

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Рассальский А.Н., к.т.н., доцент
Запорожский национальный технический университет
Украина, 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, кафедра «Электрические аппараты»
Тел. (0612) 69-83-49

Солодуненко Д.В., зам. начальника цеха
ОАО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры»
Украина, 69000, г. Запорожье, ул. Днепропетровское шоссе, 13, ОАО «ЗЗВА», ЦТО
Тел. (0612) 59-33-10, E-mail: asche@email.zp.ua

В статті розглянута зрощена модель аналітичного описання процесу сушки ізоляції трансформаторів струму, що дозволяє оцінити вологість ізоляцій у будь-який момент часу з використанням нескладного математичного алгоритму.

В статті рассмотрена упрощенная модель аналитического описания процесса сушки изоляции трансформаторов тока, которая позволяет оценить влагосодержание изоляции в любой момент времени с использованием простого математического алгоритма.

Влага в целлюлозных изоляционных материалах при положительной температуре может находиться в двух состояниях – жидком и газообразном, а явления внутреннего массопереноса в процессе обезвоживания могут иметь самый различный характер в зависимости от таких параметров состояния материала, как температура и влагосодержание.

В общем случае механизм переноса влаги определяется следующими явлениями [1]:

- капиллярным переносом влаги;
- ламинарным движением парогазовой смеси;
- диффузией пар – воздух;
- кнудсеновским молекулярным движением.

В общем случае аналитическая модель тепломассопереноса в процессе сушки описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных [2-4]. Однако такая система уравнений практически непригодна для описания процессов сушки реальных конструкций по следующим причинам:

1. система трудноразрешима даже в случае простых геометрических тел;
2. процесс сушки реальных конструкций может быть принят как квазистационарный, в таком случае температура и давление внутри изоляции зависят от технологических параметров режима, и нет необходимости в их определении;
3. для практических целей необходимо знать только распределение влагосодержания в изоляции в любой момент времени.

Для решения практических задач сушки реальных систем изоляции трансформаторов тока необходимо применение упрощенных моделей, которые могут быть легко разрешимы и приводят непосредственно к определению влагосодержания изоляции в любой момент времени.

Согласно [5], в фазе прогрева изоляции при обдуве горячим воздухом определяющее значение будет иметь диффузионный перенос влаги, что приводит к дифференциальному уравнению вида:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где W – влагосодержание изоляции; D_1 – коэффициент диффузии влаги под действием разности влагосодержаний.

В процессе вакуумной сушки определяющим фактором переноса влаги будет перепад давления водяного пара в изоляции и остаточного давления в рабочей камере. Поскольку средний размер пор в конденсаторной изоляции $< 10^{-6}$ м, то процесс паропереноса в общем случае может быть описан следующим уравнением:

$$G = S \frac{b}{\varepsilon} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (2)$$

где G – поток водяного пара, проходящего в 1с через поверхность переноса S ; dP/dx – перепад давления в материале; ε - коэффициент сопротивления, зависящий от структуры пор в материале; b – коэффициент, характеризующий вид переноса.

В том случае, когда определяющим видом переноса является ламинарное течение пара, что характерно при давлении 300–600 мм рт. ст., коэффициент b определяется следующим уравнением:

$$b = \frac{d^2 \gamma}{32 g \eta}, \quad (3)$$

где d – эквивалентный диаметр пор; γ - удельный вес пара; η - вязкость пара.

При эффузионном переносе коэффициент b определяется по формуле:

$$b = \frac{4}{3} d \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}}, \quad (4)$$

Применительно к процессу глубоковакуумной сушки уравнение (2) может быть представлено в виде:

$$\rho \frac{dW}{d\tau} = \frac{b}{\varepsilon} \cdot \frac{d^2 P}{dx^2}, \quad (5)$$

где ρ - плотность изоляции.

Учитывая, что между влагосодержанием и давлением пара в изоляции во время сушки существует практически линейная зависимость, которая может быть выражена уравнением вида:

$$W = m \frac{P}{P_n} + a, \quad (6)$$

где m, a – коэффициенты; P_n – давление насыщенных паров, уравнение (5) может быть преобразовано к виду:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = D_2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где D – эффективный коэффициент диффузии, равный:

$$D = \frac{\varepsilon P_n}{\varepsilon \rho m}, \quad (8)$$

Начальным условием этого уравнения является равномерность распределения влаги по толщине изоляции, т.е. $\tau=0 \quad W(x)=W_0$.

Граничные условия этого уравнения определяют интенсивность переноса влаги во внешнюю среду и выражаются уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dx}(x=0) &= K1(W - W_p) \\ \frac{dW}{dx}(x=L) &= K2(W - W_p) \end{aligned} \quad (9)$$

где L – толщина изоляции; $K1$ и $K2$ – коэффициент переноса влаги во внешнюю среду с внутренней и наружной стороны обмотки; W_p – равновесное влагосодержание окружающей среды.

Для решения полученного уравнения воспользуемся методом конечных разностей, для чего покроем область решения сеткой, образованной прямыми

$$X = ih, \quad i=1..n; \quad \tau = kl, \quad k = 1..m.$$

Введем обозначение $W(ih, kl) = W_{i,k}$. Тогда уравнение (7) можно преобразовать к виду:

$$\frac{W_{i,k+1} - W_{i,k}}{l} = D \frac{W_{i+1,k} - W_{i,k} + W_{i-1,k} - W_{i,k}}{h^2}, \quad (10)$$

Т.к. задано начальное условие для прямой $t = 0$, то можно определить значения W во внутренних точках области решения по следующей формуле:

$$W_{i,k+1} = \left(1 - \frac{2Dl}{h^2}\right) W_{i,k} + \frac{Dl}{h^2} (W_{i+1,k} + W_{i-1,k}), \quad (11)$$

Предложенная модель позволяет гораздо проще и быстрее оценить влагосодержание изоляции трансформаторов тока в любой момент процесса сушки и может быть решена с применением простых вычислительных способов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Großekathoffer H.D. Der Trocknungsprozeß von Papierisolation und der Einfluß der Restfeuchte auf die elektrischen Eigenschaften des impragnierten Dielektrikums. Diss. Dokt. Ind. Fak. Maschinen. Techn. Univ. Hannover, 1973.
- [2] Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. – М., «Лесная промышленность», 1973г..
- [3] Михайлов Ю.А. Сушка перегретым паром. – М., «Энергия», 1967г.
- [4] Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М., «Госэнергоиздат», 1963г.
- [5] Куц П.С., Пикус И.Ф., Кононенко В.Д. Аналитическое исследование тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых телах в условиях вакуума. Теплообмен, т. V. – Мн., ИТМО АН БССР, 1976г.

Поступила 23.01.03