes reduction in requirements for operational quality of transformer oil. It was shown that the breakdown voltage lower limit value reflects presence of oil impurities inside oil.

Conclusions: The obtained values of operational oil breakdown voltage statistical diagnostic characteristics and their variation ranges can be used to set up more reasonable limits of internal isolation transformer diagnostic parameters in order to increase transformer operational reliability.

Key words: diagnostic parameters, power transformer, transformer oil, breakdown voltage, electrical strength, statistical performance.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.040-046

Анализ эксплуатационной надежности силовых маслонаполненных трансформаторов [1, 2] показал, что основной причиной их отказов является снижение электрической прочности внутренней изоляции. При ограниченных возможностях замены оборудования актуальным становится вопрос о разработке новых методов обеспечения работоспособности силовых трансформаторов в эксплуатации [3, 4].

В нормативных документах России¹ и зарубежных стран² при определении технического состояния внутренней изоляции силовых трансформаторов в качестве диагностического параметра предусмотрено применение среднего пробивного напряжения трансформаторного масла, определяемого по результатам его испытаний в стандартном маслопробойнике. Для обеспечения заданного уровня электрической прочности изоляции различных категорий электрооборудования нормативные значения среднего пробивного напряжения масла установлены с учетом их классов напряжений.

Однако в РД 34.45-51.300-97 не предусмотрен диагностический параметр, отражающий влияние разброса пробивного напряжения масла на статистические характеристики электрической прочности изоляции силовых трансформаторов и особенности работы электроизоляционных жидкостей в высоковольтном электрооборудовании. Вместе с тем при повышенном разбросе пробивных напряжений трансформаторного масла происходит увеличение вероятности пробоя масляных каналов в изоляции трансформаторов при меньших значениях воздействующего напряжения, что обуславливает снижение эксплуатационной надежности трансформаторов [5, 6].

Следует отметить, что при испытаниях жидких электроизоляционных материалов на пробой, по ГОСТ 6581-75³, предусмотрено определение среднего пробивного напряжения по 6 пробоям и его коэффициента вариации, характеризующего разброс пробивного напряжения. По этому стандарту, предельное значение коэффициента вариации установлено 20 %. Однако в этом случае коэффициент вариации пробивного напряжения от его среднего значения при числе пробоев в опыте $n = 6$ составляет 48,99 % [7], что существенно больше соответствующих значений коэффициента вариации пробивного напряжения

трансформаторного масла от его среднего значения для технически чистых минеральных масел (достигают 10–15 %) [8, 9]. Таким образом, применение нормативного значения коэффициента вариации 20 % применительно к маслу означает значительное снижение требований к качеству эксплуатационного трансформаторного масла, приводящее к возрастанию вероятности пробоя масляных каналов изоляции трансформаторов.

Вышеприведенные традиционные статистические характеристики пробивных напряжений масла являются параметрами нормального закона распределения случайной величины. В последнее время в качестве диагностических параметров изоляции электрооборудования рассматриваются параметры трехпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла [5, 10], которое отвечает физическому смыслу формирования пробоя в трансформаторном масле и содержит важный параметр – нижний предел пробивного напряжения [11].

Одновременно с этим проводятся работы по совершенствованию нормативно-технической документации [12], направленные на повышение качества изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации.

Важно также отметить, что в специальной научно-технической литературе мало уделяется внимания анализу результатов статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел в маслопробойнике, что затрудняет выбор и разработку более обоснованных диагностических статистических характеристик пробивных напряжений масла силовых трансформаторов и их нормативных показателей.

С учетом вышеизложенного поставлены и решены задачи по определению статистических характеристик пробивных напряжений эксплуатационных масел в маслопробойнике, выявлению диапазонов изменения и корреляционных связей этих диагностических характеристик для действующих силовых трансформаторов 110 кВ.

Методика исследования. Для исследований по результатам эксплуатационных испытаний была создана база данных пробивных напряжений трансформаторного масла из силовых трансформаторов с номинальным напряжением 110 кВ. В целом было исследовано масло из 74 трансформаторов, установленных в электрических сетях и на электростанциях.

Определение и анализ статистических характеристик пробивных напряжений трансформаторного масла проводились с применением стандартной методики⁴ и методов математической статистики [7]. При этом определялись следующие традиционные статистические характеристики пробивных напряжений масла:

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

² 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.

³ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81). Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.

⁴ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81).

- среднее арифметическое значение пробивного напряжения

$$\langle U_{\text{пр}} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\text{пр},i}; \quad (1)$$

- среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения пробивного напряжения

$$\sigma_{\langle U_{\text{пр}} \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{\text{пр},i} - \langle U_{\text{пр}} \rangle)^2}{n(n-1)}}; \quad (2)$$

- коэффициент вариации среднего пробивного напряжения

$$V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle} = \frac{\sigma_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}}{\langle U_{\text{пр}} \rangle} \cdot 100\%; \quad (3)$$

- среднее квадратическое отклонение пробивного напряжения от его среднего значения

$$\sigma_{U_{\text{пр}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{\text{пр},i} - \langle U_{\text{пр}} \rangle)^2}{(n-1)}}; \quad (4)$$

- коэффициент вариации пробивного напряжения

$$V_{U_{\text{пр}}} = \frac{\sigma_{U_{\text{пр}}}}{\langle U_{\text{пр}} \rangle} \cdot 100\%. \quad (5)$$

По методике [13] определялись статистические характеристики пробивных напряжений масла с применением трехпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла:

$$F(U) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U - U_{\text{н}}}{U_0 - U_{\text{н}}} \right)^\alpha \right], \quad (6)$$

где U_0 – пробивное напряжение, при котором $F(U_0) = 1 - e^{-1}$; $U_{\text{н}}$ – нижний предел пробивного напряжения; α – безразмерный параметр.

Статистические характеристики пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел. Исследование изменения традиционных диагностических статистических параметров показало, что средние пробивные напряжения эксплуатационных трансформаторных масел для всех исследуемых трансформаторов удовлетворяют нормативным требованиям⁵, т. е. $\langle U_{\text{пр}} \rangle > 35$ кВ (рис. 1). Среднее арифметическое значение среднего пробивного напряжения составляет 57 кВ, минимальное и максимальное значения – соответственно 40 и 74 кВ.

На рис. 2 представлена гистограмма распределения коэффициентов вариации $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$ и $V_{U_{\text{пр}}}$. Отмечается, что в эксплуатации наиболее вероятные значения коэффициента вариации $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$ находятся в диапазоне 5,52–6,33 %, среднее арифметическое значение $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$ составляет 4,7 %, минимальное и максимальное значения – соответственно 0,65 и 8,8 %. Полученные значения коэффициента вариации

$V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$ эксплуатационных масел существенно меньше нормативного значения 20 %⁶. Это указывает на то, что ГОСТ 6581-75 по диагностическому параметру $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$ допускает заниженное качество для эксплуатационных масел.

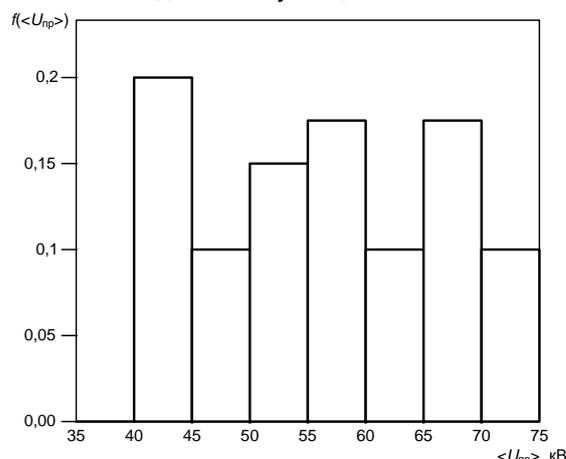


Рис. 1. Гистограмма распределения средних пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел

На рис. 3 представлены гистограммы распределения коэффициента вариации среднего пробивного напряжения трансформаторного масла в маслоробойнике при различных границах интервалов отклонений средних пробивных напряжений. Из приведенных данных следует, что фактически для всех интервалов коэффициента вариации $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$ наблюдаются наибольшие значения вероятности появления параметра $V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$ при повышенных значениях средних пробивных значений трансформаторного масла.

Диагностические статистические характеристики пробивных напряжений масла с применением трехпараметрического распределения Гнеденко-Вейбулла представлены на рис. 4–6. В эксплуатации значения отношения $U_0/U_{\text{н}}$ (рис. 4) наблюдаются с вероятностью более 20% в диапазоне 1,04–1,51, причем с вероятностью наблюдения 30 % значения этого отношения находятся в диапазоне 1,04–1,27, максимальное значение отношения $U_0/U_{\text{н}}$ составляет 3,4.

На рис. 5 представлена гистограмма распределения нижнего предела пробивных напряжений $U_{\text{н}}$ эксплуатационных трансформаторных масел. Среднее арифметическое значение пробивного напряжения $U_{\text{н}}$ составляет 37,8 кВ, что превышает значение среднего пробивного напряжения 35 кВ, установленного нормативом⁷. Вместе с тем наименьшие значения $U_{\text{н}}$ наблюдаются с вероятностью 27,5 % в диапазоне 20–25 кВ, что указывает на наличие в пробах масла крупных частиц примесей, приводящих к снижению пробивных напряжений этих масел [5, 14].

⁶ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81).

⁷ Там же.

⁵ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81).

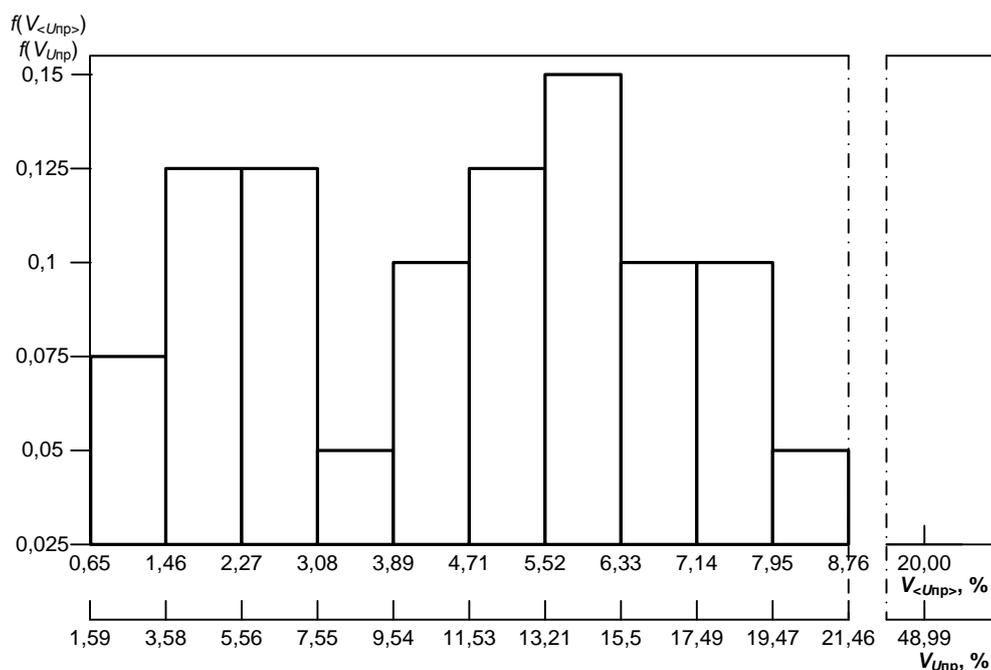


Рис. 2. Гистограмма распределения коэффициентов вариации $V_{<U_{пр>}}$ и $V_{U_{пр}}$

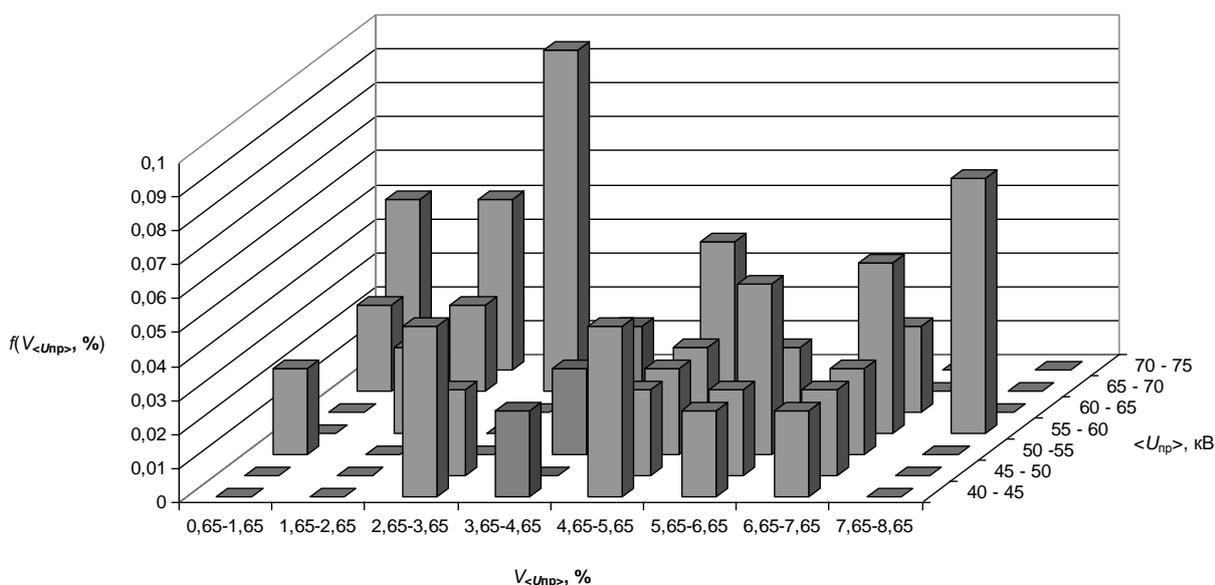


Рис. 3. Гистограммы распределения коэффициента вариации среднего пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике при различных границах интервалов отклонений средних пробивных напряжений

На рис. 6. представлены гистограммы распределения отношения U_0/U_H трансформаторного масла в маслопробойнике при различных границах интервалов отклонений параметра α . Для всех интервалов отношения U_0/U_H наблюдаются наибольшие значения вероятности появления отношения U_0/U_H при значениях параметра α в диапазоне 3,5–4,0.

Исследования корреляционных связей традиционных диагностических параметров и аналогичных параметров при использовании распределения Гнеденко-Вейбулла показали,

что между параметрами $<U_{пр}>$ и U_0 имеет место ярко выраженная положительная корреляция:

$$<U_{пр}> = 0,966 U_0 . \tag{7}$$

Коэффициент корреляции составляет 99,5 %. Различие параметров $<U_{пр}>$ и U_0 находится в пределах 3–4%.

Между отношением U_0/U_H и коэффициентом вариации $V_{<U_{пр>}}$ имеет место (рис. 7) положительная корреляция:

$$U_0/U_H = \exp(0,072 \cdot (V_{<U_{пр>}})^{1,319}) . \tag{8}$$

Коэффициент корреляции составляет 96,4 %.

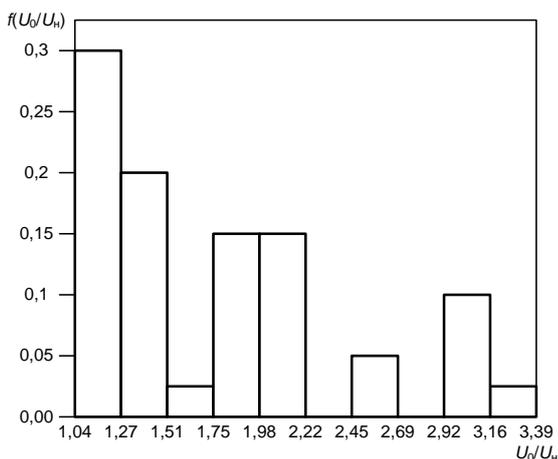


Рис. 4. Гистограмма распределения отношения U_0/U_n

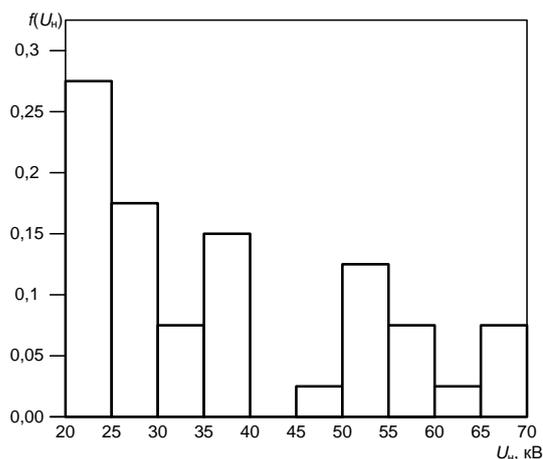


Рис. 5. Гистограмма распределения нижнего предела пробивных напряжений эксплуатационных трансформаторных масел

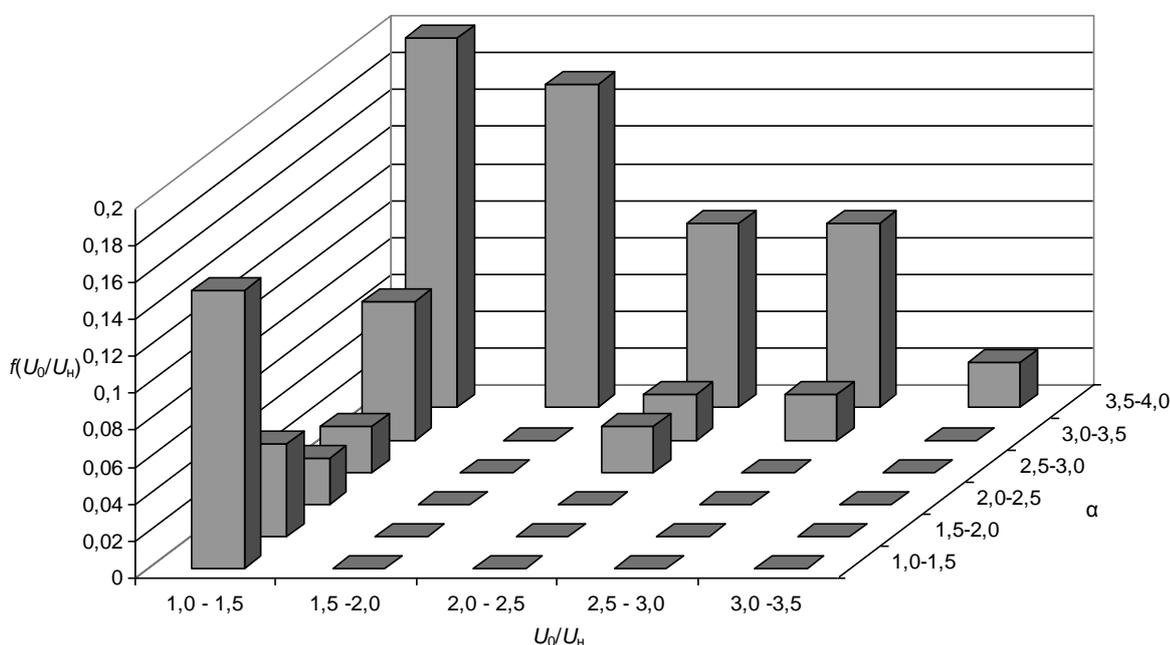


Рис. 6. Гистограммы распределения отношения U_0/U_n трансформаторного масла в пробойнике при различных границах интервалов отклонений параметра α

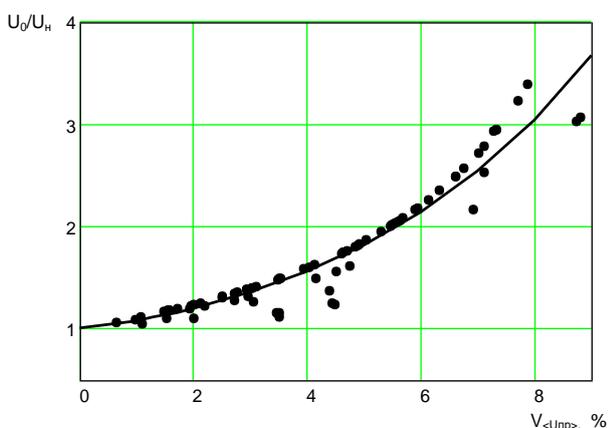


Рис. 7. Корреляционная связь отношения U_0/U_n и коэффициента вариации $V_{<U_{np}>}$

В ходе исследования отмечено также некоторое различие в значениях диагностиче-

ских статистических параметров эксплуатационных трансформаторных масел из действующих силовых трансформаторов, установленных в электрических сетях и на электростанциях, причем по исследованным диагностическим параметрам качество масел для станционных трансформаторов было выше.

Заключение

Для всех исследованных трансформаторов традиционные диагностические статистические характеристики пробивных напряжений эксплуатационных масел удовлетворяют нормативным требованиям.

Наибольшие значения коэффициента вариации среднего пробивного напряжения исследованных образцов масла в действующих трансформаторах не превышают 9 %, что

значительно меньше нормативного значения⁸ (20 %). Это подтверждает заниженные нормативные требования к качеству эксплуатационных масел.

Показано, что между средним пробивным напряжением $\langle U_{пр} \rangle$ и параметром U_0 имеет место линейная корреляция. Различие между ними находится в пределах 3–4 %. Установлена также корреляционная зависимость отношения U_0/U_n от коэффициента вариации $V_{\langle U_{пр} \rangle}$. Отношение параметров U_0/U_n находится в пределах 1,04–3,4, а наибольшая вероятность его появления – при значениях 1,0–1,51.

Среднее арифметическое значение нижнего предела пробивного напряжения U_n превышает значение среднего пробивного напряжения, установленного нормативом⁹. Вместе с тем для некоторых проб масла наблюдается заметное снижение значений U_n , что указывает на наличие в этих пробах масла крупных частиц примесей.

Список литературы

1. **О повреждениях** 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.
2. **Лоханин А.К., Соколов В.В.** Обеспечение работоспособности маслонаполненного оборудования после расчетного срока службы // Электро. – 2002. – № 1. – С. 10–16.
3. **Соколов В.В.** Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. – № 1. – С. 155–168.
4. **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.
5. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионовой. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543с.
6. **Эксплуатация** силовых трансформаторов при достижении предельно допустимых показателей износа изоляции обмоток / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов, Л.Н. Шифрин // Электрические станции. – 2004. – № 2. – С. 63–65.
7. **Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1965. – 512 с.
8. **Сканава Г.И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.
9. **Техника** высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, и др.; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с.
10. **Бортник И.М.** Физические свойства и электрическая прочность элегаза. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 77 с.
11. **Гумбель Э.** Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. – 351 с.
12. **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. 54–9.
13. **Митькин Ю.А., Мельникова О.С.** Метод определения статистических характеристик электрической

прочности трансформаторного масла с применением распределения Гнеденко-Вейбулла по результатам малой экспериментальной выборки // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 2. – С. 18–25.

14. **Kok J.A.** Electrical breakdown of insulating liquids. – New York: Interscience Publishers, 1961. – 132 с.

References

1. Vanin, B.V., L'vov, Yu.N., L'vov, M.Yu. O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniem 110–500 kV v ekspluatatsii [Damages of 110–500 kV power transformers under operation]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 9, pp. 53–58.
2. Lokhanin, A.K., Sokolov, V.V. Obespechenie rabotosposobnosti maslonapolnennogo oborudovaniya posle raschetnogo sroka sluzhby [Securing oil-filled equipment operation after estimated life cycle expiring]. *Elektro*, 2002, no.1, pp. 10–16.
3. Sokolov, V.V. Aktual'nye zadachi razvitiya metodov i sredstv diagnostiki transformatornogo oborudovaniya pod napryazheniem [Urgent problems of high-voltage transformer equipment methods and tools development]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 1997, no. 1, pp. 155–168.
4. 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»*, Moscow, 2008, issue 2, pp. 3–56.
5. Vereshchagin, I.P., Lariionova, V.P. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy* [Electrophysical basics of high voltage engineering]. Moscow, Energoatomizdat, 1993. 543 p.
6. Vanin, B.V., L'vov, Yu.N., L'vov, M.Yu., Shifrin, L.N. Ekspluatatsiya silovykh transformatorov pri dostizhenii predel'no dopustimyykh pokazateley iznosa izolyatsii obmotok [Operation of power transformers when reaching the maximum permissible wear values of the windings]. *Elektricheskie stantsii*, 2004, no. 2, pp. 63–65.
7. Smirnov, N.V., Dunin-Barkovskiy, I.V. *Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy* [A course of probability theory and mathematical statistics for technical applications]. Moscow, Nauka, 1965. 512 p.
8. Skanavi, G.I. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh poley)* [Physics of dielectrics (strong fields)]. Moscow, GIFML, 1958. 907 p.
9. Bogatenkov, I.M., Bocharov, Yu.N., Gumerova, N.I. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [High voltage engineering]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. 608 p.
10. Bortnik, I.M. *Fizicheskie svoystva i elektricheskaya prochnost' elegaza* [Physical properties and electric strength of sulfur hexafluoride]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 77 p.
11. Gumbel', E. *Statistika ekstremal'nykh znacheniy*. [Statistics of extreme values]. Moscow, Mir, 1965. 351 p.
12. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Cherezov, A.V. Razvitie sistemy normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii dlya obespecheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti silovykh transformatorov i avtotransformatorov napryazheniem 110 kV i vyshe [Development of standard technical documentation system to ensure operational reliability of ≥ 110 kV power transformers and autotransformers]. *Elektricheskie stantsii*, 2013, no. 11, pp. 54–59.
13. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Metod opredeleniya statisticheskikh kharakteristik elektricheskoy prochnosti transformatornogo masla s primeneniem raspredeleniya Gnedenko-Veybulla po rezul'tatam maloy eksperimental'noy vyborke [Method of determining statistical characteristics for electrical strength of transformer oil using Gnedenko–Weibull distribution based on the results of a small experimental sample]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 2, pp.18–25.
14. Kok, J.A. Electrical breakdown of insulating liquids. New York: Interscience Publishers, 1961. 132 p.

⁸ ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81).

⁹ Там же.

Митькин Юрий Алексеевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
телефон (4932) 26-97-23,
e-mail: mitkinya@mail.ru

Мельникова Ольга Сергеевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
e-mail: o.c.melnikova@mail.ru