



УДК/UDC 621.317.39:543.712

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-58-64

EDN: AHCSBY

Научная статья / Original article

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ПО ИЗМЕРЕННОЙ ДОБРОТНОСТИ

Д. В. Половинка, Ю. В. Рублева, М. Н. Ивлев

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
Россия, Луганская Народная Республика, 291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А

В работе рассматриваются вопросы определения влагосодержания трансформаторного масла. Предложена система оперативного определения влагосодержания трансформаторного масла в процессе его эксплуатации. Получены рекуррентные аналитические зависимости емкости и активного сопротивления измерительного преобразователя с трансформаторным маслом от интегрального напряжения заряда и разряда. Задача вычисления емкости и активного сопротивления по рекуррентным формулам возложена на микроконтроллер в составе устройства регистрации напряжения.

Ключевые слова: трансформаторное масло, качество, методика испытаний, аппаратура, жидкий диэлектрик, добротность, функция Ламберта, микропроцессор.

Для цитирования: Половинка Д. В., Рублева Ю. В., Ивлев М. Н. Система контроля влагосодержания трансформаторного масла по измеренной добротности // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 58–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-58-64. EDN: AHCSBY.



© Половинка Д. В., Рублева Ю. В., Ивлев М. Н., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MOISTURE CONTENT CONTROL SYSTEM FOR TRANSFORMER OIL USING MEASURED Q-FACTOR

D. V. Polovinka, Yu. V. Rubleva, M. N. Ivlev

Lugansk Vladimir Dahl State University,
Russia, Lugansk People's Republic, Lugansk, Molodezhnyy Blk., 20A, 291034

This paper discusses the issues of determining the moisture content in transformer oil. A system for the rapid determination of the moisture content in transformer oil during its operation is proposed. Recurrent analytical relationships for the capacitance and active resistance of a measuring transducer with transformer oil as a function of the integral charge and discharge voltage have been derived. The task of calculating the capacitance and active resistance using these recurrent formulas is assigned to a microcontroller within the voltage recording device.

Keywords: transformer oil, quality, testing method, equipment, liquid dielectric, quality factor, Lambert function, microprocessor.

For citation: Polovinka D. V., Rubleva Yu. V., Ivlev M. N. Moisture content control system for transformer oil using measured Q-factor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 58–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-58-64. EDN: AHCSBY.



© Polovinka D. V., Rubleva Yu. V., Ivlev M. N., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Влияние влаги на ухудшение электроизоляционных свойств трансформаторного масла (ТМ) и изоляционных материалов трансформатора исследовано и охарактеризовано достаточно полно [1–3].

Известные методы контроля влажности ТМ [1, 4, 5] обладают рядом недостатков и в большей части требуют лабораторного контроля.

Для оперативного определения влагосодержания ТМ предлагается система контроля, основанная на принципе высокочастотного измерения добротности масла. Основным элементом системы является датчик — емкостный измерительный преобразователь проточного типа, установленный на трансформаторе.

Влагосодержание ТМ существенно влияет на его диэлектрические свойства. Повышение влагосодержания приводит к снижению удельного электрического сопротивления из-за наличия воды в эмульгированном состоянии и к увеличению диэлектрической проницаемости масла, что вызывает увеличение ёмкости. Вода имеет высокую относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{воды}} \approx 80$ по сравнению с диэлектрической проницаемостью ТМ, у которого она составляет 2,2...2,4. Наличие влаги в ТМ увеличивает его среднюю диэлектрическую проницаемость ϵ . Поэтому емкость используемого коаксиального проточного конденсатора с размещённым в нем трансформаторным маслом, которое содержит определенное количество влаги, может быть определена как

$$C = 2\pi \cdot l \cdot \ln(r_{\text{нар.}} / r_{\text{внутр.}}) \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{m_{\text{в}} \cdot \epsilon_{\text{в}} + m_{\text{м}} \cdot \epsilon_{\text{м}}}{m_{\text{в}} + m_{\text{м}}}, \quad (1)$$

где l — длина коаксиального конденсатора; $r_{\text{нар.}}$ и $r_{\text{внутр.}}$ — наружный и внутренний радиус коаксиального конденсатора; $m_{\text{в}}$ и $m_{\text{м}}$ — масса воды в масле и масса чистого трансформаторного масла (без влаги); $\epsilon_{\text{в}}$ и $\epsilon_{\text{м}}$ — диэлектрическая проницаемость воды и трансформаторного масла; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость, равная $10^{-9}/(36\pi)$.

1. Функциональная схема системы и процесс измерения добротности

Измерение добротности ТМ, находящегося в преобразователе, производится путем определения заряда, накапливаемого преобразователем с ТМ, как показано на рис. 1.

Принцип действия этой схемы состоит в следующем. Генератор G1 генерирует прямоугольные импульсы с частотой f_1 , которые поступают на измерительный преобразователь (ИП) через высокопрецизионное сопротивление R_1 . С момента подачи первого импульса на ИП ведется циклическое измерение напряжения на ИП устройством регистрации напряжения (УРН). Процесс заряда длится до появления отрицательного фронта импульса, после которого формируется пауза и происходит параллельное подключение высокопрецизионного резистора R_2 ключом S . При этом начинается процесс разряда ИП через R_2 , для которого также ведется циклическое измерение напряжения на ИП. Этот процесс длится до появления положительного фронта импульса генератора, а затем все повторяется в цикле.

Поскольку конструкция измерительного преобразователя выполнена в виде коаксиального проточного конденсатора (рис. 2), то напряжение

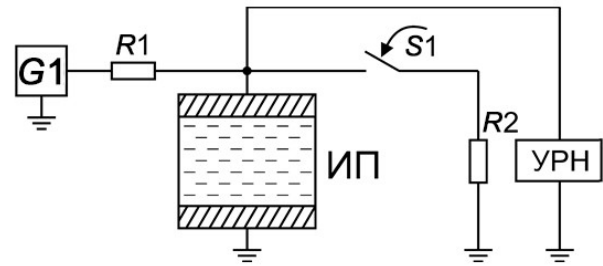


Рис. 1. Схема измерения добротности
Fig. 1. Q-factor measurement circuit

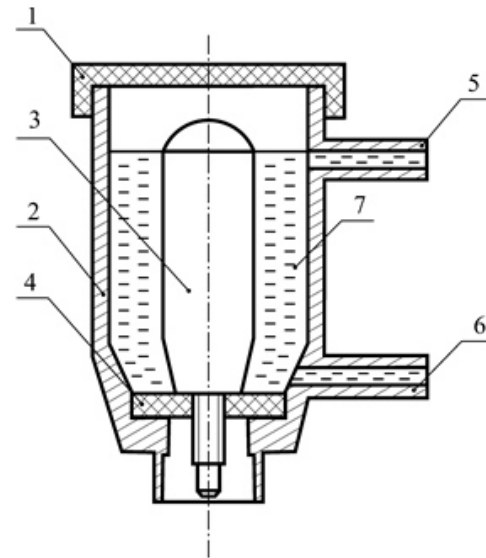


Рис. 2. Измерительный проточный коаксиальный преобразователь: 1 — крышка; 2 — корпус; 3 — электрод; 4 — изоляционная шайба; 5 — входной трубчатый канал; 6 — выходной трубчатый канал; 7 — трансформаторное масло

Fig. 2. Measuring flow-through coaxial transducer: 1 — cover; 2 — housing; 3 — electrode; 4 — insulating washer; 5 — inlet tubular channel; 6 — outlet tubular channel; 7 — transformer oil

на ИП, наполненном ТМ, будет изменяться по кривой 1, как показано на рис. 3.

Измерительный проточный коаксиальный преобразователь является составной конструкцией. Крышка 1, выполненная из плексигласа, накручивается по резьбе корпуса 2, который выполнен из бронзы. Внутри корпуса 2 устанавливается изоляционная шайба 4, на которой закреплен центральный электрод 3. Через входной трубчатый канал 5 в ИП подается ТМ 7, а через выходной трубчатый канал 6 оно выводится из ИП. Воздействующий сигнал (напряжение) подается на центральный электрод 4 и корпус 2.

При этом УРН, регистрирующее напряжение на ИП, должно измерять текущее напряжение с частотой намного выше частоты генератора G1, чтобы получить ступенчатую кривую 2, которая максимально близко повторяла бы кривую 1.

Резистор R_1 должен быть подобран таким образом, чтобы максимальное значение на кривой заряда составляло 90–95 % от выходного напряжения генератора G1, а резистор R_2 должен быть подобран так, чтобы минимальное значение на кривой разряда составляло 5–10 % от выходного напряжения

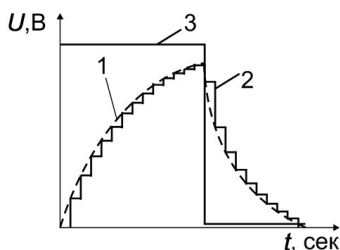


Рис. 3. Осциллограммы заряда и разряда емкости ИП:
1 — напряжение на ИП;
2 — напряжение, измеренное УРН;
3 — напряжение с выхода генератора G1

Fig. 3. Oscillograms of the power supply capacitance charge and discharge:
1 — voltage on the power supply;
2 — voltage measured by the voltage regulator;
3 — voltage from the output of generator G1

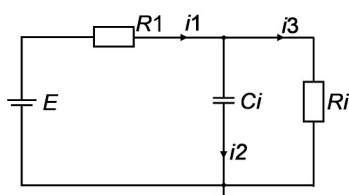


Рис. 4. Схема замещения процесса заряда ИП с трансформаторным маслом

Fig. 4. Equivalent circuit of the charging process of a power supply with transformer oil

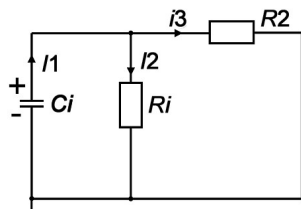


Рис. 5. Схема замещения процесса разряда ИП с трансформаторным маслом

Fig. 5. Equivalent circuit of the discharging process of a power supply with transformer oil

генератора G1. Это необходимо, так как при отклонении напряжений от указанных пределов при той же частоте $f1$ может снижаться точность контроля.

2. Схемы замещения для процесса заряда и процесса разряда

Добротность измерительного преобразователя с ТМ зависит от соотношения активной проводимости к реактивной. Таким образом, для определения добротности необходимо измерить емкостную и активную составляющие проводимости ИП с ТМ. Для этого вначале необходимо получить зависимость напряжения заряда и напряжения разряда от времени ($U_3 = f(t)$) и ($U_p = f(t)$). Измерение зависимостей напряжения заряда и напряжения разряда от времени производится в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.

Полученные результаты будут непосредственно коррелировать с емкостью и активной проводимостью ИП с трансформаторным маслом. Однако необходимо получение обратных зависимостей емкости и активного сопротивления ИП от интегрального значения напряжения заряда и напряжения разряда $C_i = f(U_3, U_p)$ и $R_i = f(U_3, U_p)$. Поэтому были составлены схемы замещения для процесса заряда и процесса разряда.

Когда в течение 0,5 секунды происходит заряд емкости ИП с трансформаторным маслом, то цепь разряда отключена, а переходным сопротивлением ключа S1 и внутренним сопротивлением генератора G1 можно пренебречь. Принимаем, что в процессе заряда ИП генератор будет источником постоянного напряжения, поскольку процесс заряда по длительности равен времени импульса генератора G1 и равен 0,5 секунды. При указанных допущениях была получена схема замещения процесса заряда ИП с трансформаторным маслом, представленная на рис. 4.

Когда в течение 0,5 секунды происходит разряд емкости ИП с трансформаторным маслом, то цепь заряда отключена, а переходным сопротивлением ключа S1 можно пренебречь и считать, что конденсатор заряжен до своего максимального значения напряжения. При указанных допущениях была получена схема замещения процесса разряда ИП с трансформаторным маслом, представленная на рис. 5.

3. Расчет прямых и обратных аналитических зависимостей для процессов заряда и разряда

Расчет аналитических зависимостей для процесса заряда

Для определения зависимости напряжения заряда на ИП U_3 от емкости C_i и активного сопротивления R_i в схеме замещения, показанной на рис. 4, была составлена система уравнений по I и II законам Кирхгофа при нулевых начальных условиях [6–8]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ i_1 R_1 + \frac{1}{C_i} \int i_2 dt = E \\ i_1 R_1 + i_3 R_i = E \end{cases} \quad (2)$$

Для свободных токов система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ i_1 R_1 + \frac{1}{C_i} \int i_2 dt = 0 \\ i_1 R_1 + i_3 R_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Переходя к операторной форме, получаем [6–8]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ i_1 R_1 + \frac{i_2}{C_i p} = 0 \\ i_1 R_1 + i_3 R_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Решать полностью всю систему необязательно, поскольку нет необходимости в получении значений токов цепи, но следует определить зависимость

напряжения заряда от параметров ИП с трансформаторным маслом, поэтому составляем матрицу для определителя системы:

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R_1 & \frac{1}{C_I p} & 0 \\ R_1 & 0 & R_I \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Из составленной матрицы находим характеристическое уравнение [6]:

$$\frac{R_1 + R_I + C_I \cdot p \cdot R_1 \cdot R_I}{C_I \cdot p} = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение содержит только один корень, который не равен 0:

$$p = \frac{-R_1 - R_I}{R_1 \cdot R_I \cdot C_I}. \quad (7)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, можно рассмотреть процесс, который описывается уравнением для тока заряда конденсатора:

$$i_c = A_3 \cdot e^{pt}. \quad (8)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, также можно рассмотреть процесс заряда конденсатора, который описывается уравнением для напряжения на конденсаторе [7, 8]:

$$U_c = A \cdot (1 - e^{pt}). \quad (9)$$

Площадь под кривой заряда измерительного преобразователя определяется для напряжения:

$$S = A_3 \int (1 - e^{pt}) dt = A_3 \cdot \left(t - \frac{1}{p} \cdot e^{pt} \right). \quad (10)$$

Величину этой площади можно получить путем суммирования напряжений за время 0,5 секунды, пока происходит разряд, и умножив эту сумму на величину промежутка между измерениями dt :

$$A_3 \cdot \left(t - \frac{1}{p} \cdot e^{pt} \right) = dt \sum_{n=1}^m U_n. \quad (11)$$

Отсюда получим значение p , используя функцию Ламберта W [9]:

$$p = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_3 \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (12)$$

Поскольку корень характеристического уравнения равен $p = \frac{-R_1 - R_I}{R_1 \cdot R_I \cdot C_I}$, то, подставив (7) в (12), получаем следующее равенство:

$$\frac{-R_1 - R_I}{R_1 \cdot R_I \cdot C_I} = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_3 \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (13)$$

Поскольку в уравнении (13) присутствует два неизвестных C_I и R_I , то вычислить их значение станет возможным после получения равенства, такого же, как (13), но для процесса разряда. Выразим C_I и R_I друг через друга:

$$C_I = (R_1 + R_I) \times \frac{t}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 \cdot R_I}. \quad (14)$$

$$R_I = t \cdot \frac{R_1}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 \cdot C_I - t}. \quad (15)$$

В уравнениях (14) и (15) параметры C_I и R_I зависят друг от друга, и получить их решение без получения подобных аналитических зависимостей для процесса разряда не представляется возможным.

Расчет прямых и обратных аналитических зависимостей для процесса разряда

Для определения зависимости напряжения заряда на ИП U_p от емкости C_I и активного сопротивления R_I в схеме замещения, показанной на рис. 5, была составлена система уравнений по I и II законам Кирхгофа [6] при нулевых начальных условиях [7, 8]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ \frac{1}{C_I} \int i_1 dt + i_2 R_I = 0 \\ \frac{1}{C_I} \int i_1 dt + i_3 R_2 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Переходя к операторной форме, получаем [6]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ \frac{i_1}{C_I p} + i_2 R_I = 0 \\ \frac{i_1}{C_I p} + i_3 R_2 = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Решать полностью всю систему не нужно, поскольку нет необходимости в получении значений токов цепи, но есть необходимость в получении зависимости напряжения заряда от параметров ИП с трансформаторным маслом, поэтому составляем матрицу для определителя системы:

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ \frac{1}{C_I p} & R_I & 0 \\ \frac{1}{C_I p} & 0 & R_2 \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Из составленной матрицы находим характеристическое уравнение [6]:

$$\frac{R_2 + R_l + C_l \cdot p \cdot R_2 \cdot R_l}{C_l \cdot p} = 0. \quad (19)$$

Данное уравнение имеет только один корень, который не равен 0:

$$p = \frac{-R_2 - R_l}{R_2 \cdot R_l \cdot C_l}. \quad (20)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, можно рассмотреть процесс, который описывается уравнением для тока разряда конденсатора:

$$i_c = A_p \cdot e^{pt} \quad (21)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, также можно рассмотреть процесс разряда конденсатора, который описывается уравнением для напряжения на конденсаторе [7, 8]:

$$U_c = A_p \cdot e^{pt} \quad (22)$$

Площадь под кривой заряда измерительного преобразователя определяется для напряжения:

$$S = A_p \int e^{pt} dt = \frac{A_p}{p} \cdot e^{pt} \quad (23)$$

Величину этой площади можно получить путем суммирования напряжений за время 0,5 сек., пока происходит разряд, и умножив эту сумму на величину промежутка между измерениями dt :

$$\frac{A_p}{p} \cdot e^{pt} = dt \sum_{n=1}^m U_n. \quad (24)$$

Отсюда получим значение p , используя функцию Ламберта W [9]:

$$p = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (25)$$

Поскольку корень характеристического уравнения равен $p = \frac{-R_2 - R_l}{R_2 \cdot R_l \cdot C_l}$, то, подставив (20) в (25), получаем следующее равенство:

$$\frac{-R_2 - R_l}{R_2 \cdot R_l \cdot C_l} = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (26)$$

Откуда находим значение C_l и R_l :

$$C_l = (R_2 + R_l) \cdot \frac{t}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_2 \cdot R_l}. \quad (27)$$

$$R_l = t \cdot \frac{R_2}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_2 \cdot C_l - t}. \quad (28)$$

Полагая, что C_l неизменно и для процесса заряда, и для процесса разряда, приравняем (14) и (27):

$$\frac{(R_1 + R_l) \cdot t}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 \cdot R_l} = \frac{(R_2 + R_l) \cdot t}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_2 \cdot R_l}. \quad (29)$$

Поскольку максимальное напряжение заряда равно максимальному напряжению разряда, $A_3 = A_p$, то из (29) определяем активное сопротивление ИП:

$$R_l = -R_1 \cdot R_2 \times \frac{W \left(A \cdot \frac{t}{-A \cdot t - dt \sum_{n=1}^m U_{n3}} \right) - W \left(-A \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right)}{W \left(-A \cdot \frac{t}{A \cdot t - dt \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 - W \left(-A \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right) \cdot R_2}. \quad (30)$$

Полагая, что R_l неизменно и для процесса заряда, и для процесса разряда, приравняем (15) и (28):

$$\frac{R_1 \cdot t}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \sum_{n=1}^m U_{n3}} \right) \cdot R_1 \cdot C_l - t} = \frac{R_2 \cdot t}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right) \cdot R_2 \cdot C_l - t}. \quad (31)$$

Поскольку максимальное напряжение заряда равно максимальному напряжению разряда, $A_3 = A_p$, то из (31) определяем емкость ИП:

$$C_l = -t \times \frac{R_1 - R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot \left(W \left(-A \cdot \frac{t}{A \cdot t - dt \sum_{n=1}^m U_{n3}} \right) - W \left(-A \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right) \right)}. \quad (32)$$

Таким образом, сначала измеряется напряжение заряда U_{nz} и разряда U_{np} через фиксированный промежуток времени dt (равный времени одного преобразования АЦП [10]) за время заряда, равное времени разряда t , а именно 0,5 сек. Затем, зная R_1 и R_2 , с использованием функции Ламберта вычисляются R_1 по (30) и C_1 по (32). По указанным параметрам преобразователя вычисляется добротность по известной формуле:

$$Q = \omega R_1 C_1, \quad (33)$$

где ω — частота генератора G_1 , равная 1 Гц.

Следует заметить, что функция Ламберта вычисляется по рекуррентной формуле:

$$W_{j+1} = W_j - \frac{W_j e^{W_j} - x}{e^{W_j} (W_j + 1) - \frac{(W_j + 2)(W_j e^{W_j} + x)}{2W_j + 2}}, \quad (34)$$

где x — аргумент функции Ламберта [9]; W_j — значение вычисленной на предыдущей итерации функции Ламберта; W_{j+1} — значение вычисляемой на текущей итерации функции Ламберта.

Сначала задаются произвольным значением функции Ламберта [9], например, $W_j = 0$ вычисляется x по формуле:

$$x = W_j e^{W_j}. \quad (35)$$

Затем по (34) вычисляется следующее приближение для функции Ламберта W_{j+1} и происходит проверка: если $\Delta < W_{j+1} - W_j$, то $W_j = W_{j+1}$, то расчет функции повторяется снова.

Выводы

1. Разработанный метод определения добротности ИП по интегральной величине контролируемого напряжения заряда позволяет непосредственно через градуировочные характеристики связать величину добротности с влажностью трансформаторного масла.

2. Использование функции Ламберта в аналитических зависимостях $C_1 = f(U_3, U_p)$ и $R_1 = f(U_3, U_p)$ приводит к необходимости использования в устройстве контроля влажности трансформаторного масла микропроцессора, способного реализовать алгоритм решения этих рекуррентных формул.

Список источников / References

- СТО 34.01-23.1-001—2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. Москва: ПАО «Россети», 2017. 42 с.
- СТО 34.01-23.1-001—2017. Ob'yem i normy ispytaniya elektrooborudovaniya [Scope and test standards electrical equipment]. Moscow, 2017. 42 p. (In Russ.).
- Сырцов А. И., Невзлин Б. И., Захарчук А. С., Джасим М. Д. Влияние влаги на свойства трансформаторного масла // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. 2011. № 11 (186). С. 385—387. EDN: WCABIB.
- Syrtsov A. I., Nevzlin B. I., Zakharchuk A. S., Dzhasim M. D. Vliyaniye vlagi na svoystva transformatornogo masla [Effect of humidity on the properties of transformer oil]. *Naukovi Pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Elektrotehnika i Energetika*. 2011. No. 11 (186). P. 385—387. EDN: WCABIB. (In Russ.).
- Аракелян В. Г. Диагностика состояния изоляции маслонаполненного оборудования по влагосодержанию масла //

Электротехника. 2004. № 3. С. 2—13. URL: <https://npa.transform.ru/articles/html/06exploitation/a000065.html> (дата обращения: 12.04.2025).

Arakelyan V. G. Diagnostika sostoyaniya izolyatsii maslonapolnennogo oborudovaniya po vlagosoderzhaniyu masla [Diagnostics of the insulation of oil-filled electrical equipment on the basis of oil moisture content]. *Elektrotehnika*. 2004. No. 3. P. 2—13. URL: <https://npa.transform.ru/articles/html/06exploitation/a000065.html> (accessed: 12.04.2025). (In Russ.).

4. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Ридель А. В. Анализ образования капель воды в трансформаторном масле и влияние на пробивную прочность жидкого диэлектрика // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 18—24. DOI: 10.34831/EP.2020.49.26.003. EDN: SASCTX.

Lyutikova M. N., Korobeynikov S. M., Ridel' A. V. Analiz obrazovaniya kapel' vody v transformatornom masle i vliyaniye na probivnyuyu prochnost' zhidkogo dielektrika [Analysis of water droplet formation in transformer oil and its effect on the breakdown strength of the liquid dielectric]. *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*. 2020. No. 5. P. 18—24. DOI: 10.34831/EP.2020.49.26.003. EDN: SASCTX. (In Russ.).

5. Гиззатова И. Д., Козлов В. К., Валиуллина Д. М., Гиниятуллин Р. А. Определение влаги и примесей в трансформаторном масле модифицированным методом Фишера // Аналитика. 2019. Т. 9, № 3. С. 232—235.

Gizzatova I. D., Kozlov V. K., Valiullina D. M., Giniatul'lin R. A. Opredeleniye vlagi i primesey v transformatornom masle modifitsirovannym metodom Fishera [Determination of moisture and impurities in transformer oil by the modified Fischer method]. *Analitika. Analytics*. 2019. Vol. 9, no. 3. P. 232—235. (In Russ.).

6. Туранов А. Н. Новые методы диагностики и изучения механизмов деградации трансформаторных масел: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2021. 32 с.

Turanov A. N. Novyye metody diagnostiki i izucheniya mekhanizmov degradatsii transformatornykh masel [New methods for diagnosing and studying of mechanisms of the transformer oil degradation]. Kazan, 2021. 32 p. (In Russ.).

7. IEEE Standard IEC 60422—2013. Mineral insulating oils in electrical equipment — supervision and maintenance guidance. International Electrotechnical Commission (IEC). Geneva, Switzerland, 2013. 93 p.

8. Буланов А. П. Представление суммы рекуррентной формулы определения показателей обратной функции Ламберта в виде разложения на более простые суммы // Труды Математического центра имени Н. И. Лобачевского: материалы XIII Междунар. Казанской летней науч. шк.-конф. 2017. Т. 54. С. 79—82.

Bulanov A. P. Predstavleniye summy rekurrentnoy formuly opredeleniya pokazateley obratnoy funktsii Lamberta v vide razlozheniya na boleye prostyye summy [Decomposition of the sum of the recurrent formula for exponents of the inverse Lambert function into simpler sums]. *Trudy Matematicheskogo tsentra imeni N. I. Lobachevskogo. Proceedings of the Mathematical Center named after N. I. Lobachevsky*. 2017. Vol. 54. P. 79—82. (In Russ.).

9. Соколов В. В., Лукашук В. А. Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов // Избранные труды / Соколов В. В.; сост. А. Г. Овсянников, В. Н. Осотов, В. Н. Бережной. Екатеринбург: Издат. дом «Автограф», 2010. С. 22—30.

Sokolov V. V., Lukashchuk V. A. Voprosy otsenki i obespecheniya nadezhnosti silovyykh transformatorov [Issues of the evaluation and reliability assurance of power transformers] // Izbrannyye trudy [Selected works] / Sokolov V. V.; comp. A. G. Ovsyannikov, V. N. Osotov, V. N. Berezhnoy. Ekaterinburg, 2010. P. 22—30. (In Russ.).

10. Sokolov V., Aubin J., Davydov V. [et al.]. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation. *CJGRE*, 2018. 51 p. ISBN 9782858730360.

ПОЛОВИНКА Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля), г. Луганск.

SPIN-код: 1719-2629

AuthorID (РИНЦ): 1239534

Адрес для переписки: polovinka@mail.ru

РУБЛЁВА Юлия Викторовна, ассистент кафедры «Электроэнергетика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

Адрес для переписки: ryuliya_87@rambler.ru

ИВЛЕВ Михаил Николаевич, аспирант кафедры «Электроэнергетика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 3693-7170

AuthorID (РИНЦ): 1269026

Адрес для переписки: mi-ivlev218@yandex.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

POLOVINKA Dmitriy Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electrical Power Engineering Department, Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk.

SPIN-code: 1719-2629

AuthorID (RSCI): 1239534

Correspondence address: polovinka@mail.ru

RUBLEVA Yuliya Viktorovna, Assistant of the Electrical Power Engineering Department, Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk.

IVLEV Mikhail Nikolayevich, Postgraduate of the Electrical Power Engineering Department, Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk.

SPIN-code: 3693-7170

AuthorID (RSCI): 1269026

Correspondence address: mi-ivlev218@yandex.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 30.06.2025; approved after reviewing 29.09.2025; accepted for publication 21.10.2025.