

Наука и просвещение: технологии и инновации

**Худоногов Игорь Анатольевич,**

профессор кафедры электроэнергетики транспорта,  
ИрГУПС, Иркутск;

**Пузина Елена Юрьевна,**

доцент кафедры электроэнергетики транспорта,  
ИрГУПС, Иркутск;

**Воякин Сергей Николаевич,**

доцент кафедры электропривода и автоматизации технологических процессов,  
Даль ГАУ, Благовещенск;

**Ижевский Андрей Станиславович,**

доцент кафедры электропривода и автоматизации технологических процессов,  
Даль ГАУ, Благовещенск;

**Шевченко Максим Валерьевич,**

доцент кафедры электроэнергетики и электротехники,  
Даль ГАУ, Благовещенск

## **ОБОБЩЕННЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

**Аннотация.** Для определения параметра, пригодного для диагностирования состояния изоляции обмоток силового трансформатора исследованы процессы тепломассообмена в витковой изоляции силовых трансформаторов на базе математической модели, учитывающей изменение размеров обмоток под влиянием изменения влагосодержания, температуры и давления.

**Ключевые слова:** силовые маслонаполненные трансформаторы тяговых подстанций, объем, давление, изоляция обмоток, сорбция, десорбция.

## Наука и просвещение: технологии и инновации

Изоляция обмоток силовых трансформаторов согласно [1] может рассматриваться как капиллярно-пористая коллоидная система. Изменение влажности и температуры воздуха приводит к изменению свойств изоляция обмоток. Также изменение свойств изоляции происходит при изменении нагрузки трансформатора. Вследствие указанных воздействий наблюдается изменение интенсивности процессов переноса тепла и влаги в изоляции [2], что отражается на диэлектрических свойствах изоляции обмоток.

Исследованию теории тепловлагопереноса в изоляции электрических машин (силовых маслонаполненных трансформаторов) посвящены труды, Б.А. Алексеева, В.Г. Аракеляна, В.Д. Бардушко, В.П. Вдовико, В.Б. Комарова, А.В. Крюкова, Ю.Н. Львова, М.Ю. Львова, А.Г. Овсянникова, А.Г. Туйгуновой и других ученых [3,4,5,6,7,8,9]. Согласно [10] равновесная влажность изоляционного материала зависит от температуры, влажности окружающего воздуха и от метода достижения равновесия, то есть десорбции (сушки) или сорбции (увлажнения), которым он подвергся.

При осуществлении сушки увлажненной в процессе эксплуатации изоляции обмоток силового трансформатора внутри витковой изоляции возникает градиент давления влажного воздуха, что приводит к дополнительному переносу тепла и влаги [10]. Этот процесс может быть усилен за счет имеющихся в изоляции микротрещин, через которые всасывается воздух.

В трудах А.М. Худоногова, В.П. Смирнова, Ш.К. Исмаилова [11,12] предложена система дифференциальных уравнений, на основании которой производится анализ процессов переноса тепла и влаги в изоляции обмоток тяговых электродвигателей электровозов. Для силовых трансформаторов данный процесс применительно к процессу сушки увлаж-

ненной изоляции обмоток описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 G + K_{12} \nabla^2 \tau + K_{13} \nabla^2 P_m + K_{14} \nabla^2 V; \\ \frac{\partial \tau}{\partial t} = K_{21} \nabla^2 G + K_{22} \nabla^2 \tau + K_{23} \nabla^2 P_m + K_{24} \nabla^2 V; \\ \frac{\partial P_m}{\partial t} = K_{31} \nabla^2 G + K_{32} \nabla^2 \tau + K_{33} \nabla^2 P_m + K_{34} \nabla^2 V; \\ \frac{\partial V}{\partial t} = K_{41} \nabla^2 G + K_{42} \nabla^2 \tau + K_{43} \nabla^2 P_m + K_{44} \nabla^2 V, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\frac{\partial U}{\partial t}$  – локальное изменение переноса влаги в изоляции обмоток трансформатора со временем;  $U$  – влагосодержание в изоляции;  $\tau$  – температура увлажненной изоляции обмоток;  $P_m$  – давление в изоляции;  $V$  – объем обмоток трансформатора;  $\nabla^2$  – оператор Лапласа, зависящий от геометрических размеров тела проводника.

Раскрывая в (1) оператор Лапласа, получим систему уравнений для обмотки трансформатора прямоугольной формы:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = K_{11} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + K_{12} \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} \right) + K_{13} \left( \frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{14} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial \tau}{\partial t} = K_{21} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + K_{22} \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} \right) + K_{23} \left( \frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{24} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial P_m}{\partial t} = K_{31} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + K_{32} \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} \right) + K_{33} \left( \frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{34} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial V}{\partial t} = K_{41} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + K_{42} \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} \right) + K_{43} \left( \frac{\partial^2 P_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} \right) + K_{44} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right). \end{cases} \quad (2)$$

В данной системе уравнений коэффициенты  $K_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3, 4$ ) находятся следующим образом:

## Наука и просвещение: технологии и инновации

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= a_m; K_{12} = a_m \cdot \delta = (a_{m1}^T + a_{m2}^T); K_{13} = k_p / \rho_0; \\
 K_{21} &= \frac{r \cdot \varepsilon}{c} \cdot a_m; K_{22} = a + \frac{r \cdot \varepsilon}{c} \cdot a_m \cdot \delta; K_{23} = \varepsilon \cdot r \cdot \frac{a_m}{c} \cdot \delta; \\
 K_{31} &= \frac{-\varepsilon}{c_p} \cdot a_m; K_{32} = -\frac{\varepsilon \cdot a_m}{c_p} \cdot \delta; K_{33} = (a_p - \frac{\varepsilon \cdot a_m}{c_p} \cdot \delta), \\
 K_{14} &= K_{24} = K_{34} = K_{44} = \frac{T}{(V_{разн}^{кон} - V_{разн}^{нач})},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги;

$a_m^T$  – коэффициент термодиффузии влаги;

$k_p$  – коэффициент фильтрационного переноса влаги, определенный

из уравнения  $j_p = -k_p \cdot \nabla P$ ;

$\delta_p$  – относительный коэффициент фильтрационного потока влаги

$$\delta_p = k_p / a_m \cdot \rho_0;$$

$\rho_0$  – плотность изоляционного материала;

$r$  – удельная теплота испарения влаги;

$\varepsilon$  – критерий фазового превращения;

$a_p$  – коэффициент конвективной фильтрационной диффузии

$$a_p = \frac{k_p}{c_p \cdot \rho_0};$$

$V_{разн}^{кон}$  – отклонение текущего объема от конечного разнообъемного значения;

$V_{разн}^{нач}$  – отклонение текущего объема от начального разнообъемного значения;

$c_p$  – коэффициент емкости влажного воздуха в пористом теле.

Рассмотрим уравнение, отражающее дополнительный перенос влаги в изоляции обмоток

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = K_{11} \cdot \nabla^2 u + K_{12} \cdot \nabla^2 T + K_{13} \cdot \nabla^2 P, \tag{4}$$

## Наука и просвещение: технологии и инновации

где  $\partial u / \partial \tau$  – локальное изменение переноса влаги в изоляции обмоток силового трансформатора со временем;

$u$  – влагосодержание в изоляции обмоток;

$T$  – температура увлажненной изоляции обмоток;

$P$  – давление окружающей среды;

$\nabla^2$  – оператор Лапласа, зависящий от геометрических размеров тела, в нашем случае для прямоугольного проводника,  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ .

В системе уравнений (1) коэффициент  $K_{11} = a_m$  – коэффициент диффузии влаги, т.е.

$$a_m = a_{mkka} + a_{mk}; a_m^T = a_{mkka}^T + a_{mk}^T; \quad (5)$$

Относительный коэффициент термодиффузии, определяется как

$$\delta = \frac{a_m^T}{a_m} = \frac{\delta_{kap} \cdot a_{mkka} + \delta_k \cdot a_{mk}}{a_{mkka} + a_{mk}}. \quad (6)$$

где  $a_{mkka}$ ,  $a_{mk}$ ,  $a_m^T$ ,  $a_{mkka}^T$ ,  $a_{mk}^T$ ,  $\delta_{kap}$ ,  $\delta_k$  – эмпирические коэффициенты

Коэффициенты  $a_m$  и  $\delta$  являются функциями влагосодержания и температуры в увлажненной изоляции обмоток силового трансформатора.

Экспериментальные данные по коэффициенту диффузии ряда материалов описываются эмпирической формулой

$$\frac{a_{mo}}{a_m} = 1 - A \cdot \rho_o \cdot U, \quad (7)$$

где  $a_{mo}$ ,  $A$  – постоянные коэффициенты, определяемые опытными данными.

Коэффициент  $a_{mo}$  зависит от изменения температуры

$$a_{mo} = a_{oo} \cdot B \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^n \quad (8)$$

где  $a_{oo}$ ,  $B$  – постоянные.

Преобразуем уравнение (7)

$$a_m = \frac{a_{mo}}{1 - A \cdot \rho_o \cdot U} \quad (9)$$

Объединив уравнения (8) и (9), получим

$$a_m = \frac{a_{oo} \cdot B \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^n}{1 - A \cdot \rho_o \cdot U} \quad (10)$$

Подставив в формулу уравнения (6) коэффициент  $K_{12} = a_m \cdot \delta$  получим

$$K_{12} = a_m \cdot \frac{a_m^T}{a_m} = a_m^T \quad (11)$$

По формуле (6) коэффициент термодиффузии влаги равен

$$\delta = \frac{a_m^T}{a_m} = \left( \frac{j}{a_m \cdot \rho_o \cdot \nabla t} - \frac{dU}{dt} \right) \quad (12)$$

При гигротермическом равновесии влагообмен отсутствует ( $j=0$ ). В этом случае коэффициент термодиффузии влаги равен термоградиентному коэффициенту  $\delta_p$ .

$$\delta = -\frac{dU}{dt} = \delta_p, \quad (13)$$

Изменения термоградиентного коэффициента  $\delta_p$  определяется величиной изоляционного слоя и характером распределения капиллярной влаги в нем. В процессе сушки увлажненной изоляции обмоток силового трансформатора заземленный воздух расширяется и проталкивает жидкость в более холодные места [13,14].

Аналитический расчет, выполненный по ранее приведенной схеме [1], дает такое значение коэффициента  $\delta_p$

$$\delta_p = \frac{3}{2} \cdot \frac{T_k}{T_o} \cdot \sigma_o^{-1} \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \left( \frac{U_{макс} - U}{1 + U_{макс}} \right) \cdot \frac{1}{1 + U}, \quad (14)$$

где  $T_k$  – критическая температуры воды;

## Наука и просвещение: технологии и инновации

$\sigma_o$  – коэффициент поверхностного натяжения воды при температуре  $T_o$ ;

$U_{\text{макс}}$  – максимальное влагосодержание изоляции, которое достигается длительным выдерживанием материала в воде. добавлена расшифровка

Следовательно, коэффициент  $K_{12}$  определяется

$$K_{12} = a_m \cdot \delta_p = a_m \cdot C_m \cdot \theta_T \quad (15)$$

где  $C_m$  – средняя удельная влагоемкость;

$\theta_T$  – период потенциала влагопереноса при изменении температуры.

Определим коэффициент  $K_{13}$ . Из формулы (3) следует

$$K_{13} = k_p / \rho_0, \quad (16)$$

где  $k_p$  – коэффициент фильтрационного переноса влаги, определяемый по формуле

$$k_p = \left( \frac{j_p}{\nabla \rho} \right) \quad (17)$$

Коэффициент  $k_p$  характеризует молярный перенос влаги под влиянием градиента давления, при сушке нагретым воздухом с температурой  $t_c < 105^\circ\text{C}$ .

Таким образом, решение уравнения (4) с учетом полученных формул для определения коэффициентов  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{13}$ , имеет вид

$$\frac{\partial U}{\partial r} = a_m \cdot \nabla^2 \cdot U + a_m \cdot \delta \cdot \nabla^2 \cdot T + \frac{j_p}{\nabla \rho} \cdot \nabla^2 P, \quad (18)$$

Раскрыв оператор Лапласа для геометрических размеров тела, получим уравнение следующего вида

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(x,y,z)}{\partial \tau} = & a_m \cdot (U''_x + U''_y + U''_z) + \\ & + a_m \cdot \delta \cdot (T''_x + T''_y + T''_z) + \frac{j_p}{\nabla \rho} \cdot (P''_x + P''_y + P''_z) \end{aligned} \quad (19)$$

## Наука и просвещение: технологии и инновации

Рассмотрим второе уравнение из системы уравнений (1)

$$\frac{dt}{d\tau} = K_{21}\nabla^2 U + K_{22}\nabla^2 t + K_{23}\nabla^2 P_m + K_{24}\nabla^2 V. \quad (20)$$

Количество тепла, потраченное на испарение влаги, определяется

$$r \frac{\partial m_6}{\partial \tau} = r \cdot m_0 \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (21)$$

т.к. влагосодержание изоляции  $u = m_b/m_0$ ;

где  $m_b$  – масса влажной изоляции;

$m_0$  – масса абсолютно сухой изоляции

Удельная теплота испарения влаги, равная сумме удельной теплоты испарения жидкости и теплоты процесса смачивания:

$$r = r_{жс} + r_c. \quad (22)$$

Для решения уравнения (21) необходимо определить удельную теплоемкость процесса испарения с помощью критерия Ребиндера, который зависит от температурного коэффициента сушки  $b$ , удельной теплоемкости влажного тела  $c$  и удельной теплоты испарения влаги  $r$ .

Удельная теплоемкость тела является линейной функцией его влагосодержания

$$c = c_0 + c_6 \cdot u \quad (23)$$

Критерий или коэффициент фазового превращения жидкости в пар

$$\varepsilon = \frac{d_i u}{du}. \quad (24)$$

Если  $d_i u = 0$ , то коэффициент  $\varepsilon = 0$ , т.е. изменение влагосодержания, происходит только за счет переноса жидкости; при отсутствии переноса жидкости  $d_i u = 0$ , когда изменение влагосодержания тела в любой его точке происходит только за счет испарения, коэффициент  $\varepsilon = 1$ . Следовательно, в общем случае коэффициент  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ .

Проанализируем третье уравнение системы уравнений (1)

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = K_{31} \cdot \nabla^2 u + K_{32} \cdot \nabla^2 T + K_{33} \cdot \nabla^2 P, \quad (25)$$

где

$$K_{32} = -\frac{\varepsilon \cdot a_m}{c_p} \cdot \delta; K_{33} = \left( a_p - \frac{\varepsilon \cdot a_m}{c_p} \cdot \delta \right).$$

Рассмотрим коэффициенты при переменных:

$c_p$  – коэффициент влажного воздуха в пористом теле, определяемый как

$$c_p = \frac{d_p}{d(u_1 + u_2)}, \quad (26)$$

$a_p$  – коэффициент конвективной фильтрационной диффузии

$$a_p = \frac{k_p}{c_p \cdot \rho_0}, \quad (27)$$

где  $k_p$  – коэффициент фильтрационного переноса влаги, определяемый из уравнения  $j_p = -k_p \cdot \nabla P$ .

В результате можем утверждать, что процесс переноса тепла и влаги в увлажненной изоляции обмоток силового трансформатора в процессе ее сушки описывается системой уравнений в частных производных второго порядка.

От уравнения динамики можно перейти к уравнению кинетики процессов переноса тепла и влаги в витковой изоляции обмоток трансформатора, которое выглядит следующим образом:

$$\pm \frac{\partial V}{\partial t} = K_m (V_{разн}^{кон} - V) \cdot (V - V_{разн}^{нач}), \quad (28)$$

Уравнение (28) описывает процесс переноса тепла и влаги в изоляции обмоток в зависимости от отклонения текущего объема изоляции обмоток трансформатора  $V$  от начального  $V_{разн}^{нач}$  до конечного разнообъемного значения  $V_{разн}^{кон}$ . Под разнообъемностью понимают отношение объ-

емов изоляции обмоток силового трансформатора между сухой ее частью и увлажненной.

В ходе решения уравнения (28) для начальных условий  $t = 0$ ,  $V = V_H$  получаем расчетную формулу для определения коэффициента  $K_m$

$$K_m = \frac{1}{T(V_{разн}^{кон} - V_{разн}^{нач})} \quad (29)$$

где  $T$  – постоянная времени нагрева изоляции силового трансформатора, с.

### ВЫВОД

Представляет практический интерес использование коэффициента  $K_m$  в качестве обобщенного диагностического параметра при прогнозировании состояния витковой изоляции обмоток трансформатора.

Таким образом, математическое моделирование процесса переноса тепла и влаги в изоляции обмоток позволило выявить обобщенный диагностический параметр при прогнозировании состояния витковой изоляции обмоток трансформатора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков, А.В. Тепло - и массоперенос [Текст] / А.В. Лыков, О.Г. Мартыненко, Б.А. Коловандин, В.Е. Аеров. – Минск: Энергия, 1963. – 535 с.
2. Гамаюнов, И.С. Влияние эксплуатационных факторов на надежность ТЭД электро-возов подталкивающего движения / И.С. Гамаюнов, Д.А. Оленцевич, Д.Ю. Алексеев, В.Н. Иванов, Ш.К. Исмаилов, А.М. Худоногов, В.П. Смирнов // Труды III международной научно-технической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт». Ч. 1, 5 (8 июня 2007 г.) / под ред. В.П. Горелова, С.В. Журавлева, В.А. Глушец. – Омск: Изд-во Иртышский филиал ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта». – 2007. – С. 71-73.
3. Львов М.Ю. Методологические аспекты развития системы диагностики силовых трансформаторов при переходе к ремонту по техническому состоянию / М.Ю. Львов // Новое в российской электроэнергетике. – 2003. – № 9. – С. 27-32.

## Наука и просвещение: технологии и инновации

4. Алексеев, Б.А. Продление срока службы изоляции силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев // *Электро*. – 2004. – №3. – С. 25-29.
5. Бардушко, В.Д. О принципах формирования системы мониторинга режимов работы и технического состояния трансформаторов тяговых подстанций / В.Д. Бардушко, М.В. Сузгаев // *Транспортные проблемы сибирского региона*. – Иркутск, 2003. – Ч. 1. – С. 122 – 124.
6. Бардушко, В.Д. Особенности моделирование износа изоляции тягового трансформатора / В.Д. Бардушко, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, М.В. Сузгаев // *Контроль. Диагностика*. – № 8. – 2008. – С. 23 – 28.
7. Аракелян, В.Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования / В.Г. Аракелян // *Электротехника*. – 2002. – № 5. – С. 23-27.
8. Туйгунова, А.Г. Совершенствование содержания изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий: автореферат диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Красноярск: СФУ, 2011. – 22 с.
9. Худоногов, И.А., Туйгунова, А.Г. Математическая модель теплообмена изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий // *Материалы шестого Международного симпозиума Элтранс-2011 25-28 октября 2011 г. Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте*. – С. 473–476.
10. Лыков, А.В. Теория тепло и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М. Госэнергоиздат, 1963. – 563 с.
11. Худоногов, А.М. Инновационные технологии повышения надежности электрических машин] / А.М. Худоногов, Е.М. Лыткина, Е.Ю. Дульский, А.А. Васильев, Д.Ю. Алексеев, В.И. Исаченко // *Журнал «Локомотив»*. – №10. – 2012. – С. 27-28.
12. Смирнов, В.П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза [Текст]: монография. / В.П. Смирнов. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2003. – 328 с.
13. Дудкин, А.Н. Обеспечение качества и надежности электрических машин / А.Н. Дудкин, А.П. Матялис, О.П. Муравлев // *Известия ТПУ*. – Т. 303. - Вып.1. – 2000. – С. 266-269.

## **Наука и просвещение: технологии и инновации**

*14. Косяков А.А. Диагностика и контроль состояния изоляции устройств электро-снабжения железных дорог 6-10 кВ дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Екатеринбург, 2006. – 149 с.*