

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-301–312

УДК 681.518

Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора

Д. И. Зализный¹⁾, О. Г. Широков¹⁾, Г. О. Широков¹⁾, А. А. Капанский¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Существующие системы защиты и диагностики не способны выявлять аномальный нагрев силовых конденсаторов, обусловленный развитием их внутренних неисправностей. Предлагается методика, позволяющая на ранней стадии обнаружить такой нагрев. Данная методика состоит из алгоритмов, аппаратной части в виде микропроцессорного прибора и основана на непрерывном измерении температуры поверхности корпуса конденсатора, температуры внешней окружающей среды, напряжений и токов со стороны источника питания. На основе измеренных величин выполнен расчет потерь активной мощности в конденсаторе и температуры наиболее нагретой точки его диэлектрика. После этого осуществлен анализ среднесуточных значений расчетной температуры и при обнаружении тенденции непрерывного роста этих значений сформированы диагностические сигналы уровней опасности аномального нагрева: низкий, средний, высокий и очень высокий. Приведенные алгоритмы разработаны эвристически. Окончательное их формирование возможно только после многолетней эксплуатации предлагаемой системы диагностирования на реальных объектах. Внедрение разработанной системы снизит вероятность внезапного отказа конденсаторных установок и соответственно повысит надежность системы электроснабжения предприятия.

Ключевые слова: силовой конденсатор, диагностика, аномальный нагрев, система диагностирования

Для цитирования: Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора / Д. И. Зализный [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 4. С. 301–312

Adaptive Mathematical Model of Thermal Processes in a Cosine Power Capacitor

D. I. Zalizny¹⁾, O. G. Shirokov¹⁾, G. O. Shirokov¹⁾, A. A. Kapanskiy¹⁾

¹⁾P. O. Sukhoi Gomel State Technical University (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The existing protection and diagnostics systems are unable to detect the power capacitor abnormal heating caused by the development of its malfunctions. A diagnosis technique is presented that provides discovering such a heating at its early manifestation. The technique

Адрес для переписки

Зализный Дмитрий Иванович
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48, корп. 2,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-57-64
kaf_power@gstu.by

Address for correspondence

Zalizny Dmitry I.
P. O. Sukhoi Gomel State Technical University
48/2 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-57-64
kaf_power@gstu.by

includes algorithms and an apparatus component in a form of a digital device, and it is based on continuous measuring of a capacitor body surface temperature, ambient temperature, voltages and currents from the power source. On the basis of measured values the active power losses in the capacitor and the temperature of the hottest point of its dielectric were calculated. Thereafter, the calculated average daily values of the temperature was analyzed, and, should the tendency of permanent increase of these values is detected, the diagnosis alarms of danger levels of abnormal heating are formed, viz. a low level, an average level, a high level and a very high level. The presented algorithms have been developed heuristically. Their final formation is possible only after years of operation of the proposed diagnosis system applied to the real objects. Because of application of the diagnosis system the probability of capacitor units' failure will be lower and thus the dependability of the power supply may be higher. The implementation of the developed system will reduce the probability of sudden failure of capacitor units, and, correspondingly, will increase the reliability of the electricity supply system of an enterprise.

Keywords: power capacitor, diagnostics, abnormal heating, diagnostic system

For citation: Zalizny D. I., Shirokov O. G., Shirokov G. O., A. A. Kapanskiy (2016) Adaptive Mathematical Model of Thermal Processes in a Cosine Power Capacitor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 301–312 (in Russian)

Введение

В электроэнергетике силовые конденсаторы имеют различные области применения. Так называемые косинусные конденсаторы предназначены для компенсации реактивной мощности в электрических сетях. В качестве диэлектрика в них применяют конденсаторную бумагу или полипропиленовые пленки, а также различные пропитывающие жидкости.

Косинусные конденсаторы состоят из плоскопрессованных секций, соединенных последовательно или параллельно и обеспечивающих суммарную емкость в десятки и сотни микрофард. Учитывая, что их рабочее напряжение составляет 220 В и более, а рабочие токи более 10 А, в них имеются потери активной мощности, достаточные для того, чтобы температура наиболее нагретой точки диэлектрика приблизилась к максимально допустимому значению. Если же из-за процессов старения и увлажнения диэлектрика возрастет тангенс угла диэлектрических потерь или увеличатся сопротивления контактов между секциями, значения этой температуры будут еще выше. Кроме того, дополнительный нагрев конденсатора может быть обусловлен наличием высших гармонических составляющих в протекающих через него токах. Все эти факторы свидетельствуют о том, что непрерывный контроль тепловых процессов косинусного силового конденсатора – важная и актуальная задача.

В подавляющем большинстве косинусных конденсаторов отсутствуют конструктивные элементы для установки датчиков температуры, поэтому получить значения температуры наиболее нагретой точки их диэлектрика можно только расчетным путем. Тепловой расчет силовых конденсаторов – это стандартный этап при их проектировании. Так, в [1, с. 204–233] подробно рассматривается двумерная математическая модель стационарных тепловых процессов, для которой должны быть известны все геометрические параметры внутренних элементов конденсатора. Очевидно, что данная модель не может быть использована в реальных условиях эксплуата-

ции, когда тепловые процессы в конденсаторе являются нестационарными. Такие же соображения справедливы и по отношению к стационарным моделям, основанным на методе конечных элементов [2].

В литературе рассматриваются математические модели нестационарных тепловых процессов в электролитических конденсаторах, применяющихся в силовой электронике [3], а также в электрохимических конденсаторах [4–7]. Нестационарные модели косинусных силовых конденсаторов в публикациях практически отсутствуют или описаны очень кратко. Так, в упрощенной модели, приведенной в [1, с. 234], явно отсутствует температура окружающей среды, что не позволяет применить эту модель для расчетов в реальном времени.

В данной статье предлагается математическая модель, позволяющая рассчитывать тепловые процессы в косинусном силовом конденсаторе (далее – конденсаторе) в режиме реального времени и не требующая подробных сведений о его внутренней конструкции. Модель основана на методе малого количества тепловых однородных тел, тепловых схемах замещения [8, 9] и обладает адаптивными свойствами.

Исходная математическая модель

В большинстве конденсаторов внутренние секции плотно упакованы и состоят из равномерно распределенных диэлектрика и алюминиевой фольги [1], поэтому рассмотрим их как единое тепловое однородное тело. Поскольку существуют две основные конструкции конденсаторов [1] – цилиндр и параллелепипед, – примем их как базовые с соответствующими обозначениями размеров, как изображено на рис. 1.

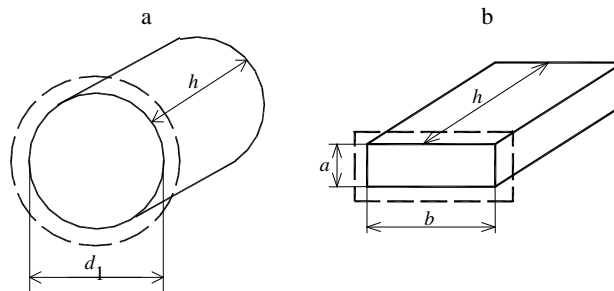


Рис. 1. Представление конденсаторов как тепловых однородных тел:
а – цилиндрической формы; б – в форме параллелепипеда

Fig. 1. Representation of thermal capacitors as homogeneous bodies:
a – of cylindrical shape; b – in the form of a parallelepiped

Пунктиром на рис. 1 изображена внутренняя окружающая среда, т. е. слой окружающей среды, температура которой зависит от температуры поверхности конденсатора. Для обоих вариантов конденсаторов структурная схема тепловых процессов будет одинаковой, как показано на рис. 2.

Примем первоначальное допущение, что значения тепловых сопротивлений не зависят от температуры. Тогда систему уравнений, соответствующую схеме на рис. 2, можно записать следующим образом [8, 9]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = \Delta P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = \Delta P_2, \end{cases} \quad (1)$$

где θ_1 – температура наиболее нагретой точки диэлектрика конденсатора в соответствии с уровнем установки датчика температуры поверхности корпуса; θ_2 – температура поверхности корпуса конденсатора; R_1 , C_1 , ΔP_1 – соответственно тепловое сопротивление, теплоемкость и потери активной мощности конденсатора; R_2 , C_2 – тепловое сопротивление и теплоемкость внутренней окружающей среды; ΔP_2 – эквивалентные потери активной мощности во внутренней окружающей среде.



Рис. 2. Структурная схема тепловых процессов конденсатора

Fig. 2. Structural scheme of thermal processes in the capacitor

Теплоемкостью C_2 будем пренебрегать в силу малой плотности воздуха. Параметр ΔP_2 необходим для работы адаптивного алгоритма, что будет показано ниже.

Тепловая схема замещения, составленная в соответствии с (1), приведена на рис. 3.

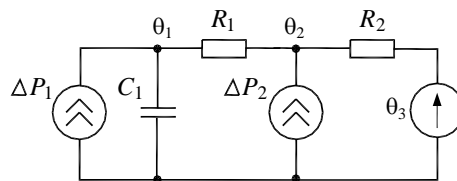


Рис. 3. Тепловая схема замещения конденсатора

Fig. 3. Thermal equivalent circuit of the capacitor

На основе тепловой схемы замещения получим выражения для расчетных температур в операторной форме:

$$\begin{cases} \theta_1(p) = \frac{(R_1 + R_2)\Delta P_1(p) + R_2\Delta P_2(p) + \theta_3(p)}{1 + p(R_1 + R_2)C_1}; \\ \theta_2(p) = \frac{R_2\Delta P_1(p) + (1 + pR_1C_1)R_2\Delta P_2(p) + (1 + pR_1C_1)\theta_3(p)}{1 + p(R_1 + R_2)C_1}. \end{cases} \quad (2)$$

Расчет тепловых параметров

Для конденсаторов цилиндрической формы тепловое сопротивление R_1 найдем по аналогии с тепловыми сопротивлениями силовых кабелей [9], считая, что тепловой поток идет только через боковую поверхность [1, с. 221]:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi\gamma_1 h}, \quad (3)$$

где γ_1 – удельная теплопроводность диэлектрика конденсатора; h – высота конденсатора.

Так как тепловое сопротивление алюминия намного меньше теплового сопротивления диэлектрика и электроды конденсатора выполняются в виде тонкой фольги, их тепловым сопротивлением будем пренебрегать. Для конденсатора в форме параллелепипеда тепловое сопротивление представим как параллельное соединение четырех тепловых сопротивлений в соответствии с четырьмя направлениями теплового потока от центра конденсатора к поверхности его корпуса, как показано на рис. 4.

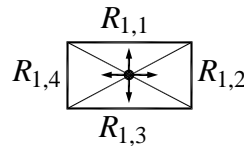


Рис. 4. Направления тепловых потоков в конденсаторе

Fig. 4. The direction of heat flow in the capacitor

Учитывая обозначения на рис. 4, для составляющих теплового сопротивления конденсатора можно записать:

$$R_{1,1} = R_{1,3} = \frac{a}{2\gamma_1 b h}; \quad (4)$$

$$R_{1,2} = R_{1,4} = \frac{b}{2\gamma_1 a h}. \quad (5)$$

В соответствии с (4) и (5) общее тепловое сопротивление

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_{1,1}} + \frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_{1,3}} + \frac{1}{R_{1,4}}} = \frac{ab}{4\gamma_1 h(a^2 + b^2)}. \quad (6)$$

Теплоемкость C_1 определим как сумму произведений удельной теплоемкости диэлектрика c_d на массу диэлектрика G_d , удельной теплоемкости металла электродов c_m на массу металла G_m и удельной теплоемкости материала корпуса c_k на массу корпуса G_k . В результате для цилиндрического конденсатора получим:

$$C_1 = c_d G_d + c_m G_m + c_k G_k = (1 - \delta V_m) c_d \beta_d \frac{\pi (d_1 - w_k)^2}{4} h + \\ + \delta V_m c_m \beta_m \frac{\pi (d_1 - w_k)^2}{4} h + c_k \beta_k \cdot \left(\frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{\pi (d_1 - w_k)^2}{4} \right) h, \quad (7)$$

где δV_m – доля металла электродов в объеме конденсатора; β_d – плотность диэлектрика; β_m – то же металла электродов; β_k – то же материала корпуса; w_k – толщина корпуса.

Для конденсатора в форме параллелепипеда

$$C_1 = c_d G_d + c_m G_m + c_k G_k = (1 - \delta V_m) c_d \beta_d (a - w_k)(b - w_k) h + \\ + \delta V_m c_m \beta_m (a - w_k)(b - w_k) h + c_k \beta_k (abh - (a - w_k)(b - w_k) h). \quad (8)$$

Тепловое сопротивление R_2 определим по стандартной формуле

$$R_2 = \frac{1}{\alpha F}, \quad (9)$$

где α – суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности конденсатора; F – площадь поверхности теплоотдачи.

Для цилиндрического конденсатора

$$R_2 = \frac{1}{\alpha \pi d_1 h}. \quad (10)$$

Для параллелепипеда

$$R_2 = \frac{1}{\alpha 2h(a + b)}. \quad (11)$$

В качестве расчетного выберем трехфазный силовой конденсатор марки TGL-200-8264 с номинальным напряжением 380 В и суммарной емкостью 220 мкФ (три конденсатора емкостью 73,4 мкФ, соединенные в треугольник), предназначенный для компенсации реактивной мощности в электрических сетях. Рассматриваемый конденсатор имеет форму параллелепипеда. Его геометрические параметры: $a = 95$ мм; $b = 190$ мм; $h = 350$ мм. Корпус конденсатора стальной с толщиной стенок $w_k = 2$ мм. Примем в качестве материала диэлектрика конденсаторную бумагу, пропитанную хлордифенилом, а в качестве материала электродов – алюминий, как наиболее вероятные материалы для такого типа конденсаторов. Приблизительные геометрические размеры активной части: $a_1 = 80$ мм; $b_1 = 150$ мм; $h_1 = 270$ мм.

Предположим, что различие реальных и расчетных параметров конденсатора будет скомпенсировано адаптивным алгоритмом при расчете тепловых процессов. Тепловое сопротивление R_1 найдем по формуле (6), используя значение удельной теплопроводности бумаги $\gamma_1 = 0,17$ Вт/(м·°С). Тепловое сопротивление R_2 определим по (11), используя приближенное значение коэффициента теплоотдачи с поверхности корпуса $\alpha = 10$ Вт/(м·°С), приведенное в [1, с. 215]. Теплоемкость C_1 рассчитаем по формуле (8), используя значение удельного объема металла электродов $\delta V_M = 0,4$ в соответствии с [10, с. 91]. В результате получаем следующие значения: $R_1 = 1,01$ °С/Вт; $R_2 = 0,46$ °С/Вт; $C_1 = 8395$ Вт·с/°С.

Расчет потерь

Потери активной мощности в конденсаторе определим как сумму двух слагаемых [1, с. 190]

$$\Delta P_1 = \Delta P_d + \Delta P_m, \quad (12)$$

где ΔP_d – потери активной мощности в диэлектрике; ΔP_m – то же в металле электродов.

Потери ΔP_d найдем по известной формуле

$$\Delta P_d = 2\pi f C_{эл} \operatorname{tg} \delta \sum_{i=1}^3 U_i^2, \quad (13)$$

где f – частота напряжения; $C_{эл}$ – электрическая емкость конденсатора; U_i – действующее значение приложенного напряжения i -й фазы; δ – угол диэлектрических потерь.

Значение ΔP_m для конденсаторов напряжением до 1 кВ в [1, с. 191] рекомендуется выбирать из условия

$$\Delta P_m \approx 0,14 \Delta P_d. \quad (14)$$

Выразив ΔP_1 из (14) и подставив его в (12), получим расчетное выражение для ΔP_m

$$\Delta P_m = \frac{0,14}{0,86} \Delta P_d. \quad (15)$$

Алгоритм адаптации математической модели

Для рассматриваемого конденсатора при номинальном напряжении и $\operatorname{tg} \delta = 0,26 \cdot 10^{-3}$ (бумага, пропитанная хлордифенилом) потери составят: $\Delta P_d = 26$ Вт; $\Delta P_m = 4,2$ Вт, т. е. $\Delta P_1 = 30,2$ Вт.

В соответствии с рис. 3 и системой (2) исходный алгоритм для расчета значений температур в рассматриваемой системе первого порядка для единичного конденсатора при нулевых начальных условиях запишется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{S}_{1,k,j} = h_{1,k} \Delta P_{1,j} + (\mathfrak{S}_{1,k,j-1} - h_{1,k} \Delta P_{1,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \\ \mathfrak{S}_{2,k,j} = h_{2,k} \Delta P_{2,j} + (\mathfrak{S}_{2,k,j-1} - h_{2,k} \Delta P_{2,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \\ \mathfrak{S}_{3,k,j} = h_{3,k} \theta_{3,j} + (\mathfrak{S}_{3,k,j-1} - h_{3,k} \theta_{3,j}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \\ \theta_{1,j} = \mathfrak{S}_{1,1,j} + \mathfrak{S}_{2,1,j} + \mathfrak{S}_{3,1,j}; \\ \theta_{2,j} = \mathfrak{S}_{1,2,j} + \mathfrak{S}_{2,2,j} + \frac{R_1 R_2 \Delta P_{2,j}}{R_1 + R_2} + \mathfrak{S}_{3,2,j} + \frac{R_1 \theta_{3,j}}{R_1 + R_2}, \end{array} \right. \quad (16)$$

где k – номер температуры (1 – диэлектрик, 2 – поверхность корпуса); j – номер расчетного интервала; τ – тепловая постоянная времени; $h_{1,k}$, $h_{2,k}$, $h_{3,k}$ – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа; $\mathfrak{S}_{1,k,j}$, $\mathfrak{S}_{2,k,j}$, $\mathfrak{S}_{3,k,j}$ – соответственно составляющие k -й температуры от потерь в $\Delta P_{1,j}$ и $\Delta P_{2,j}$ и от температуры внешней охлаждающей среды $\theta_{3,j}$; Δt – период дискретизации.

Рассмотрим второе уравнение системы (16) для температуры θ_2 ($k = 2$). Сгруппируем параметры этого уравнения при ΔP_2

$$\mathfrak{S}_{2,2,j} = h_{2,2} \Delta P_{2,j} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) + \mathfrak{S}_{2,2,j-1} e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}. \quad (17)$$

Подставим (17) в четвертое уравнение системы (16) для температуры θ_2 и, считая значения температуры θ_2 непосредственно измеряемыми, выразим ΔP_2

$$\Delta P_{2,j} = \frac{\Theta_{2,j} - \mathfrak{S}_{2,2,j-1} e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} - \frac{R_1 \Theta_{3,j}}{R_1 + R_2} - \mathfrak{S}_{1,2,j} - \mathfrak{S}_{3,2,j}}{h_{2,2} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}, \quad (18)$$

где $\Theta_{2,j}$, $\Theta_{3,j}$ – непосредственно измеренные с помощью датчиков значения температуры поверхности корпуса конденсатора и внешней окружающей среды на j -м интервале.

Выражение (18) представляет собой алгоритм расчета адаптирующего параметра при наличии измеренных значений температуры поверхности корпуса конденсатора, температуры воздуха и напряжения, приложенного к конденсатору. Полученные на каждом шаге расчета значения параметра ΔP_2

необходимо учитывать при расчете температуры θ_1 в соответствии с системой (16). Температура $\theta_{2,j}$, рассчитываемая по (16), должна полностью совпадать с измеряемой температурой $\Theta_{2,j}$, так как определяется путем обратного пересчета. Если совпадение отсутствует, то алгоритм работает неверно.

Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности математической модели авторами в лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования тепловых процессов в конденсаторе TGL-200-8264. Фотография собранной установки показана на рис. 5.

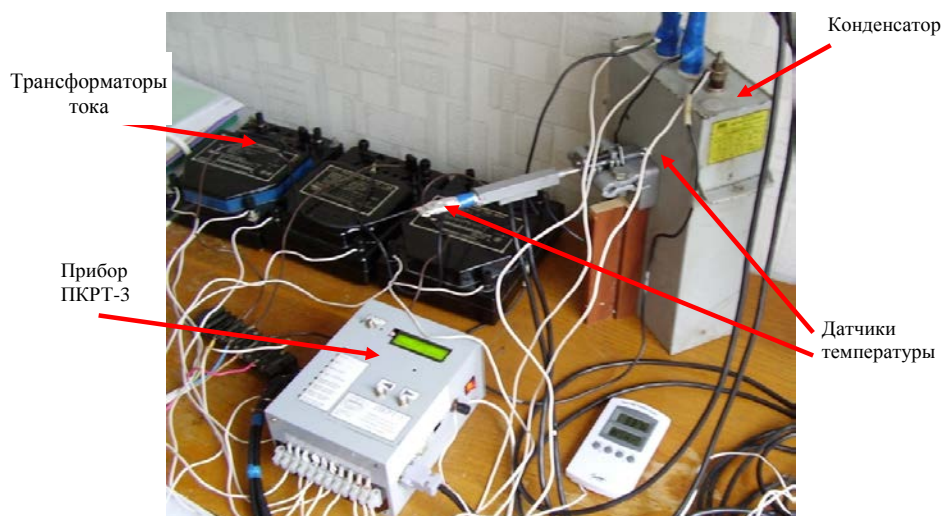


Рис. 5. Внешний вид установки для экспериментальных исследований

Fig. 5. Appearance of the unit for experimental studies

В качестве средства измерений использован прибор ПКРТ-3 (прибор контроля и расчета температур электроэнергетического оборудования), разработанный авторами в рамках задания № 1.1.22 ГПНИ в 2014–2015 гг. Установка работает следующим образом. Напряжения из трехфазной сети через автоматический выключатель и лабораторные измерительные трансформаторы тока типа И54М подаются на конденсатор. Коэффициенты трансформации этих трансформаторов выбраны равными 50/5. Цепи напряжения прибора ПКРТ-3 подключены к сети непосредственно, а цепи тока – через измерительные трансформаторы.

Для измерения температур использовались два чувствительных элемента. Первый устанавливали на верхнюю часть корпуса конденсатора, а второй – на расстоянии 25 см от корпуса на той же высоте, что и первый. Поместить датчик температуры в диэлектрик конденсатора возможности не было из-за токсичности хлордифенила и предполагаемого избыточного давления внутри корпуса. В процессе измерений необходимые величины автоматически записывались в flash-память прибора ПКРТ-3, а затем были считаны в компьютер.

Графики измеренной и расчетной температур поверхности корпуса конденсатора приведены на рис. 6. При этом расчетная температура получена по математической модели без применения алгоритма адаптации (18), так как в противном случае измерение и расчет полностью совпали бы.

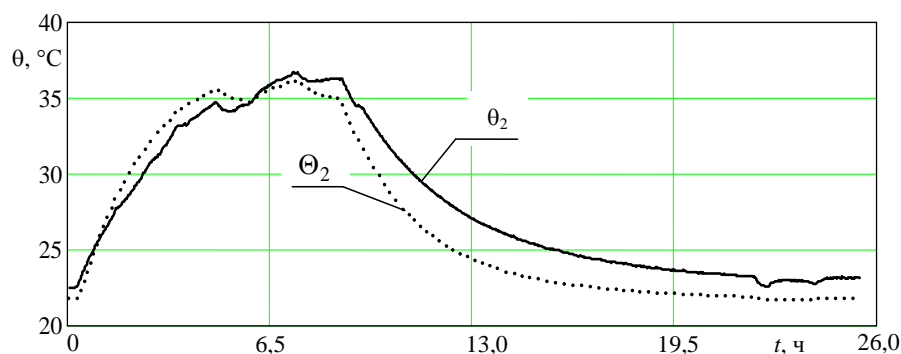


Рис. 6. Графики температур конденсатора: Θ_2 – измеренная температура корпуса; θ_2 – расчетная температура корпуса без применения алгоритма адаптации

Fig. 6. Graphs of temperature of the capacitor: Θ_2 – the measured case temperature; θ_2 – design temperature of the hull without the use of adaptation algorithm

Из рисунка 5 видно, что предлагаемая математическая модель достаточно близка по параметрам к реальным тепловым процессам в конденсаторе. Максимальная абсолютная погрешность расчета составляет ± 3 °C, а коэффициент корреляции равен 0,974.

В рамках поставленного эксперимента проверить работу алгоритма адаптации (18) возможно только путем сравнения значений расчетной температуры диэлектрика, полученных без применения этого алгоритма, и значений с его применением. Соответствующие графики показаны на рис. 7.

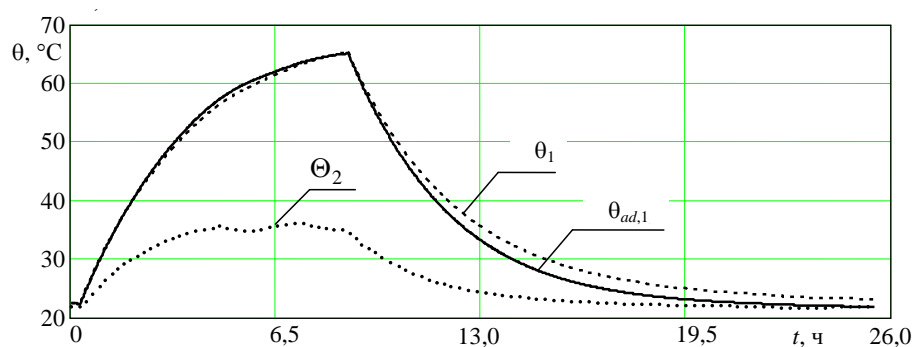


Рис. 7. Графики температур конденсатора: Θ_2 – измеренная температура корпуса; $\theta_1, \theta_{ad,1}$ – расчетная температура диэлектрика без применения и с применением алгоритма адаптации

Fig. 7. Graphs of temperature of the capacitor: Θ_2 – the measured temperature of the enclosure; $\theta_1, \theta_{ad,1}$ – the calculated temperature of the dielectric material without and with application of algorithm of adaptation

Коэффициент корреляции между температурами Θ_2 и θ_1 равен 0,966, а между Θ_2 и $\theta_{ad,1}$ он составляет 0,977. Поскольку очевидно, что между температурой корпуса и температурой диэлектрика должна быть статистическая взаимосвязь, эти значения свидетельствуют о приближении параметров модели к реальным тепловым параметрам конденсатора с помощью алгоритма адаптации.

ВЫВОД

Предложенная математическая модель может быть использована в качестве базовой при расчете тепловых процессов косинусных силовых конденсаторов в режиме реального времени, поскольку ее адекватность подтверждена экспериментальными исследованиями. Далее на ее основе необходимо разработать математическую модель тепловых процессов групп конденсаторов в установках компенсации реактивной мощности и соответствующие аппаратно-программные средства, позволяющие выявлять аномальный нагрев конденсаторов, обусловленный их неисправностями. Применение таких средств повысит эксплуатационную надежность конденсаторных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучинский, Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
2. Thermal Simulation for Geometric Optimization of Metallized Polypropylene Film Capacitors / M. El-Husseini [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2002. Vol. 38, № 3. P. 713–718.
3. Parler, S. G. Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal Modeling / S. G. Parler, L. L. Macomber // Powersystems World International Conference (PCIM), November 1999.
4. Development of an Equivalent Circuit Model for Electrochemical Double Layer Capacitors with Distinct Electrolytes / J. Kang [et al.] // Electrochimica Acta. 2014. Vol. 115, No 1. P. 587–598.
5. Electrochemical Double Layer Capacitor Electro-Thermal Modeling / W. Sarwar [et al.] // Journal of Energy Storage. 2016. Vol. 5, No 1. P. 10–24.
6. Guillemet, Ph. Multi-Level Reduced-Order Thermal Modeling of Electrochemical Capacitors / Ph. Guillemet, Y. Scudeller, Th. Brousse // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 157, No 1. P. 630–640.
7. D'Entremont, A. First-Principles Thermal Modeling of Electric Double Layer Capacitors under Constant-Current Cycling / A. D'Entremont, L. Pilon // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 246. P. 887–898.
8. Широков, О. Г. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Наукоемкие технологии. 2008. № 2. С. 63–67.
9. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 5. С. 25–34.
10. Гулевич, А. И. Производство силовых конденсаторов: учеб. пособие для подготовки рабочих на производстве / А. И. Гулевич, А. П. Киреев. М.: Высш. шк., 1981. 284 с.

REFERENCES

1. Kuchinsky G. S., Nazarov N. I. (1992) *Electric Power Capacitors*. Moscow, Energoatomizdat. 320 (in Russian).
2. El-Husseini M., Venet P., Rojat G., Joubert C. (2002) Thermal Simulation for Geometric Optimization of Metallized Polypropylene Film Capacitors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38 (3), 713–718. DOI: 10.1109/TIA.2002.1003421.
3. Parler S. G., Macomber L. L. (1999) Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal Modeling. *Powersystems World International Conference (PCIM)*, November 1999.
4. Development of an Equivalent Circuit Model for Electrochemical Double Layer Capacitors with Distinct Electrolytes / J. Kang [et al.] // *Electrochimica Acta*. 2014. Vol. 115, No 1. P. 587–598.
4. Kang J., Wen J., Jayaram S. H., Yu A., Wang X. (2014) Development of an Equivalent Circuit Model for Electrochemical Double Layer Capacitors with Distinct Electrolytes. *Electrochimica Acta*. 115 (1), 587–598. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.11.002.
5. Sarwar W., Marinescu M., Green N., Taylor N., Offer G. (2016) Electrochemical Double Layer Capacitor Electro-Thermal Modeling. *Journal of Energy Storage*, 5 (1), 10–24. DOI: 10.1016/j.est.2015.11.001.
6. Guillemet Ph., Scudeller Y., Brousse Th. (2006) Multi-Level Reduced-Order Thermal Modeling of Electrochemical Capacitors. *Journal of Power Sources*, 157 (1), 630–640. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.07.072.
7. D'Entremont A., Pilon L. (2014) First-Principles Thermal Modeling of Electric Double Layer Capacitors under Constant-Current Cycling. *Journal of Power Sources*, 246, 887–898. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.024.
8. Shirokov O. G., Zalizny D. I. (2008) Thermal Equivalent Circuit of Power Industry Equipment. *Naukoyemkiye Tehnologiyi* [High Technologies], (2), 63–67 (in Russian).
9. Zalizny D. I., Prokhorenko S. N. (2012) Mathematical Model for Thermal Processes of Single-Core Power Cable. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (5), 25–34 (in Russian).
10. Gulevich A. I., Kireyev A. P. (1981) *Production of Power Capacitors: Training Manual for Training Workers of Production*. Moscow, Vysshaya Shkola. 284 (in Russian).

Received: 21.12.2015

Accepted: 22.01.2016

Published online: 03.08.2016