

УДК 621.321

Влияние мощности и номинального напряжения действующих силовых трансформаторов на объем масла в главной изоляции

О.С. Мельникова

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
E-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время в литературе отсутствуют данные по анализу изменения объема масла в главной изоляции и его статистических характеристик электрической прочности в зависимости от номинальных технических параметров действующих силовых трансформаторов. Поэтому в целях повышения эксплуатационной надежности силовых трансформаторов исследование влияния мощности и номинального напряжения действующих силовых трансформаторов на объем масла в главной изоляции является весьма актуальным.

Материалы и методы: На основе собранной базы данных по техническим параметрам действующих силовых трансформаторов в широком диапазоне их значений анализируется изменение объемов масла в главной изоляции в зависимости от мощности и номинального напряжения трансформаторов, а также их повреждаемость в эксплуатации. Для оценки изменения статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла в главной изоляции в зависимости от его объема используется трехпараметрическое распределение Гнеденко-Вейбулла, которое отражает физические процессы при пробое масла.

Результаты: Установлена корреляционная связь объема трансформаторного масла в главной изоляции действующих силовых трансформаторов с их номинальными мощностями и напряжениями, изменяющимися соответственно в диапазонах 25–1000000 кВА и 6–1150 кВ. Получено, что с увеличением мощностей трансформаторов в пределах исследуемых диапазонов их значений при заданном напряжении кратность возрастания объема масла в главной изоляции достигает 10–12, а при заданной мощности трансформатора кратность возрастания объема масла с увеличением класса напряжения – до 3,5.

Выводы: Полученные результаты следует учитывать при разработке уточненных регламентов эксплуатации главной изоляции действующих трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор, мощность, напряжение, трансформаторное масло, объем масла, статистические характеристики электрической прочности.

Influence of Power and Rated Voltage of Working Power Transformers on Oil Volume in Main Insulation

O.S. Mel'nikova

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Abstract

Background: Nowadays there are no data in literature regarding the oil volume changes in basic insulation and its electrical strength statistical characteristics depending on nominal technical parameters of working power transformers. As a result, the research of the influence of power and rated voltage of working power transformers on oil volume in main insulation is very important.

Materials and methods: Using the data base of working power transformers technical parameters in a wide range of meanings the author analyzes the oil volume change in basic insulation depending on transformers capacity and nominal voltage, and also their damage rate while exploiting. To evaluate the change of electrical strength statistical characteristics of oil volume in basic insulation depending on its volume the author uses Gnedenko-Weibull's three-parameter distribution, which shows physical processes during oil testing.

Results: The author describes the correlation relationship between the oil volume in working power transformers in their basic insulation and their nominal capacities and voltages in a range of 25–1000000 kVA and 6–1150 kV. It is proved that when the transformers capacity rises in certain limits and voltage is fixed, the oil volume in main insulation is reaching 10–12, and if the transformer capacity is fixed, the oil volume with increasing of voltage class is reaching 3,5.

Conclusions: The received results are very important for the development of the specific exploitation limits to the basic insulation of the working power transformers.

Keywords: Transformer, power, voltage, transformer oil, oil volume, electrical strength statistical characteristics.

Для повышения эксплуатационной надежности силовых трансформаторов важно выявить влияние воздействующих факторов, имеющих место в условиях эксплуатации. Анализ эксплуатационных данных по повреждаемости силовых трансформаторов [1] пока-

зал, что наблюдается повышение их удельной повреждаемости с увеличением срока эксплуатации (табл. 1).

Таблица 1. Повреждаемость трансформаторов в зависимости от срока эксплуатации при различных напряжениях

Срок эксплуатации, годы	Повреждаемость при наибольшем напряжении, %	
	100–300 кВ	300–700 кВ
0–5	1,7	1,9
> 5–10	1,9	2,5
> 10–20	2,2	3,2

Согласно данным (табл. 1), отмечается возрастание повреждаемости трансформаторов с ростом класса напряжения, причем эта тенденция сохраняется на протяжении всего срока их эксплуатации.

Результаты эксплуатации маслонаполненного электроэнергетического оборудования свидетельствуют о том, что основной причиной его отказов является снижение электрической прочности маслосодержащей изоляции [2, 3].

С ростом номинального напряжения повышаются требования к изоляции электрооборудования. Это обусловлено тем, что при переходе на более высокие ступени номинального напряжения в значительной мере возрастают габариты, масса и стоимость трансформаторов. Для эффективного решения этих вопросов на практике уменьшают изоляционные расстояния, что приводит к повышению рабочих напряженностей электрического поля. В силу этого для обеспечения заданного уровня электрической прочности изоляции трансформатора ее качество соответственно повышается. Подтверждением этого является тот факт, что, в соответствии с нормативными документами¹, пробивные напряжения трансформаторного масла в стандартном маслопробойнике устанавливаются с учетом класса номинального напряжения (табл. 2).

Таблица 2. Пробивные напряжения трансформаторного масла для электрооборудования различных классов напряжения, кВ

Категория электрооборудования	Пробивное напряжение масла после заливки в электрооборудование, кВ
до 15 кВ включительно	20
до 35 кВ включительно	25
от 60 до 150 кВ включительно	35
от 220 до 500 кВ включительно	45
750 кВ	55

Опыт эксплуатации и проектирования силовых трансформаторов [1, 4] показал, что увеличение мощности трансформатора в одном образце является экономически выгодным, так как приводит к уменьшению удельного расхода

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. – 355 с.

материала на единицу мощности и к повышению коэффициента полезного действия.

С ростом мощности трансформатора возрастают его линейные геометрические размеры. Связь между этими параметрами трансформатора определяется известным законом, сформулированным М. Видмаром [5]. В случае серии, включающей ряд трансформаторов различной мощности с геометрически подобными фигурами, а также неизменными электромагнитными нагрузками активных материалов, линейные размеры трансформатора возрастают пропорционально его мощности в степени $j - \ell \equiv S^{1/4}$ [4, 5]. Это обуславливает возрастание общего веса трансформатора.

Увеличение мощности трансформатора при заданном номинальном напряжении влечет за собой увеличение диаметра стержня магнитопровода, что приводит к возрастанию габаритов электроизоляционной конструкции внутри бака трансформатора [4].

Возрастание габаритов трансформатора с увеличением его мощности сопровождается ростом объема трансформаторного масла в главной изоляции, то есть в его баке. Важно отметить, что увеличение объема масла приводит к снижению статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла.

Это явление обусловлено статистической природой формирования предпробивных процессов в трансформаторном масле [6], что, в свою очередь, обуславливает распределение пробивных напряжений масла в соответствии с законом Гнеденко-Вейбулла. В этом случае вероятность того, что образец, состоящий из m одинаковых элементов объема, пробьется при напряжении U , определяется следующим образом [7]:

$$F(m, U) = 1 - \exp \left[-m \left(\frac{U - U_n}{U_0 - U_n} \right)^\alpha \right],$$

где U_0 , U_n , α – параметры распределения.

Согласно данному выражению, с ростом объема масла (параметра m) функция распределения $F(m, U)$ сдвигается в область меньших значений пробивных напряжений, приближаясь в пределе к нижнему значению пробивного напряжения U_n .

Таким образом, напряжение, вызываемое пробой масла при заданной вероятности, уменьшается с ростом его объема. Это необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации силовых трансформаторов на различные номинальные мощности и напряжения. Для этого нужно знать объемы масла в главной изоляции каждого конкретного трансформатора.

При проектировании новых трансформаторов изменение объемов масла в главной

изоляции в зависимости от их технических параметров определяется расчетным путем [8].

Для действующих трансформаторов оценку изменения объемов масла в главной изоляции можно произвести на основе анализа паспортных данных этих аппаратов во всем диапазоне изменения их технических параметров. С учетом этого была поставлена задача по определению изменения объема масла в действующих трансформаторах и автотрансформаторах в зависимости от их номинальных мощностей и напряжений.

Для решения этой задачи предварительно на основе анализа нормативной базы данных² определены мощности трансформаторов, на которые они разрабатываются, а также рассмотрена классификация трансформаторов по габаритам с учетом их мощности и номинального напряжения (табл. 3). Согласно этой классификации, имеет место широкий диапазон изменения мощности трансформаторов, в том числе и для одного заданного класса напряжения.

Таблица 3. Классификация силовых трансформаторов по габаритам

Габарит трансформатора	Мощность, кВА	Напряжение, кВ
1-1 1-2	До 20 25...100	До 10
II-1 II-2	160...250 400...1000	До 10
III-1 III-2 III-3	До 1000 1600...2500 4000...6300	Более 10 до 35
IV-1, IV-2	10000...32000 Более 32000	До 35
V-1 V-2	До 16000 25000...32000	110
VI-1 VI-2 VI-3	40000...63000 До 63000 До 63000	110 150 220...330
VII-1 VII-2	80000...200000 80000...200000	110 150
VIII-1 VIII-2	Более 200000 Независимо от мощности	220...330 Более 330

Была составлена база данных силовых трансформаторов и автотрансформаторов в широком диапазоне изменения их технических параметров. При этом диапазон изменения номинальных мощностей составил 1000–1000000 кВА, а номинальных напряжений – 6–1150 кВ.

Полученная база данных включает в себя массу трансформаторного масла в каждом силовом трансформаторе, которая отражает объем масла в главной изоляции. На основе этого с учетом плотности трансформаторного масла найден объем масла в каждом трансформаторе. В качестве примера в табл. 4 представлено

изменение объема трансформаторного масла для различных типов трансформаторов на номинальное напряжение 110 кВ.

Анализ полученных данных (табл. 4) показывает, что с возрастанием мощности трансформаторов (различных типов) наблюдается увеличение объема масла в этих трансформаторах. Эта тенденция отчетливо проявляется на зависимостях объема масла от мощности трансформаторов (рис. 1)

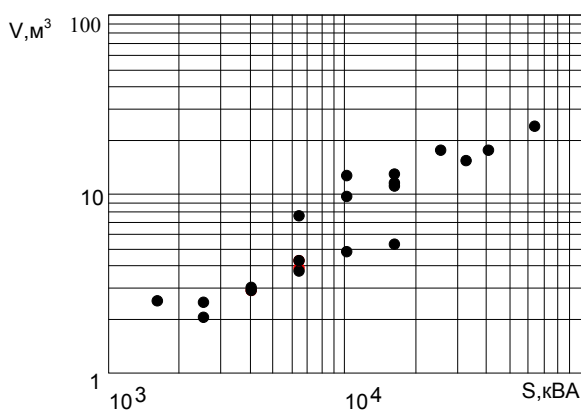
Таблица 4. Изменение объема масла для различных мощностей трансформаторов на напряжение 110 кВ

Тип	$V_m, м^3$
ТМН-2500/110 У1	5,56
ТМ-6300/110 У1	4,33
ТМН-6300/110 У1	10
ТМТН-6300/110	17,1
ТДН-10000/110	13,1
ТДТН-16000/110	23,33
ТДТН-16000/110	13,97
ТДН-16000/110 У1	17,89
ТРДНФ-16000/25000/110 У1	18,89
ТДТН-25000/110	26,22
ТРДНС-25000/110 У1	18,56
ТДН-25000/110 У1	18,56
ТДЦН-25000/110 У1	18,89
ТДТН-40000/110	30,78
ТРДНС-40000/110 У1	21,33
ТДН-40000/110 У1	21,22
ТДТНЖ-40000/110 У1	25,89
ТДТНЖУ-40000/110 У1	25,89
ТРДНФ-40000/63000/110 У1	20,67
ТДТН-63000/110	41,1
ТДН-63000/110 У1	26,89
ТРДНМ-63000/100000/110У1	23,78
ТРДЦНМ-63000/100000/110 У1	26,94
ТДЦТН-80000/110	31,11
ТДТН-80000/110	42,44
ТРДН-80000/110	22,22
ТДН-80000/110 У1	26,67
ТРДЦН-80000/110 У1	26,22
ТРДЦН-125000/110	33,33

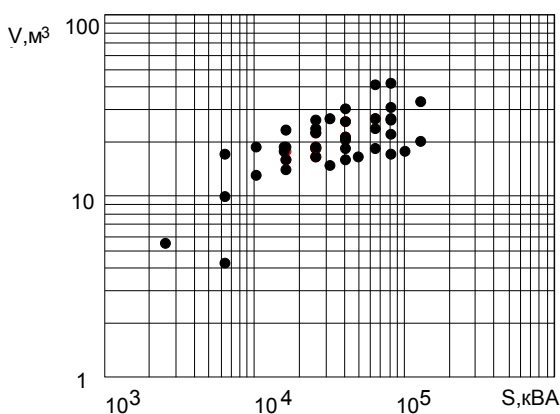
Аналогично наблюдается возрастание объема масла от напряжения трансформаторов при заданной их мощности 63000 кВА (рис. 2).

Анализ результатов выполненных расчетов и построенных графиков позволил сделать выводы о том, что с увеличением мощности трансформатора в пределах исследуемых диапазонов при заданном напряжении возрастает объем масла в трансформаторе. Значения кратности возрастания объема масла в трансформаторах представлены в табл. 5. При заданной мощности трансформатора значения кратности возрастания объема масла с увеличением класса напряжения приведены в табл. 6.

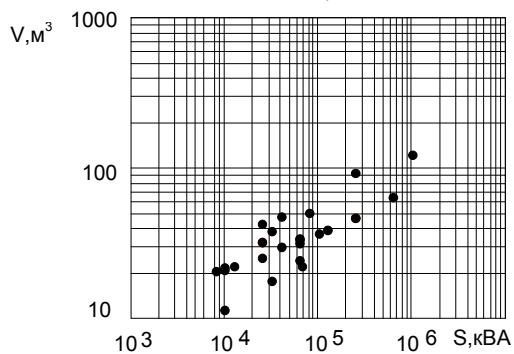
² ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВА и более. Ряд номинальных мощностей: Введ. 1979-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 4 с. (Национальные стандарты Российской Федерации).



а)



б)



в)

Рис. 1. Зависимости объема масла в трансформаторах от их мощности при номинальных напряжениях: а – 35 кВ; б – 110 кВ; в – 220 кВ

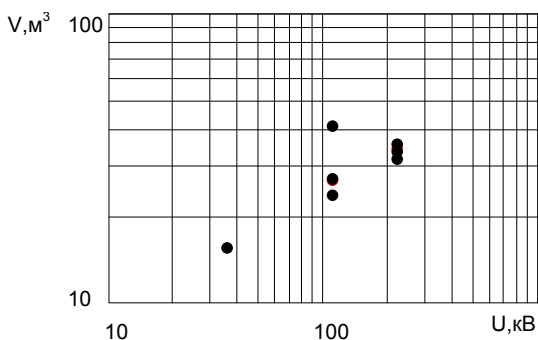


Рис. 2. Зависимость объема масла в трансформаторах от их напряжения при заданной мощности 63000 кВА

Таблица 5. Значения кратности изменения объема масла в зависимости от мощности трансформаторов

Класс напряжения, кВ	Кратность возрастания объема масла
35	11,6
110	9,8
220	10,7
500	1,4

Таблица 6. Значения кратности изменения объема масла в зависимости от класса напряжения трансформаторов

Мощность трансформаторов, кВА	Кратность возрастания объема масла
63000	2,6
80000	2,9
125000	3,5

Заключение

На основе выполненных исследований установлена корреляционная связь объема трансформаторного масла в главной изоляции действующих силовых трансформаторов с их номинальными мощностями и напряжениями. При этом установлено, что с увеличением мощностей трансформаторов в пределах исследуемых диапазонов их значений при заданном напряжении кратность возрастания объема масла в главной изоляции достигает 10–12, а при заданной мощности трансформатора кратность возрастания объема масла с увеличением класса напряжения возрастает до 3,5. Такая кратность изменения объемов трансформаторного масла обуславливает соответствующее изменение статистических характеристик электрической прочности главной изоляции трансформаторов.

Полученные результаты следует учитывать при разработке уточненных регламентов эксплуатации главной изоляции действующих трансформаторов.

Список литературы

1. Соколов В.В. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. – № 1. – С. 155–168.
2. 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.
3. Гурин В.В., Соколов В.В. Обследование силовых трансформаторов в эксплуатации // Электротехника. – 1994. – № 9. – С. 43–45.
4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – Изд 5-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
5. Видмар М. Трансформатор в эксплуатации. – М.-Л.: ГНТИ, 1931. – 292 с.
6. Изоляция установок высокого напряжения: учеб. для вузов / под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд.-ние, 2003. – 608 с.
7. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / под ред. И.П. Верещагин, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
8. 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.

References

1. Sokolov, V.V. Aktual'nye zadachi razvitiya metodov i sredstv diagnostiki transformatornogo oborudovaniya pod napryazheniem [Actual tasks of developing the methods and means of transformer equipment diagnostics under high voltage]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 1997, no. 1, pp. 155–168.
2. Vanin, B.V., Lvov, Y.N. O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniem 110–500 kV v ekspluatatsii [On Power Transformers Damages with 110–500 kV voltage in operation process]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 9, pp. 53–58.
3. Gurin, V.V., Sokolov, V.V. Obsledovanie silovykh transformatorov v ekspluatatsii [Power Transformers Inspection during Operation]. *Elektrotehnika*, 1994, no. 9, pp. 43–45.

4. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Transformers Calculation: Guide book for universities]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 528 p.
5. Vidmar, M. *Transformator v ekspluatatsii* [Transformer in Operation]. Moscow-Leningrad, GNTI, 1931. 292 p.
6. Kuchinskiy, G.S. *Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya: uchebnik dlya vuzov* [Insulation of High-Voltage Installations: Guide book for Universities]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, St. Petersburg dep-t, 2003. 608 p.
7. Vereschagin, I.P., Larionova, V.P. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy: uchebnik dlya vuzov* [Electrophysical basis of high voltage engineering: Guide book for Universities]. Moscow, Energoatomizdat, 1993. 543 p.
8. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 17–21.

Мельникова Ольга Сергеевна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус А, ауд. 144,
e-mail: o.c.melnikova@mail.ru