

УДК 621.321

Влияние мощности и напряжения трансформаторов на статистические характеристики электрической прочности масляных каналов главной изоляции

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 при выборе главной изоляции трансформаторов учитывается зависимость электрической прочности масляного канала от его ширины. Специалистами обсуждаются вопросы по выбору главной изоляции с учетом влияния обобщенного фактора – объема масляного канала. Решение этого вопроса во многом зависит от изученности статистических характеристик электрической прочности масляных каналов с различными объемами и влияния на них номинальных параметров трансформаторов.

Материалы и методы: Использовалась статистическая модель оценки характеристик электрической прочности каналов с различным объемом трансформаторного масла. Для определения объемов масла в напряженных масляных каналах применялись методы расчета конструкционных и электроизоляционных параметров трансформаторов.

Результаты: Предложен метод оценки изменения объема трансформаторного масла в напряженных масляных каналах главной изоляции силовых высоковольтных трансформаторов и статистических характеристик электрической прочности этих каналов с учетом влияния номинальных значений мощности и напряжения трансформаторов. Показано, что степень влияния технических параметров трансформаторов на статистические характеристики электрической прочности масляных каналов зависит от качества трансформаторного масла, которое изменяется в условиях эксплуатации.

Выводы: Установлено, что предложенный метод может использоваться при выборе параметров напряженных масляных каналов главной изоляции с учетом влияния номинальных значений мощности и напряжения трансформаторов.

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

Influence of capacity basic insulation and voltage of transformer on statistical performances of oil channels electrical strength

Y.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 to choose a basic insulation of transformer we have to take into account the dependence of oil channel electrical strength on its width. Specialists are discussing issues concerning basic insulation choosing with account of summarized factor – volume of oil channel. Solution to this problem depends in many respects on the level of knowledge of statistical performances of oil channels electrical strength with different volumes; and also the influence of nominal parameters of transformer on it.

Materials and methods: A statistical model of evaluation of channels electrical strength performances with different volumes of transformer oil was used. To define oil volume in oil channels under voltage we used transformer constructive and electroinsulating parameters computational techniques.

Results: We suggested an evaluation technique of transformer oil volume changing in power high-voltage transformers basic insulation oil channels under voltage and electrical strength statistical performances of these channels with account of influence of capacity nominal parameters and transformers voltage. It was shown that degree of transformers technical performances influence on oil channels electrical strength statistical performances depends on the quality of transformer oil, which may change in different operation conditions.

Conclusions: It is proved, that the suggested technique may be used in the process of choosing parameters of basic insulation oil channels under voltage with account of transformer capacity and voltage nominal parameters influence.

Keywords: transformer, transformer oil, oil channel, electrical strength, statistical performances.

На протяжении многих десятилетий в силовых трансформаторах успешно применяется маслбарьерная изоляция, состоящая из чередующихся барьеров электрокартона и масляных каналов. При воздействии на эту изоляцию переменного и импульсного напря-

жений наибольшие напряженности электрического поля имеют место в масляных каналах [1]. Многочисленными экспериментальными исследованиями показано, что наиболее нагруженным масляным каналом является первый канал между обмоткой и ближайшим к ней

барьером, в котором и возникают пробой [2, 3]. При пробое первого масляного канала образуются необратимые повреждения электрокартона. В зависимости от интенсивности этого пробоя могут образовываться разряды вдоль поверхности электрокартона или в его толще. В дальнейшем возможно появление сильно разветвленного «ползущего разряда» по поверхности картона, приводящего к полному пробую изоляции. В эксплуатации и при испытаниях оборудования возникновение таких повреждений не может быть допущено, поэтому электрическая прочность маслябарьерной изоляции определяется прочностью первого масляного канала [4].

В свою очередь, электрическая прочность масляного канала зависит от качества масла и геометрических параметров канала.

В настоящее время при выборе главной изоляции учитывается зависимость электрической прочности масляного канала от его ширины [5].

По мере накопления опыта проектирования и эксплуатации силовых трансформаторов, а также совершенствования технологии изготовления их изоляции становится актуальной задача разработки более эффективных методов расчета главной изоляции, более полно учитывающих физические явления при пробое масляных каналов. В этом направлении отечественные [6] и зарубежные [7] специалисты приступили к разработке метода выбора главной изоляции трансформаторов с учетом влияния обобщенного фактора – объема масляного канала.

Влияние объема масляного канала обусловлено статистической природой формирования пробоя и проявляется в уменьшении его электрической прочности с ростом объема масла [8].

Для достижения наибольшего эффекта при решении поставленной задачи важно изучить статистические характеристики электрической прочности масляных каналов с различными объемами и выявить их зависимость от номинальных параметров трансформаторов.

Объем масла в каналах определяется мощностью и напряжением трансформаторов [9], поэтому важно произвести оценку степени влияния номинальных параметров трансформаторов на объемы масляных каналов. При этом следует учесть, что мощность трансформатора определяет диаметр магнитного стержня, а номинальное напряжение – расстояние между обмотками.

Для исследований в качестве модельного объекта выбираются двухобмоточные трехфазные силовые трансформаторы с номинальным напряжением 110 кВ, для которых удастся сохранять принцип подобия конструкций обмоток для широкого диапазона мощностей трансформаторов [9]. Кроме того, число

трансформаторов данного класса напряжения в электрических сетях достаточно велико. При этом рассматривается плоская магнитная система стержневого типа со стержнями, имеющими сечение в форме симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность, и с концентрическим расположением обмоток).

В соответствии с имеющейся обобщенной теорией проектирования силовых трансформаторов [9], выражение для определения диаметра стержня магнитопровода имеет вид

$$d_c = 2 \cdot r_c = 2,85 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{S' \beta a_p k_p}{f U_p B_c^2 k_c^2}}, \quad (1)$$

где S' – мощность трансформатора на один стержень, $S' = S_H/3$; β – соотношение длины окружности канала между обмотками (средней длины витка двух обмоток) и высоты обмотки; a_p – приведенная ширина канала рассеяния; k_p – коэффициент приведения идеализированного поля рассеяния к реальному; f – частота сети; U_p – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания (в относительных единицах); B_c – максимальная магнитная индукция в стержне; k_c – коэффициент заполнения активной сталью площади круга, описанного около сечения стержня.

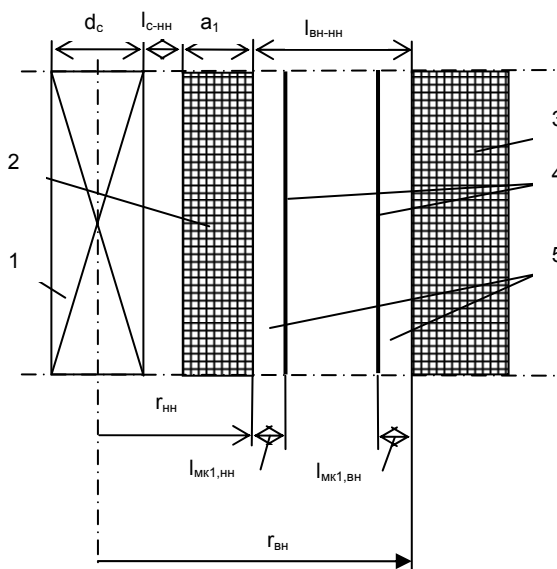


Рис. 1. Схема внутренней изоляции двухобмоточного силового трансформатора 110 кВ: 1 – стержень магнитопровода; 2 – обмотка низшего напряжения; 3 – обмотка высшего напряжения; 4 – барьеры из электрокартона; 5 – масляные каналы вблизи обмоток

На основе накопленного опыта проектирования силовых трансформаторов при определении их основных размеров [9] можно принять осредненные значения параметров: коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю $k_p = 0,95$, индукцию в стержне $B_c = 1,6$ Тл; частоту сети $f = 50$ Гц; коэффициент заполнения сечения стержня ста-

люю $k_c = 0,9$; коэффициент $\beta = 1,8$. Приведенная ширина канала рассеяния оценивается по выражению

$$a_p = I_{\text{ВН-НН}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{S'} \quad (2)$$

где $I_{\text{ВН-НН}}$ – расстояния между обмотками высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений.

С учетом (2) и выбранных выше значений исходных параметров выражение (1) запишется следующим образом:

$$d_c = 1,02 \cdot 10^{-2} \sqrt[4]{\frac{S' (I_{\text{ВН-НН}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{S'})}{U_p}} \quad (3)$$

Для определения d_c по (3) далее следует произвести определение расстояния между обмотками $I_{\text{ВН-НН}}$. При этом принимается, что в рассматриваемом ряду трансформаторов различных мощностей соотношения между отдельными размерами трансформаторов сохраняются постоянными, то есть магнитные системы и обмотки трансформаторов данного ряда представляют собой геометрически подобные фигуры.

Тогда при определении расстояния $I_{\text{ВН-НН}}$ можно ограничиться оценочным расчетом [1], по которому расстояние между обмотками (в зоне середины обмотки) может быть определено как

$$I_{\text{ВН-НН}} = \frac{U_{\text{РАСЧ}} k_{\text{ИЗ}}}{E_{\text{ДОП.М.К}}} \quad (4)$$

где $U_{\text{РАСЧ}}$ – расчетное напряжение, действующее на главную изоляцию; $k_{\text{ИЗ}} = 1,1-1,2$ – коэффициент, учитывающий увеличение напряженности электрического поля в масляном канале из-за наличия барьеров и цилиндричности конструкции главной изоляции; $E_{\text{ДОП.М.К}}$ – расчетная допустимая напряженность в масляном канале при соответствующем испытательном напряжении.

Выполненная по [1] оценка напряжения $U_{\text{РАСЧ}}$ с учетом нормативных испытательных напряжений показала, что в качестве расчетного напряжения в (3) следует принять испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты $U_{50\text{Гц}, 1\text{мин}}$, которое для рассматриваемых трансформаторов 110 кВ составляет 200 кВ.

При определении допустимой напряженности электрического поля [1] принимается соотношение

$$E_{\text{ДОП.М.К}} = k_{\text{П.Е}} E_{\text{М.К.ПР.МИН}} \quad (5)$$

где $E_{\text{М.К.ПР.МИН}}$ – минимальная пробивная напряженность, определяемая при вероятности пробоя 0,05; $k_{\text{П.Е}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий небольшое количество опытов, использованное для получения этой зависимости, меньшие по сравнению с реальным трансформатором размеры модельного образца, возможные отклонения в размерах элементов изоляции. Значение этого коэффициента принимается равным $k_{\text{П.Е}} = 0,85$.

С учетом (5) выражение (4) примет вид

$$I_{\text{ВН-НН}} = \frac{k_{\text{ИЗ}} U_{\text{РАСЧ}}}{k_{\text{П.Е}} E_{\text{М.К.ПР.МИН}}} \quad (6)$$

Тогда выражение (3) для определения диаметра стержня магнитопровода с учетом (6) запишется следующим образом:

$$d_c = 1,02 \cdot 10^{-2} \times \sqrt[4]{\frac{S_H}{3 \cdot U_p} \left(\frac{k_{\text{ИЗ}} U_{\text{РАСЧ}}}{k_{\text{П.Е}} E_{\text{М.К.ПР.МИН}}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} \right)} \quad (7)$$

Из полученного выражения (7) следует, что диаметр стержня магнитопровода в первую очередь определяется мощностью и напряжением трансформатора.

С учетом обозначений на рис. 1 объемы масла в первых от обмоток каналах на единицу их высоты определяются как

$$V_{\text{МК1, НН}} = \pi \left(2 \cdot r_{\text{НН}} I_{\text{МК1, НН}} + I_{\text{МК1, НН}}^2 \right); \quad (8)$$

$$V_{\text{МК1, ВН}} = \pi \left(2 \cdot r_{\text{ВН}} I_{\text{МК1, ВН}} + I_{\text{МК1, ВН}}^2 \right). \quad (9)$$

На основе выражений (8) и (9) оценим соотношение объемов в каналах. При этом учтем, что для силовых трансформаторов имеют место соотношения

$$\left(\frac{I_{\text{МК1, ВН}}}{2 \cdot r_{\text{ВН}}} \right) \ll 1 \text{ и } \left(\frac{I_{\text{МК1, НН}}}{2 \cdot r_{\text{НН}}} \right) \ll 1,$$

а каналы $I_{\text{МК1, ВН}}$ и $I_{\text{МК1, НН}}$ близки друг к другу.

Тогда имеем

$$\frac{V_{\text{МК1, ВН}}}{V_{\text{МК1, НН}}} \approx 1 + \frac{I_{\text{ВН-НН}}}{r_{\text{НН}}} \quad (10)$$

Из (10) следует, что $V_{\text{МК1, ВН}} > V_{\text{МК1, НН}}$, причем соотношение этих объемов определяется мощностью (параметр $r_{\text{НН}}$) и номинальным напряжением (параметр $I_{\text{ВН-НН}}$).

Необходимые для определения объемов масла в напряженных масляных каналах радиусы поверхностей, ограничивающих первые масляные каналы между обмотками и ближайшими к ним барьерами найдутся в соответствии с рис. 1:

$$r_{\text{НН}} = \frac{d_c}{2} + I_{\text{С-НН}} + a_1; \quad (11)$$

$$r_{\text{ВН}} = r_{\text{НН}} + I_{\text{ВН-НН}}. \quad (12)$$

Здесь толщина изоляции обмотки НН от стержня $I_{\text{С-НН}}$ выбирается по ее испытательному напряжению [9]. В трансформаторах на напряжение 110 кВ по соображениям электродинамической стойкости и технологическим требованиям это расстояние составляет 18 мм, причем на стержень устанавливается бумажно-бакелитовый цилиндр, а на масляный канал – изоляционный цилиндр, обмотка НН при этом составляет 12 мм.

Радиальный размер обмотки НН (толщина обмотки) a_1 для модельного ряда трехфазных трансформаторов 110 кВ может быть определен по формуле [9]

$$a_1 = 1,21 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{S_H/3}. \quad (13)$$

Выше отмечалось, что наибольший объем первого масляного канала имеет место вблизи обмотки ВН, поэтому последующие результаты исследования представлены для этого случая.

С учетом найденных выражений (6), (7), (12), (13) формула (9) для определения объема масла в первом масляном канале примет вид

$$V_{\text{МК1,ВН}} = \pi \cdot I_{\text{МК1,ВН}} \times \left\{ \begin{aligned} & 1,02 \cdot 10^{-2} \times \\ & \times \sqrt[4]{\frac{S_H}{3 \cdot U_p} \left(\frac{k_{\text{из}} U_{\text{расч}}}{k_{\text{ПЕ}} E_{\text{МКпр.мин}}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} \right) +} \\ & + 2 \cdot I_{\text{С-НН}} + 2,42 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_H}{3}} + \frac{2 \cdot k_{\text{из}} U_{\text{расч}}}{k_{\text{ПЕ}} E_{\text{МКпр.мин}}} \\ & - I_{\text{МК1,ВН}} \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что для трансформатора заданного класса напряжения объем масла в первом масляном канале в первую очередь зависит от мощности трансформатора.

Для оценки степени влияния объема трансформаторного масла на его электрическую прочность целесообразно использовать уточненный метод оценки его пробивной напряженности [10, 11]:

$$E_{0,m} = E_H + \frac{E_{0,1} - E_H}{m^{1/\alpha}}, \quad (15)$$

где $E_{0,1}$, $E_{0,m}$ – величины пробивной напряженности единичного масляного канала и увеличенного в m раз, при которых вероятности пробоя составляют $F(E_{0,1}) = 1 - e^{-1}$ и $F(E_{0,m}) = 1 - e^{-1}$, E_H – нижний предел пробивной напряженности масляного канала; α – безразмерный параметр.

Параметры $E_{0,1}$, E_H , α определяются по результатам эксперимента для единичного масляного канала. Параметр m отражает увеличение объема масла в каналах трансформаторов по сравнению с единичным каналом.

Изменение объема масла в первом масляном канале и его электрической прочности в широком диапазоне мощностей трансформатора более наглядно можно представить в относительном виде. Для этого вводятся соотношения:

$$m_s = \frac{S_H}{S_{H,Б}}; \quad m_v = \frac{V_{\text{МК1}}}{V_{\text{МК1,Б}}}, \quad (16)$$

где $S_{H,Б}$ – базисная мощность трансформатора, в качестве которой целесообразно выбирать наименьшую мощность из серии трансформаторов при выбранном классе напряжения; $V_{\text{МК1,Б}}$ – объем масла в первом канале для базисной мощности трансформатора.

В соответствии с предложенной методикой выполнены расчеты изменения объемов

масла в первом масляном канале и их электрической прочности для двухобмоточных трехфазных трансформаторов на 110 кВ при изменении их мощностей в диапазоне 2500–125000 кВА. При этом в качестве базисного принят трансформатор с номинальной мощностью 2500 кВА. Ширина первого масляного канала принималась равной 10 мм, для которого [4] в рассматриваемом случае $E_{\text{М.К.пр.мин}} = 7,2$ кВ/мм.

На рис. 2 представлена зависимость объемов масла в первом канале от мощности трансформаторов. Отмечается, что в исследуемом диапазоне мощностей объем масла в канале увеличивается в 2,6 раза.

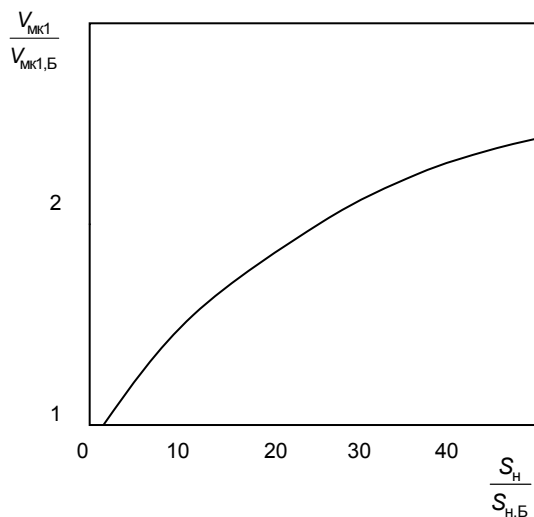


Рис. 2. Зависимость объема масла в первом масляном канале от номинальной мощности трансформаторов напряжением 110 кВ

Для этого случая на рис. 3 представлены зависимости пробивной напряженности масла в первом канале от мощности силовых трансформаторов для различного качества исходного трансформаторного масла. Анализ полученных зависимостей показал, что с увеличением мощности трансформаторов электрическая прочность первого масляного канала уменьшается, причем скорость ее спада зависит от качества исходного трансформаторного масла. При этом наибольший спад электрической прочности отмечается для масла, имеющего наибольшее значение среднеквадратичного отклонения σ (рис. 3, кривая 2), что согласуется со статистической моделью формирования пробоя масляных каналов. Полученные результаты важно учитывать при проектировании главной изоляции и эксплуатации трансформаторов, когда качество масла изменяется под действием влияющих факторов.

Заключение

Предложенный метод оценки изменения объема трансформаторного масла в напряженных масляных каналах главной изоляции сило-

вых высоковольтных трансформаторов и статистических характеристик электрической прочности этих каналов с учетом влияния номинальных значений мощности и напряжения трансформаторов позволяет показать, что степень влияния технических параметров трансформаторов на статистические характеристики электрической прочности масляных каналов зависит от качества трансформаторного масла, которое изменяется в условиях эксплуатации.

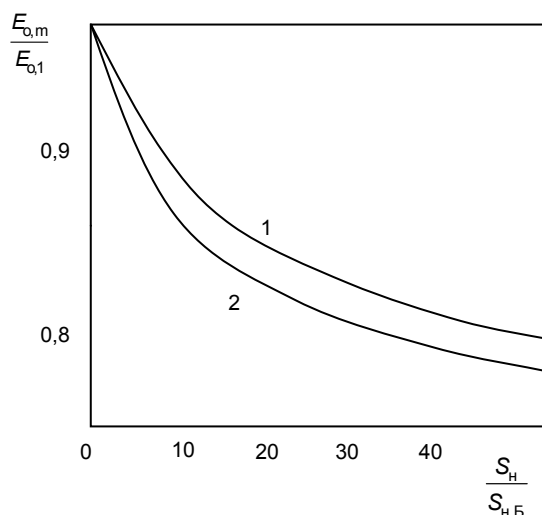


Рис. 3. Зависимость пробивной напряженности масла в первом канале от номинальной мощности трансформаторов напряжением 110 кВ: 1 — $U_n = 22,7$ кВ; $U_0 = 53,2$ кВ; $\alpha = 3,3$; $\sigma = 4,7\%$; 2 — $U_n = 23,4$ кВ; $U_0 = 73,8$ кВ; $\alpha = 3,3$; $\sigma = 5,6\%$

Список литературы

1. **Изоляция** установок высокого напряжения: учеб. для вузов / под ред. Г.С. Кучинского. — СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003. — 608 с.
2. **Панов А.В., Морозова Т.И.** Электрические характеристики и методы расчета главной изоляции мощных высоковольтных трансформаторов // Труды ВЭИ. Вопросы трансформаторостроения. — 1969. — Вып. 79. — С. 12–32.
3. **Черногоцкий В.М., Джунь Л.П.** Электрическая прочность масляных каналов и изоляция края обмотки трансформаторов // Электричество. — 1980. — №11. — С. 47–50.
4. **Техника** высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И. Гумерова и др.; под ред. Г.С. Кучинского. — СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003. — 608 с.
5. **РТМ 16.800.853-81.** Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110–750 кВ. Методика расчета изоляции между обмотками. 1981.
6. **Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А.** Развитие систем проектирования внутренней изоляции трансформаторного оборудования // Электроэнергетика. — 2009. — № 5. — С. 19–24.
7. **Ch. Krause, U. Piovani, D. Tschudi.** Building Reliable AC and DC UHV Power Transformers-Dielectric Design Principles, Suitable Pressboard Insulation and Issues Related to HVDC Testing // Proceedings of International Conference on UHV Transmission. — Beijing, China, 2009.

8. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд. дом МЭИ, 2010. — 704 с.

9. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.

10. **Митькин Ю.А., Мельникова О.С.** Определение статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с учетом его объема в трансформаторах // Вестник ИГЭУ. — 2012. — Вып. 2. — С. 21–25.

11. **Мельникова О.С., Тарутина Л.С., Митькин Ю.А.** Особенности влияния технических параметров силовых трансформаторов на электрическую прочность жидкой изоляции // Состояние и перспективы развития электро-технологии: сб. науч. тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. (Бенардосовские чтения). — Иваново, 2011. — С. 86–88.

References

1. Kuchinskiy, G.S. *Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya* [Insulation of high-voltage installations]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, St. Petersburg dep-t, 2003. 608 p.
2. Panov, A.V., Morozova, T.I. Elektricheskie kharakteristiki i metody rascheta glavnoy izolyatsii moshchnykh vysokovol'tnykh transformatorov [Electrical performances and calculation methods of power high-voltage transformers basic insulation]. *Trudy VEI «Voprosy transformatorostroeniya»* [Science papers of VPI «Issues of transformers design»], 1969, issue 79, pp. 12–32.
3. Chornogotskiy, V.M., Dzhun', L.P. Elektricheskaya prochnost' maslyanykh kanalov i izolyatsiya kraya obmotki transformatorov [Electrical strength of oil channels and insulation of transformer winding edge]. *Electricity*, 1980, no. 11, pp. 47–50.
4. Bogatencov, I.M., Bocharov, Yu.N., Gumerova, N.I. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [Technique of high voltages]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, 2003. 608 p.
5. RTM 16.800.853-81. *Transformatory silovye maslyanye obshchego naznacheniya klassov napryazheniya 110–750 kV. Metodika rascheta izolyatsii mezhdubmotkami* [Power oil transformers for general purpose, voltage rating 110–750 kV. Insulation calculation technique], 1981.
6. Lokhanin A.K., Larin V.S., Matveev D.A. Razvitie sistem proektirovaniya vnutrenney izolyatsii transformatornogo oborudovaniya [Development of a Design Method for Inner Insulation of transformer equipment]. *Elektroenergetika*, 2009, no. 5, pp. 19–24.
7. Krause, Ch., Piovani, U., Tschudi, D. Building Reliable AC and DC UHV Power Transformers-Dielectric Design Principles, Suitable Pressboard Insulation and Issues Related to HVDC Testing. Proceedings of International Conference on UHV Transmission. Beijing, China, 2009.
8. Bortnik, I.M. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy* [Electrophysical basis of high voltage engineering]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 704 p.
9. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Transformers design]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 528 p.
10. Mitkin, Y.A., Melnikova, O.S. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 21–25.
11. Melnikova, O.S., Tarutina, L.S., Mitkin, Y.A. Osobennosti vliyaniya tekhnicheskikh parametrov silovykh transformatorov na elektricheskuyu prochnost' zhidkoy izolyatsii [Aspects of power transformers technical performances influence on electrical strength of liquid insulation]. *Sostoyaniya i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii: sbornik nauchnykh trudov XVI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Benardosovskie chteniya* [Electrotechnics conditions and development prospects: collection of scientific papers of international scient. and tech. conf. Benardosovskie readings]. Ivanovo, 2011, pp. 86–88.

Митькин Юрий Алексеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус А, ауд. 144,
телефон (4932) 26-97-23,
e-mail: mua@vetf.ispu.ru;
e-mail: mitkinya@mail.ru

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