

В. И. БИРЮЛИН, канд. техн. наук, доц., ЮЗГУ, Курск, Россия;
А. С. ЧЕРНЫШЕВ, канд. техн. наук, доц., ЮЗГУ, Курск, Россия;
А. Н. ГОРЛОВ, канд. техн. наук, доц., ЮЗГУ, Курск, Россия;
Н. В. ХОРОШИЛОВ, канд. техн. наук, доц., ЮЗГУ, Курск, Россия;
О. М. ЛАРИН, канд. техн. наук, доц., ЮЗГУ, Курск, Россия;
С. А. СЕРГЕЕВ, канд. техн. наук, доц., ЮЗГУ, Курск, Россия;
Д. В. КУДЕЛИНА, асп., ЮЗГУ, Курск, Россия

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЕГО УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА

В статье приведено решение проблемы газообразования при повреждениях силовых трансформаторов и его ультразвуковая диагностика. Основной целью исследования является выявление закономерности формирования газовых пузырей в масле при возникновении в трансформаторе перегревов. Предложенный метод обнаружения очага повреждений с помощью ультразвуковой локации является более эффективным способом, так как он позволяет существенно уменьшить время срабатывания защиты и повысить надежность защиты масляных трансформаторов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, диагностика, повреждение, масло, диагностика, газовая защита.

Введение

Газовая защита силовых трансформаторов основана на регистрации газов, появляющихся в масле вследствие разложения электрической изоляции при возникновении повреждений.

Оценим эффективность газовой защиты при возникновении различного типа дефектов. Оценку произведем для таких часто встречающихся повреждений, как перегревы находящихся в масле металлических частей трансформатора. К ним относятся перегревы частей магнитопровода и областей бака вследствие образования короткозамкнутых контуров; перегревы в месте подсоединения токоведущих шин к трансформаторному вводу; перегревы случайно попавших на магнитопровод металлических деталей.

Анализ основных достижений

Кипение масла в месте перегрева происходит в локальной зоне. Поскольку масло в трансформаторе перемещается и охлаждается в охладителях, то температура его в месте перегрева будет намного выше температуры основного объема масла. Кипение масла в этом случае называется кипением с недогревом при вынужденном движении жидкости [2]. Согласно теории [2,3] кипению в большом объеме с недогревом начинается с образования на нагреваемой поверхности мелких пузырьков. Этот вид кипения называется пузырьчатым. При пузырьчатом кипении от поверхности нагрева отрывается большое количество мелких пузырей. Размер этих пузырей определяется свойствами кипящей жидкости, давлением

в ней, ее скоростью перемещения и величиной подогрева. При дальнейшем увеличении теплового потока, подводимого к телу, размеры пузырей практически не меняются, а увеличивается их количество. При определенном значении теплового потока наступает так называемое пленочное кипение. Оно характеризуется образованием сплошной паровой пленки, отделяющей нагретое тело от жидкости. Теплоотдача от тела уменьшается, и температура его резко возрастает. Такое явление называется кризисом кипения или пережогом, поскольку обычно происходит разрушение нагреваемой поверхности от действия высокой температуры. При наступлении кризиса кипения от поверхности нагреваемого тела отделяются паровые пузыри большего по сравнению с пузырьчатым кипением размера.

Цель исследований

Требуется выяснить закономерность формирования газовых пузырей в масле при возникновении в трансформаторе перегревов.

Материал исследований

Газовое реле срабатывает при попадании в него газа в виде пузырей. При наличии газа в растворенном состоянии газовое реле не сработает. При возникновении перегревов металлических частей, находящихся в трансформаторном масле, вследствие циркуляции масла соприкосновение его с нагретой деталью будет кратковременным. При таком режиме нагрева масла, как показали опыты, его разложение с образованием газообразных углеводородов будет происходить при 80–400°С. При этой же температуре происходит кипение масла. Используем это для исследования процесса газовыделения при разложении трансформаторного масла в результате нагрева[1].

При пузырьчатом кипении одновременно с процессом кипения масла происходит его разложение. Выделяющиеся вследствие термического разрушения масла газы будут заполнять пузыри масляного пара. Эти пузыри максимальным диаметром D_1 , отрываясь от нагреваемой поверхности в количестве N (в единицу времени с единицы поверхности), попадают в холодное масло, так как кипение происходит с недогревом. При этом масляный пар конденсируется, а оставшиеся пузыри содержат только продукты разложения масла. Максимальный диаметр их будет d_1 . Эту величину найдем следующим образом.

Объем масляного пара, отделяющегося от единицы поверхности в единицу времени,

$$V_1 = 0,524D_1^3 N. \quad (1)$$

Используя уравнение Клапейрона–Менделеева, рассчитываем массу m_1 испарившегося масла

$$M_1 = \frac{\mu_n p'_n V_1}{RT_{II}}, \quad (2)$$

где μ_n - молекулярная масса пара; p'_n - давление в масляном пузыре; R - универсальная газовая постоянная; T_{II} - температура пара в К.

При нагреве масла до T_n количество выделяющихся газов равняется n -й доли от массы масла. Следовательно, в паровые пузыри поступит $n_1 M_1$ масса газа.

Используя уравнение состояния газа, рассчитаем диаметр d_1 газового пузыря после конденсации пара. Он с учетом (1) и (2) будет равен

$$d_1 = D_1 \sqrt{n_1 \frac{\mu_n \cdot p_n}{\mu_2 \cdot p_2}}. \quad (3)$$

В (3) давление в газовом пузыре и молекулярная масса газа обозначены соответственно p_2 и μ_2

При пленочном режиме кипения масла от нагреваемой поверхности отделяются масляный пар и образовавшийся вследствие термического разложения масла газ. Количество пара, образующегося в единицу времени,

$$V_n = w S,$$

где S — поверхность нагрева; w — скорость отделения пара от поверхности.

Некоторая часть этого пара будет разлагаться с выделением разных газов. Нетрудно показать, что объем этих газов

$$V_2 = n_2 \omega S \frac{\mu_n \cdot p_n}{\mu_2 \cdot p_2}, \quad (4)$$

где n_2 — массовая доля газа от количества разложившегося масла; μ_2 — молекулярная масса газа; p_2 — давление в газовом пузыре.

Этот поток пара и газа поступает в трансформаторное масло. Из теории барботирования [4] известно, что в этом случае на некотором расстоянии от нагреваемой поверхности имеется так называемый участок стабилизации потока пара, на котором происходит процесс формирования пузырей различных диаметров. При попадании в холодное масло масляный пар будет конденсироваться и пузыри будут содержать только газообразные продукты разложения масла. Данных о закономерности распределения объема газа по размерам пузырей для рассматриваемого случая в литературе не имеется. Однако для оценки эффективности различных видов газовых защит нас в первую очередь интересует вопрос о максимально возможном устойчивом размере газового пузыря, способного перемещаться в жидкости и не дробиться. Такая задача рассмотрена в [5].

При движении объема газа в жидкости в пузыре возникают турбулентные потоки газа. Эти турбулентные пульсации оказывают давление на поверхность пузырька. Распад наступает тогда, когда это давление будет превосходит давление, обусловленное поверхностным натяжением масла. Исходя из таких предположений Левичем [5] была получена следующая формула для расчета устойчивости объема газового пузыря движущегося в жидкости:

$$v_{кр} \leq \frac{\zeta^3}{\rho_{ж} (\rho_2 u^3)^3}, \quad (5)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения масла; $\rho_{ж}$ и ρ_2 — соответственно плотность жидкости и газа; u — скорость перемещения газового пузыря.

Таким образом, при возникновении перегревов в трансформаторном масле закономерность образования газовых пузырей определяется тем тепловым потоком, который подводится к месту перегрева.

Следовательно, возникающий на нагреваемой поверхности режим кипения масла будет способствовать образованию мелких газовых пузырей, максимальный диаметр которых определяется формулой (3).

При пленочном кипении масла возможно образование пузырей разных диаметров. Общий объем этих пузырей можно рассчитать, пользуясь выражением (4). При этом максимально устойчивый объем способный длительно существовать в масле, определяется выражением (5).

Газовые пузыри, образовавшиеся вследствие разложения масла при возникновении внутри трансформатора перегрева, будут растворяться в масле. Процесс растворения газовых пузырей в жидкости теоритически рассмотрен в [5]. Экспериментальные результаты о времени жизни τ газовых пузырей в минеральном масле были получены Пинталем [7].

Если время жизни газового пузыря будет больше времени, требуемого для перемещения его от места повреждения до верхней крышки бака трансформатора, то, казалось бы, пузыри будут скапливаться в газовом реле и этого условия достаточно для его срабатывания. Однако это не совсем так. Под крышкой бака масло, перемешивается в горизонтальном направлении. Следовательно, поправление перемещения газового пузыря будет определяться помимо вертикальной составляющей скорости еще и горизонтальной.

Газовые пузыри, образовавшиеся в жидкости, поднимаются вверх с различной скоростью в зависимости от физико-химических параметров жидкости и объема газового пузыря. Мелкие пузыри (диаметром не более 0,1–0,15 см) при перемещении вверх практически не деформируются и ведут себя аналогично твердым несжимаемым шарикам [6]. Тогда скорость их перемещения вертикально вверх

$$u_{\perp} = \frac{2}{9} \frac{gR^2}{\nu}, \quad (6)$$

где g — ускорение силы тяжести; ν — кинематическая вязкость

Более крупные пузыри деформируются, приобретая в сечении форму эллипса. Поэтому вертикальная скорость таких пузырей будет меньше и равна [5]:

$$u_{\perp} = 2\sqrt{\frac{g2R}{\nu}}. \quad (7)$$

Для газовых пузырей диаметром 0,2-0,3 см и более скорость перемещения вертикально вверх не зависит от диаметра пузыря, а форма их в сечении – диск. Выражение для расчета вертикальной скорости перемещения таких пузырей имеет вид [5]:

$$u_{\perp} = \frac{2}{3} \left(\frac{4\sigma^2 g}{3\alpha\rho\eta} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (8)$$

где α – постоянная равная приблизительно 0,5; ρ – плотность жидкости.

При расчетах по формулам (6) – (8) физико-химические параметры трансформаторного масла были такими: $\rho=0,92$ г/см³, $\sigma = 0,04$ Н/м, $\eta = 0,02$ Па с [7].

Условие достижения пузырем верхней крышки бака трансформатора можно записать в виде:

$$\frac{u_{\perp}}{u_M} \geq \frac{h}{L},$$

где u_M – горизонтальная скорость масла под крышкой бака; h – расстояния от места перемещения масла в горизонтальном направлении до верхней крышки бака по вертикали; L –расстояние по горизонтали от места повреждения до места расположения всасывающих масло патрубков.

Разложение трансформаторного масла, как было указано выше, наступает при температуре кипения жидкости. Величина перегрева поверхности, при которой наступает пузырьчатое кипение, зависит от чистоты обработки поверхности, от скорости движения и давления жидкости. Скорость перемещения масла под крышкой бака для мощных трансформаторов с принудительной циркуляцией масла около 8 см/с [8]. На металлических поверхностях, не подвергнутых специальной обработке, при давлении жидкости до $2 \cdot 10^5$ Па и скорости до 10 см/с пузырьчатое кипение углеводородов по данным [2] наступает при перегреве не более чем в 50°С. Следовательно, в месте перегрева пузырьчатое кипение масла наступит при температуре около 430°С. При этом максимальный диаметр отрывающихся от поверхности пузырей будет около 0,03 см и за секунду с 1 см² их будет отрываться около $1 \cdot 10^{-5}$ 1/(с · см²) штук [2]. Величину давления в паровом пузыре p'_{II} (3) определим по формуле [3]

$$p'_{II} = p_{ж} + \Delta T \frac{HJ\rho_{II}}{T_M}, \quad (9)$$

где $p_{ж}$ – давление жидкости в месте перегрева; ΔT – перегрев при пузырьчатом кипении;

T_M – температура кипения масла; H – скрытая теплота парообразования масла;

J – механический эквивалент теплоты; ρ_{II} – плотность паров масла.

Для оценочных расчетов H определяем из формулы, предложенной Трутоном [8]:

$$H=2lT_M/\mu_{\text{п}}$$

Окончательно давление в паровом пузыре будет:

Подставив в (9) $\Delta T = 50$ К, $\rho_{\text{п}} = 50 \cdot 10^3$ г/см³ и $\mu_{\text{п}} = 280$, получим, что давление в паровом пузыре в полтора раза больше давления, создаваемого маслом, т. е. $p_{\text{п}} = 1,5p_{\text{ж}}$.

Давление в газовом пузыре:

$$p_2 = p_{\text{ж}} + \frac{2\sigma}{R},$$

где R – радиус пузыря, равный приблизительно 0,01 см.

Поскольку $\sigma = 0,04$ Н/м, то давление в газовом пузыре можно принять равным давлению в жидкости.

При 430°C трансформаторное масло разлагается с выделением различных газов. При этом их количество составляет 0,1% массы масла, а молекулярная масса газовой смеси 46. Подставив найденные значения в (3), получим:

$$d_1 = D_1 \sqrt{n_1 \frac{\mu_n p_n}{\mu_2 p_2}} = 0,033 \sqrt{0,01} \cdot \frac{280}{46} 1,5 \approx 0,014.$$

Следовательно, при возникновении пузырчатого кипения в месте перегрева газовые пузыри, образовавшиеся вследствие разложения масла будут иметь максимальный диаметр, не превышающий 0,014 см.

При нахождении таких пузырей в промежутке между магнитопроводом и верхней крышкой бака вертикальная скорость их перемещения согласно (6) равна $0,4 - 10^{-2}$ см/с. Газовые пузыри, перемещающиеся с такой скоростью, могут попасть в газовое реле в том случае, если произведение h/Lu_M будет менее $0,4 - 10^{-2}$ или отношение h/L менее $5 \cdot 10^{-4}$. Такое соотношение для силовых трансформаторов не может быть выполнено даже в том случае, когда повреждение расположено в наиболее удаленном от всасывающих масло труб месте магнитопровода.

Время жизни пузырей диаметром 0,014 см по данным [6] около 250 с.

Таким образом, при возникновении пузырчатого кипения масла в месте перегрева образующиеся вследствие разложения масла газы формируются в заде пузырей с максимальным диаметром, не превышающим 0,014 см. Газовые пузыри такого диаметра не могут достигнуть верхней крышки бака трансформатора из-за горизонтальной скорости перемещения масла в пространстве, расположенном между магнитопроводом и верхней крышкой бака. Газовые пузыри, циркулируя в потоке масла, будут медленно растворяться в нем. При этом время жизни таких пузырей – время, прошедшее от момента возникновения до полного их растворения – около 250 с.

При пленочном режиме кипения трансформаторного масла объем отделяющегося пара в единицу времени [2]:

$$V_{II} = \frac{q_{кр}}{H\rho_{II}} S.$$

Критический тепловой поток при возникновении пленочного кипения $q_{кр}$ для теплоносителей типа минеральное масло для приближенных расчетов может быть принят равным $1,75 \cdot 10^6$ Дж/(м²-с) [9]. Молекулярная масса выделившегося газа при разложении масла при наступлении пленочного кипения равна 36, а его количество составляет 20% массы масла. Принимая, как и прежде, отношение $p_{II} / p_2 = 1,5$ после подстановки в (4) численных значений, получаем:

$$V_2 = 0,6S. \quad (10)$$

Расчеты по (5) и (8) показывают, что максимальный объем газа, который может существовать в жидкости, равен $V_2 = 60$ см³, а вертикальная скорость его перемещения $u_{II} = 20$ см/с.

Из (10) видно, что при пленочном кипении масла газовое реле практически сработает при любом расположении места повреждения за исключением тех мест, которые расположены в непосредственной близости от всасывающих масло труб. При скорости перемещения газового пузыря 20 см/с отношение $u_{II} / u_2 = 2,5$. Следовательно, при $h/L \geq 2,5$ газовое реле не зафиксирует повреждение даже при пленочном кипении масла в месте перегрева.

Изучение актов осмотра трансформаторов, вышедших из работы после срабатывания газового реле, показывает, что в случае перегрева имеют место выгорание части магнитопровода, оплавления в месте подсоединения отвода обмотки к вводу или же оплавление металлической детали, случайно попавшей внутрь трансформатора. Такие явления характерны для пленочного кипения, что подтверждает предположения о закономерности формирования газовых пузырей при возникновении внутри трансформатора перегревов.

Газовое реле трансформатора регистрирует только те перегревы, которые вызывают пленочное кипение масла и сопровождаются оплавлением или выгоранием металла. В то же время применение газовой защиты на основе механических газовых реле не допускается в сейсмоопасных районах, так как возможно ее ложное срабатывание и при межвитковых замыканиях не будет происходить отключение масляного трансформатора, что снижает надежность его работы. Таким образом, обнаружение очага повреждений с помощью ультразвуковой локализации может стать более эффективным способом, так как позволяет фиксировать пузырьки газов и, соответственно, перегревы на более ранней стадии их возникновения. Так, при 270°C начинается газовыделение, при $t = 337^\circ\text{C}$ происходит выпадение осадка. Образовавшиеся при этом пузырьки газа диаметром около 0,015 см растворяются в масле. При температуре выше 340°C от нагретых участков начинает подниматься поток пара и газа, пузыри которых имеют значительный объем (до 60 см³).

Скорость и поглощение звука в жидкости зависит от концентрации и размеров пузырьков, растворенных в масле. При малом содержании пузырьков скорость звука в масле определяется формулой

$$C = \lambda \cdot f,$$

где λ – длина волны м, f – частота звуковых волн Гц.

Наиболее интенсивное поглощение звуковых волн и резкое изменение скорости их распространения наблюдается при условии, когда длина звуковой волны становится равной среднему диаметру пузырьков. Положив частоту излучения пьезокерамической пластинки, которая является источником звуковых волн, порядка 1 МГц, скорость распространения звуковых волн при комнатной температуре 1390 м/с, для длины волны получим значение 1.39 мм. Если диаметр пузырьков в жидкости меньше этой величины, их присутствие не сказывается на скорости звука.

При отсутствии пузырьков в масле скорость звука уменьшается с повышением температуры и уменьшением плотности, причем зависимость скорости звука от плотности определяется уточненным правилом Рао [10]

$$C = A \cdot \rho^{3.05}$$

где A – эмпирическая постоянная, равная для трансформаторного масла 2038,7 м/с и определяемая при 20°C (табл.1).

Таблица 1 – Зависимость скорости звука от температуры и плотности масла

t°C	ρ , кг/м ³	C, м/с	$\Delta C/\Delta T$, м/сК
-10	899	1473	2,98
0	893	1444	2,94
10	887	1414	2,91
20	882	1390	2,84
40	870	1333	2,76
60	858	1278	2,70
80	847	1229	2,64

В момент начала интенсивного выделения газа средний объем пузырьков становится настолько большим, что их диаметры становятся сравнимыми с длиной звуковой волны, что приводит к резкому отклонению от правила Рао для скорости звука и значительному увеличению поглощения звуковых волн. При температуре 270°C скорость звука в трансформаторном масле в отсутствие пузырьков составляет 734 м/с, в момент начала газового выделения скорость звука будет порядка 700 м/с. Такое изменение скорости звука может быть надежно зафиксировано и может служить сигналом начала интенсивного выделения газов в трансформаторном масле.

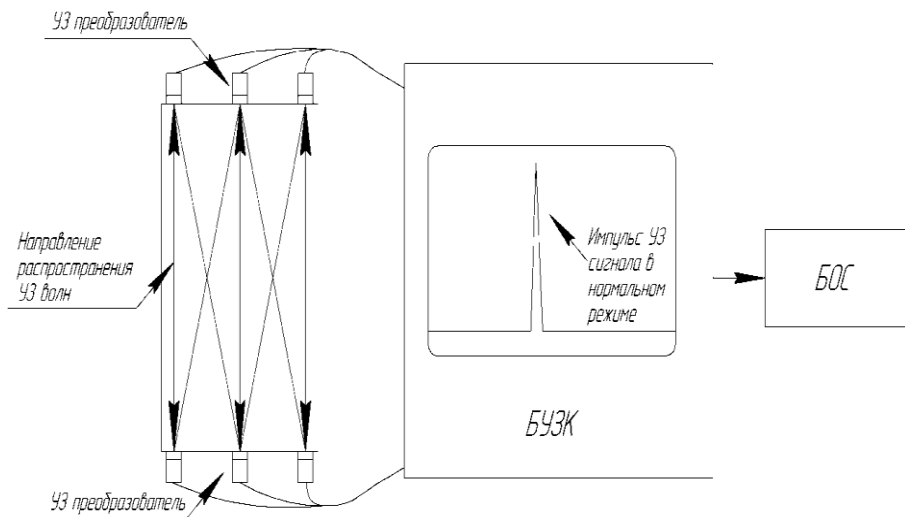


Рис. 1. – Способ ультразвуковой газовой защиты с использованием ультразвуковых преобразователей

Сигнал с ультразвуковых преобразователей подается в блок ультразвукового контроля (БУЗК). В нормальном режиме работы трансформатора на экране блока ультразвукового контроля наблюдается постоянный сигнал, свидетельствующий об отсутствии повреждений внутри бака трансформатора.

В случае начала газообразования пузырьки газа, проходя через зону распространения ультразвукового сигнала, препятствуют прохождению сигнала, он искажается, при этом на экране блока ультразвукового контроля нет постоянного сигнала, и, с помощью блока оцифровки сигнала (БОС), формируется команда релейной защите на отключение трансформатора.

Результаты исследований

Техническим эффектом предлагаемого способа ультразвуковой газовой защиты масляного трансформатора [11] является существенное уменьшение времени срабатывания защиты и повышение надежности защиты масляных трансформаторов.

Время обнаружение пузырьков газа с помощью ультразвуковой газовой защиты в самом неблагоприятном случае составляет 0,5 с, что существенно повышает быстродействие защиты.

Чтобы ультразвуковое излучение не стало само причиной возникновения пузырьков газа в масле (явление кавитации), интенсивность излучения не должна превышать некоторых значений. В работе [12] приводятся численные показатели интенсивности излучения ультразвука, при которой в жидкой среде наступает «развитый» кавитационный процесс для различных

жидкостей. Так, для трансформаторного масла вязкостью $30 \cdot 10^{-3}$ Па оптимальная интенсивность излучения ультразвука 4 – 6 Вт/см².

Выводы

1. Изменение скорости звука в трансформаторном масле указывает на начальный момент газовыделения, и тем самым позволяет обнаружить возникновение повреждений внутри бака на ранней стадии.

2. Построение принципиальной схемы защиты трансформатора может быть основано на регистрации изменения скорости звука или на поглощении звуковых волн в момент начала газовыделения.

Список литературы: 1. Газовыделение при повреждении силовых трансформаторов. *Смирнов М.А.* Труды ВНИИЭ. – М. : Энергия, 1976. – вып. 49. С.35 – 42. 2. *Тонг Л.* Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. М., «Мир», 1960. 280с. 3. *Скрипов В.* Метастабильная жидкость. М., «Наука», 1972. 280 с. 4. *Стерман Л. С.* Обобщение экспериментальных данных по барботажу пара через жидкость.— «ЖТФ», 1956, т. XXVI, вып. 7, С. 1519 – 1524. 5. *Левич Б.* Физико-химическая гидравлика. М., «Наука», 1952. 600 с. 6. *Пинталъ Ю. С.* Растворение газовых включений в минеральном изоляционном масле. – «Известия вузов. Сер. Энергетика», 1964, № 7. –С. 95 – 98. 7. *Липштейн Р., Шахнович М.* Трансформаторное масло. М., «Энергия», 1968. 350 с. 8. *Чернев К. К.* Мощные трансформаторы. М., «Энергия», 1972. 120 с. 9. *Чечеткин А.* Высокотемпературные теплоносители. М., Госэнергоиздат, 1962. 421 с. 10. *TS Rao; N Veeraiah and C. Rambabu*, Indian J Pure Appl Phys., 2002,40, 850 11. Патент №2399909 РФ МПК G01N23/20. Способ ультразвуковой газовой защиты масляного трансформатора. / *Бирюлин В.И., Хорошилов Н.В., Ларин О.М.* Оpubл. 20.09.2010г. – Бюл. №26. 12. *В. Хмелев, Р. Голях, С. Хмелев, Р. Барсуков.* Метод расчета оптимальных интенсивностей ультразвукового кавитационного воздействия на вязкие и высокодисперсные жидкие среды – Сборник докладов XII Международной конференции-семинара молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам EDM, БТИ АлтГТУ, 2011, С. 61 – 69.

Bibliography (transliterated): 1. Smirnov, M.A. *Gassing at damaged power transformers.* Proceedings VNIIE. Moscow : Energiya, 1976. Moscow : 49th ed. P.35-42. [Print]. 2. Tong, L. *Boiling heat transfer and two-phase flow.* Moscow : "Mir ", 1960. p.280. [Print]. 3. Skripov, V. *Metastable liquid.* Moscow : "Nauka", 1972. 280 p. [Print]. 4. Sterman, L.S. *Generalization of experimental data on the bubbling steam through the liquid.* "Technical Physics ", 1956, Vol. 26, 7th ed. 1519-1524. [Print]. 5. Levich, B. *Physicochemical hydraulics.* Moscow : "Nauka", 1952. 600 p. [Print]. 6. Pinal, S. *Dissolution of gas inclusion in mineral insulating oil.* "Proceedings of the universities. Ser. Energy ", 1964, No 7, p. 95 - 98. [Print]. 7. Lipshteyn, R. and M.Shahnovich, *Transformer oil.* Moscow : "Energy", 1968. 350 p. [Print]. 8. Chernev, K.K. *Powerful transformers.* Moscow : "Energy", 1972. 120 p. 9. Chechetkin, A. *High coolants.* Moscow : Gosenergoizdat 1962. 421 p. [Print]. 10 . Rao, T.S., N. Veeraiah and C. Rambabu, Indian J Pure Appl Phys., 2002,40, 850 11. *Patent number 2399909 RF IPC G01N23/20. The ultrasonic gas oil transformer protection.*- Biryulin V.I., N.V. Khoroshilov and O.M. Larin. Publ. 20.09.2010g.-Bull. Number 26. [Print]. 12. Khmelev, R. et al. *Method of calculating the optimal intensity of ultrasonic cavitation on the highly- viscous and liquid media* - Proceedings of the XII International Conference and Seminar of Young Specialists on micro-and nanotechnology and electronic devices EDM, БТИ АлтГТУ, 2011, pp. 61 - 69. [Print].

Поступила (received) 06.06.2014



Сергеев Сергей Александрович
зав. каф. электроснабжения ЮЗГУ, канд. техн. наук,
доцент каф. электроснабжения
E-mail: ssa-cib@yandex.ru



Бирюлин Владимир Иванович
канд. техн. наук,
доцент каф. электроснабжения,
E-mail: bir1956@mail.ru



Ларин Олег Михайлович
канд. техн. наук,
доцент каф. электроснабжения,
E-mail: larin77@mail.ru



Хорошилов Николай Владимирович
канд. техн. наук,
доцент каф. электроснабжения,
E-mail: hnv80@mail.ru



Горлов Алексей Николаевич
канд. техн. наук,
доцент каф. электроснабжения,
E-mail: alexjulia17@yandex.ru



Чернышев Александр Савельевич
канд. техн. наук,
доцент каф. электроснабжения,
E-mail: tscherl@rambler.ru



Куделина Дарья Васильевна
аспирант
E-mail: mary_joy@mail.ru