

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-6-563-572

УДК 681.518

## Методика диагностирования силовых конденсаторов на аномальный нагрев

Д. И. Зализный<sup>1)</sup>

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

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

**Резюме.** Существующие системы защиты и диагностики не способны выявлять аномальный нагрев силовых конденсаторов, обусловленный развитием их внутренних неисправностей. В статье предлагается методика, позволяющая на ранней стадии обнаружить такой нагрев. Данная методика содержит аппаратную часть и алгоритмы. Аппаратная часть состоит из микропроцессорного прибора, разработанного автором, измерительных трансформаторов тока и датчиков температуры. Это оборудование необходимо подключить к конденсаторной установке с номинальным напряжением 380 В. В процессе работы прибор осуществляет непрерывное измерение температуры поверхности корпуса каждого конденсатора установки, температуры внешней окружающей среды, напряжений и токов со стороны источника питания. Измеренные величины используются в математической модели тепловых процессов, позволяющей рассчитывать температуру наиболее нагретой точки каждого конденсатора в режиме реального времени. Затем выполняется расчет характеристической разности  $\Delta\theta_1$  между среднесуточными значениями температуры диэлектрика и начальным среднесуточным значением этой температуры за вторые сутки от начала измерений. Если величина  $\Delta\theta_1$  превысит значение абсолютной погрешности моделирования, то формируются диагностические сигналы уровней опасности аномального нагрева: низкий, средний, высокий и очень высокий. Также необходимо выполнять расчет скорости изменения  $\Delta\theta_1$  и учитывать полученные значения при формировании уровней опасности. При низком и среднем уровнях опасности аномального нагрева рекомендуется работа системы диагностирования на визуальный сигнал, при высоком уровне – работа на визуальный и звуковой сигналы, а при очень высоком уровне – на отключение конденсатора от сети. Приведенные алгоритмы разработаны эвристически. Окончательное их диагностирование 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:** Зализный, Д. И. Методика диагностирования силовых конденсаторов на аномальный нагрев / Д. И. Зализный // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 6. С. 563–572

---

### Адрес для переписки

Зализный Дмитрий Иванович  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
просп. Октября, 48а, 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 State Technical University  
of Gomel  
48a, housing 2 October Ave.,  
246746, Gomel, Republic of Belarus  
Tel.: +375 232 40-57-64  
kaf\_power@gstu.by

---

## The Diagnosis Technique of Abnormal Heating of Power Capacitors

D. I. Zalizny<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The existing system of protection and diagnostics are not able to detect abnormal heating of the power capacitors caused by its internal malfunction formation. The paper contains a proposal of a technique that enables to detect such heat at its early study. This technique consists of a hardware and an algorithms. The hardware consists of a microprocessor-based instrument developed by the author, of measuring transformers of current and of temperature sensors. This equipment must be connected to the condenser unit with a rated voltage of 380 V. In operation, the device performs continuous measurement of the surface temperature of the casing of each condenser, the temperature of the external environment, voltage and current from the power source. The measured values are used in the mathematical model of thermal processes that enables to calculate the temperature of the hottest point of each capacitor in real-time. Then the calculation of the intrinsic difference  $\Delta\theta_1$  between the average temperature values of the dielectric and the base average value of this temperatures during the second day from the start of the measurements. If the  $\Delta\theta_1$  value exceeds the value of the absolute error of simulation, diagnostic signals of abnormal levels of heating, viz. low, medium, high and very high, are generated. It is also necessary to calculate the rate of change of  $\Delta\theta_1$  and to consider the values obtained in the formation of hazard levels. For the low level and the average level of hazard the operation of diagnostic system with a visual signal is recommended, while for the high level of hazard it is recommended to use both visual and sound signals, and for the very high hazard level the capacitor ought to be turned off from the source. The algorithms have been developed heuristically. The final formation of the algorithms is possible only after the long-term operation of the proposed diagnosis system on real objects. The implementation of the developed system will reduce the probability of sudden failure of capacitor units and, correspondingly, will increase the reliability of power supply system of enterprise.

**Keywords:** power capacitor, diagnosis, abnormal heating, diagnosis system

**For citation:** Zalizny D. I. (2016) The Diagnosis Technique of Abnormal Heating of Power Capacitors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (6), 563–572 (in Russian)

### Введение

Силовые конденсаторы имеют три основные области применения в системах электроснабжения: для компенсации реактивной мощности, для высокочастотной связи по воздушным линиям электропередачи и для сглаживания выпрямленного напряжения. Во всех случаях к ним либо приложены высокие напряжения, либо через них протекают высокие токи, что приводит к достаточно существенному их нагреву. Под действием напряжения возникают диэлектрические потери, а под действием токов – потери в электродах и переходных контактах, рассеивающиеся в виде теплоты.

Если конденсатор полностью исправен, то его нагрев можно назвать естественным. Если же возрастают диэлектрические потери, увеличивается сопротивление переходных контактов или засоряется поверхность корпуса, то конденсатор нагревается дополнительно. Такой его нагрев будем называть аномальным. Аномальный нагрев конденсатора развивается медленно, годами, и в какой-то критический момент может привести к быстрому развитию аварийной ситуации.

В статье рассматриваются алгоритмы и устройство, позволяющие на ранней стадии выявлять аномальный нагрев силового конденсатора, обусловленный его медленно развивающимися неисправностями.

### **Состояние проблемы**

Отказы силовых конденсаторов – достаточно часто встречающееся явление. Причины отказов можно разделить на две группы: обусловленные быстро и медленно развивающимися неисправностями. В первом случае конденсаторы отключаются от сети с помощью токовых защит и соответствующих коммутационных аппаратов. Этот процесс происходит, как правило, внезапно и приводит к ущербу на предприятии. Во втором случае имеется возможность своевременного реагирования путем сигнализации и предупреждения обслуживающего персонала о возможном отключении.

В научной литературе и патентных базах мало информации о системах раннего диагностирования силовых конденсаторов. Так, в [1] рассматривается методика диагностирования конденсаторов для преобразователей частоты, основанная на методе эквивалентного сопротивления. Методика не учитывает влияние сопротивлений переходных контактов, а также ухудшение условий охлаждения. В [2] предлагается математическая модель тепловых процессов электролитического конденсатора, в которой используется метод конечных элементов и которая не позволяет рассчитывать температуры конденсатора в реальном времени. Устройство, описываемое в [3], на основе контроля напряжения на отключенных конденсаторах позволяет обнаружить ряды конденсаторной установки, в которых имеются поврежденные конденсаторы, и не способно выявлять развитие повреждений в установке на ранней стадии.

Система, представленная в [4], контролирует параметры окружающей среды возле конденсатора и сигнализирует, если они выходят за допустимый уровень. Анализ состояния самого конденсатора при этом не производится. Устройство [5] способно измерять скорость изменения емкости силового конденсатора, но не осуществляет контроля каких-либо его тепловых параметров. Прибор [6] выполняет функции защиты конденсатора на основе измерения его напряжений и токов. Тепловые параметры не контролируются. В [7] предложено встраивать систему тепловой защиты непосредственно в конденсатор. При этом фиксируются значения максимально допустимых температур, что не позволяет на ранней стадии выявлять развивающиеся неисправности. Устройство [8] осуществляет прогнозирование развития дефектов в электролитических конденсаторах, применяющихся в силовой электронике.

Таким образом, разработка системы, позволяющей в режиме реального времени выявлять аномальный нагрев силового конденсатора, – это актуальная задача.

### **Аппаратная часть системы диагностирования**

Основу аппаратной части предлагаемой системы диагностирования составляет прибор контроля и расчета температур (ПКРТ) электроэнергетического оборудования, разработанный автором в рамках задания № 1.1.22 Госу-

дарственной программы научных исследований в 2015 г. [9]. Прибор реализован на основе современного восьмиразрядного микроконтроллера фирмы Atmel AT90USB1286, имеющего память программ объемом 128 килобайт. Фотографии лицевой панели макета ПКРТ, а также одного из экранов и печатной платы его цифровой части показаны на рис. 1.

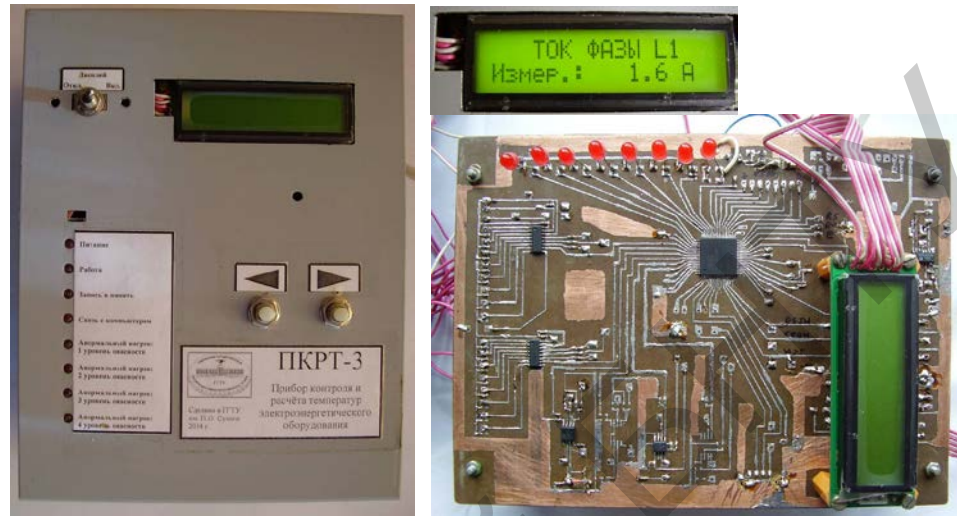


Рис. 1. Внешний вид лицевой панели, экрана с измеренным током и платы цифровой части прибора контроля и расчета температур

Fig. 1. Appearance of the front panel, display demonstrating the measured current and the digital board of the device for temperature control and calculation

Прибор имеет двухстрочный дисплей, кнопки передвижения по меню и восемь сигнальных светодиодов: «Питание», «Работа», «Запись в память», «Связь с компьютером», «Аномальный нагрев – 1-й уровень опасности», ..., «Аномальный нагрев – 4-й уровень опасности»; позволяет выполнять измерения напряжений, токов и температур (табл. 1).

Таблица 1

**Основные технические характеристики прибора контроля и расчета температур**

**Main technical characteristics of the device for temperature control and calculation**

Измеряемая величина	Диапазон	Абсолютная погрешность	Количество каналов
Напряжение постоянное и переменное, В ( <i>true RMS</i> )	0–400	±0,2	3
Ток переменный, А ( <i>true RMS</i> )	0–10	±0,1	3
Температура, °C	0–70	±0,1	6

Программное обеспечение прибора выполняет необходимые расчеты и осуществляет вывод всех измеряемых и основных расчетных величин на дисплей. Принципиальная схема подключения предлагаемой системы диагностирования к конденсаторной установке с номинальным напряжением 380 В приведена на рис. 2.

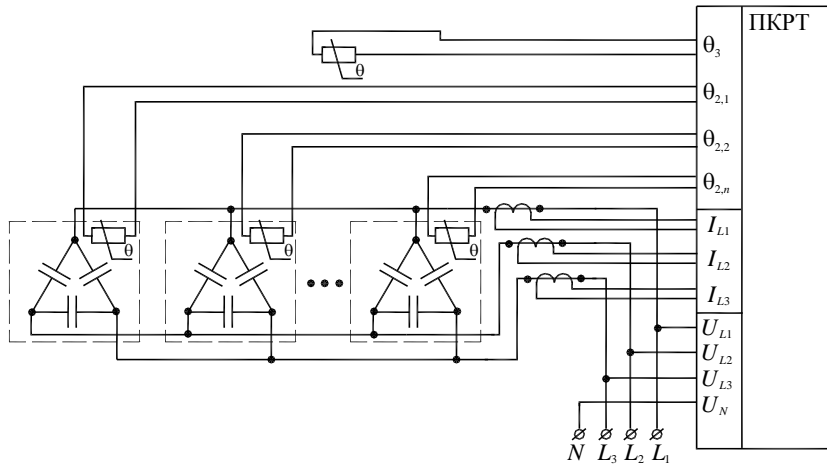


Рис. 2. Схема подключения системы диагностирования силовых конденсаторов

Fig. 2. Wiring system for the diagnosis of power capacitors

К цепям напряжения прибор подключен непосредственно, а к цепям тока – через измерительные трансформаторы. К корпусам конденсаторов прикрепляются датчики температуры. Требуется также датчик для измерения температуры внешней окружающей среды, который, как показывают расчеты [9, с. 141], необходимо установить на расстоянии 10 см от ближайшего конденсатора.

#### Алгоритмы работы системы диагностирования

Для выявления аномального нагрева каждого силового конденсатора необходимо в режиме реального времени выполнять четыре основных этапа:

- измерение требуемых величин (рис. 2);
- расчет потерь активной мощности  $\Delta P$ ;
- расчет температуры наиболее нагретой точки диэлектрика  $\theta$ ;
- анализ диагностических параметров.

Поскольку ПКРТ измеряет мгновенные значения фазных напряжений, соответствующие величины линейных напряжений можно получать расчетным путем. На каждом  $k$ -м интервале расчета действующие значения (*true RMS*) линейных напряжений  $U_{1,2}$ ,  $U_{2,3}$ ,  $U_{3,1}$  будут равны:

$$\begin{cases} U_{1,2,k} = \sqrt{\frac{T_c}{T_d} \sum_{i=1}^n (u_{1,i} - u_{2,i})^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (u_{1,i} - u_{2,i})^2}; \\ U_{2,3,k} = \sqrt{\frac{T_c}{T_d} \sum_{i=1}^n (u_{2,i} - u_{3,i})^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (u_{2,i} - u_{3,i})^2}; \\ U_{3,1,k} = \sqrt{\frac{T_c}{T_d} \sum_{i=1}^n (u_{3,i} - u_{1,i})^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (u_{3,i} - u_{1,i})^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i$  – номер интервала измерения;  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  – мгновенные значения фазных напряжений соответствующих фаз;  $T_c$  – период напряжения сети;

$T_d$  – то же дискретизации по каналам тока и напряжения;  $m$  – количество измеренных значений напряжения за период напряжения сети.

Потери активной мощности в конденсаторе определим в соответствии с [10, с. 190]

$$\Delta P = \Delta P_d + \Delta P_m \approx 0,16\Delta P_d = 0,16 \cdot 2\pi f C_{эл} \operatorname{tg} \delta (U_{1,2}^2 + U_{2,3}^2 + U_{3,1}^2), \quad (2)$$

где  $\Delta P_d$  – потери в диэлектрике;  $\Delta P_m$  – то же в металле электродов;  $f$  – частота напряжения сети;  $C_{эл}$  – электрическая емкость конденсатора;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь.

Для исключения влияния остаточного напряжения на расчет  $\Delta P$  при отключении конденсатора от сети нужно контролировать токи через все его элементы. В случае отсутствия тока в соответствующем элементе расчет  $\Delta P$  должен быть прекращен. Поэтому формулу (2) необходимо дополнить условием наличия соответствующих токов. Для трехфазного конденсатора с внутренними пакетами, соединенными в треугольник, это будут фазные токи  $I_{1,2}$ ,  $I_{2,3}$ ,  $I_{3,1}$ . Непосредственно измерить токи невозможно, поэтому их значения нужно получить расчетным путем на основе измеренных мгновенных значений линейных токов  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  по аналогии с (1) для линейных напряжений.

Логические выражения, дополняющие (2), запишем следующим образом:

$$\begin{cases} (I_{1,2} < I_{\min}) \rightarrow (U_{1,2} = 0); \\ (I_{2,3} < I_{\min}) \rightarrow (U_{2,3} = 0); \\ (I_{3,1} < I_{\min}) \rightarrow (U_{3,1} = 0), \end{cases} \quad (3)$$

где  $I_{\min}$  – минимальное значение тока через конденсатор при наличии приложенного переменного напряжения.

Значение  $I_{\min}$  можно определить по формуле

$$I_{\min} = U_{\text{ном}} 2\pi f k_{\text{зап}} C_{эл}, \quad (4)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное действующее значение напряжения конденсатора;  $k_{\text{зап}} < 1$  – коэффициент запаса, учитывающий возможное снижение емкости конденсатора и приложенного к нему напряжения (можно принять  $k_{\text{зап}} = 0,5$ ).

В случае группы конденсаторов  $C_{эл}$  – это суммарная емкость, подключенная к контролируемому напряжению. При наличии расчетных значений потерь  $\Delta P$  и измеренных значений температуры поверхности корпуса контролируемого конденсатора  $\theta_2$  и температуры внешней окружающей среды  $\theta_3$  (рис. 2) на основе математической модели тепловых процессов [9] необходимо рассчитывать значения температуры наиболее нагретой точки диэлектрика  $\theta_1$  в соответствии с высотой установки датчика температуры поверхности, т. е. на одной горизонтали с ним.

В качестве диагностических параметров выберем характеристическую разность  $\Delta\theta_1$  и скорость ее изменения  $v_x$ . Параметр  $\Delta\theta_1$  должен быть равен превышению средних значений температуры диэлектрика конденсатора  $\theta_1$  за суточные интервалы над начальным средним значением этой температу-

ры за вторые сутки от начала измерений с учетом погрешности моделирования и позволять выявить наличие аномального нагрева конденсатора. Параметр  $v_x$  должен характеризовать скорость развития неисправности в конденсаторе.

Значения  $\Delta\theta_1$  рассчитаем по алгоритму:

$$\begin{cases} \Delta\theta_{1,k} = \theta_{1,cp,k} - \theta_{1,cp,2} - \Delta\theta_{max}; \\ \theta_{1,cp,k} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta_{1,j,k}; \\ k > 2; \\ n = \frac{24 \cdot 3600}{\Delta t}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $k$  – номер суточного интервала;  $\theta_{1,cp,k}$  – среднее значение температуры  $\theta_1$  на  $k$ -м интервале;  $\theta_{1,cp,2}$  – то же на втором суточном интервале после начала измерений;  $\Delta\theta_{max}$  – максимальная абсолютная погрешность расчета температуры  $\theta_1$  по математической модели по отношению к реальным значениям этой температуры;  $\Delta t$  – период дискретизации по каналам температуры;  $j$  – номер интервала измерения и расчета, соответствующий периоду дискретизации  $\Delta t$ ;  $n$  – количество  $j$ -х интервалов за один суточных интервал.

В течение первых суток на расчеты будет действовать ошибка начальных условий математической модели, так как время установления переходных тепловых процессов для среднестатистического силового конденсатора с тепловой постоянной времени  $\tau = 4$  ч составит:  $5\tau = 5 \cdot 4 = 20$  ч. Из этих же соображений выбран суточный интервал для расчета средних значений температуры  $\theta_1$ .

Лабораторные исследования показали, что значение погрешности моделирования  $\Delta\theta_{max}$  находится в пределах  $\pm 4$  °C [9]. Окончательно это значение можно принять только после экспериментальных исследований на работающих конденсаторных установках.

Диагностический параметр  $v_x$ , °C/ч, на  $k$ -м интервале определим по формуле

$$v_{x,k} = \frac{\Delta\theta_{1,k} - \Delta\theta_{1,k-1}}{24}, \quad k > 4. \quad (6)$$

Параметр  $v_x$  равен скорости изменения характеристической разности за один суточный интервал.

Диагностические параметры необходимо сравнивать с их пороговыми значениями для получения уровней опасности аномального нагрева конденсатора. Для характеристической разности  $\Delta\theta_1$  рассмотрим ее переход с отрицательного значения в положительное. Для скорости  $v_x$  выберем порог, обусловленный погрешностью моделирования. Если на  $k$ -м интервале

ле  $v_{x,k} < \frac{\Delta\theta_{max}}{24}$ , то будем считать, что имеет место относительно медленная

скорость развития неисправности в конденсаторе, в противном случае – относительно быстрая скорость развития неисправности.

Используем следующий алгоритм выявления аномального нагрева:

$$\left\{ \begin{array}{l} [(\Delta\theta_{1,k} > 0) \wedge (v_{x,k} > 0)] \rightarrow (G = G + 1); \\ s_k = \frac{G}{m}; \\ A_k = \left[ (s_k > 0,7) \wedge \left( v_{x,k} < \frac{\Delta\theta_{\max}}{24} \right) \right] \vee \left[ (s_k > 0,3) \wedge \left( v_{x,k} \geq \frac{\Delta\theta_{\max}}{24} \right) \right], \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $k$  – номер суточного интервала;  $G$  – счетчик роста суточных интервалов средних значений температуры;  $m$  – общее количество суточных интервалов в процессе анализа аномального нагрева;  $s$  – относительное количество суточных интервалов роста средних значений температуры;  $A$  – булева функция – индикатор наличия аномального нагрева.

Рассмотрим подробнее работу алгоритма (7). Первое логическое уравнение выявляет ситуацию, указывающую на возможность аномального нагрева, когда и характеристическая разность, и ее скорость изменения больше нуля. Если выражение в квадратных скобках равно логической единице, то возможны два варианта: либо произошло естественное увеличение потерь в конденсаторе, обусловленное повышением подаваемого напряжения, либо в конденсаторе развивается неисправность, приводящая к его аномальному нагреву. При любом из этих вариантов счетчик  $G$  инкрементируется.

Параметр  $s$  во втором уравнении показывает относительный вклад возможной ситуации аномального нагрева на временном интервале анализа.

Третье уравнение, записанное в виде булевой функции, присваивает параметру  $A$  логическую единицу, когда наличие аномального нагрева выявлено с высокой степенью вероятности. Выражение в первых квадратных скобках характеризует ситуацию относительно медленно развивающейся неисправности в конденсаторе, когда параметр  $s$  превышает 70 % (более двух третей от всего интервала анализа). Выражение во вторых квадратных скобках указывает на относительно быстро развивающуюся неисправность в конденсаторе, когда значение  $s$  превышает 30 % (условно – около одной трети от всего интервала анализа). В случае, если  $A = 1$ , необходимо определить текущий уровень опасности аномального нагрева конденсатора.

Выделим четыре уровня опасности: низкий, средний, высокий и очень высокий. Присвоим им номера, соответственно:  $w = 1$ ;  $w = 2$ ;  $w = 3$ ;  $w = 4$ . Значение  $w = 0$  показывает отсутствие аномального нагрева. Пороги этих уровней определим на основе характеристической разности  $\Delta\theta_1$  при ее переходе через значения, кратные погрешности  $\Delta\theta_{\max}$ . Такой алгоритм реализуется в виде вложенных условных операторов на любом из языков программирования. Математически запишем его с помощью логических уравнений, размещенных в табл. 2.

В табл. 2 представлены алгоритм, осуществляющий быстрые переходы между уровнями опасности при росте опасности аномального нагрева



конденсатора, и постепенные переходы при снижении опасности. То есть номер уровня опасности скачком может измениться с 0 на 4, но снижаться будет максимум на одно значение каждые сутки. Такая последовательность повышает оперативность реагирования на аварию и снижает вероятность ошибочной недооценки опасности.

При низком и среднем уровнях опасности можно рекомендовать работу системы диагностирования на визуальный сигнал, при высоком уровне – работу на визуальный и звуковой сигналы, а при очень высоком уровне – на отключение конденсатора от сети. В ПКРТ предусмотрена сигнализация уровней опасности аномального нагрева (рис. 1).

Таблица 2

**Алгоритмы для определения уровней опасности аномального нагрева силового конденсатора**

**Algorithms to determine the levels of the risk of the power capacitor abnormal heating**

Условие 1	Условие 2	Результат
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} > 0) \wedge (\Delta\theta_{1,k} < \Delta\theta_{\max})$ – низкий уровень опасности	$w_{k-1} = 0$	$w_k = 1$
	$w_{k-1} > 1$	$w_k = w_{k-1} - 1$
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} \geq \Delta\theta_{\max}) \wedge (\Delta\theta_{1,k} < 2\Delta\theta_{\max})$ – средний уровень опасности	$w_{k-1} < 2$	$w_k = 2$
	$w_{k-1} > 2$	$w_k = w_{k-1} - 1$
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} \geq 2\Delta\theta_{\max}) \wedge (\Delta\theta_{1,k} < 3\Delta\theta_{\max})$ – высокий уровень опасности	$w_{k-1} < 3$	$w_k = 3$
	$w_{k-1} > 3$	$w_k = w_{k-1} - 1$
$(A_k = 1) \wedge (\Delta\theta_{1,k} \geq 3\Delta\theta_{\max})$ – очень высокий уровень опасности	$w_{k-1} < 4$	$w_k = 4$
$A_k = 0$ – аномальный нагрев отсутствует	$w_{k-1} > 0$	$w_k = w_{k-1} - 1$

Отметим, что приведенные алгоритмы выявления аномального нагрева силового конденсатора разработаны эвристически, т. е. на основе логических рассуждений. Окончательное их формирование возможно только после многолетней эксплуатации предлагаемой системы диагностирования на реальных объектах.

**ВЫВОД**

Предлагаемая система диагностирования может быть применена как с использованием специальных аппаратных средств (прибора контроля и расчета температур электроэнергетического оборудования), так и в составе программного обеспечения существующих систем защиты при наличии в них температурных каналов. Внедрение этой системы снизит вероятность внезапного отказа конденсаторных установок и соответственно повысит надежность системы электроснабжения предприятия.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ma, H. Fault Diagnosis and Failure Prediction of Aluminum Electrolytic Capacitors in Power Electronic Converters / H. Ma, L. Wang // 31<sup>st</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. IEEE, 2005. 6 p.

2. Parler, S. G. Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal / S. G. Parler, L. L. Macomber // Powersystems World International Conference & Exhibit (PCIM), November 9–11, 1999. Chicago, 1999. 9 p.
  3. Устройство непрерывного контроля состояния силовой конденсаторной батареи: пат. 2103778 РФ: МПК H02H7/16, G01R31/00 / Н. П. Александрова, К. М. Антипов, А. А. Филиппов; дата публ. 27.01.1998.
  4. Intelligent Monitoring System for Capacitor Complete Device: pat. CN 203434604, H02H3/04; H02H7/16 / Fu Shengchun, Shi Juan; date publ.: 02.12.2014.
  5. Device for Capacitor Bank Protection and State Monitoring and Method Thereof: pat. CN 101609977 (A): H02H7/16 / Xiaoxiang Ping, Xiangyu Liu, Changxing Yang; publ. date: 23.12.2009.
  6. Dynamic Self-Adaptive Protection Device of Power Capacitor and Control Method: pat. CN102130443 B: H02H7/16 / Zairong Lin, Xuebao Liu; publ. date: 20.07.2011.
  7. Intelligent Power Capacitor with Overcurrent and Overtemperature Protection: pat. CN 203352146, H02H7/16 / Zhao Jiasong, Wang Guanlin, Hu Guofu; publ. date: 18.12.2013.
  8. Method and Device for Predicting Electrolytic Capacitor Defects, Converter and Uninterruptible Power Supply Equipped with Such a Device: pat. US 8090548 B2: G01R 27/2605, G01R 31/028, G01R 31/40 / A. Karim, R. Christophe, R. Gerard, V. Pascal; publ. date: 03.01.2012.
  9. Разработка методов и средств для раннего диагностирования электродвигателей и силовых конденсаторов по тепловым параметрам: отчет о НИР (заключ.): / Гомельский гос. техн. ун-т имени П. О. Сухого; рук. Д. И. Зализный. Гомель, 2015. 177 с. № ГР 20141241.
  10. Кучинский, Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
- Поступила 02.03.2016    Подписана в печать 27.05.2016    Опубликована онлайн 29.11.2016

## REFERENCES

1. Ma H., Wang L. (2005) Fault Diagnosis and Failure Prediction of Aluminum Electrolytic Capacitors in Power Electronic Converters. *31<sup>st</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005*. IEEE. 6. DOI: 10.1109/IECON.2005.1569014.
2. Parler S. G., Macomber L. L. (1999) Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal. *Powersystems World International Conference & Exhibit (PCIM), November 9–11, 1999*. Chicago. 9 p.
3. Alexandrova N. P., Antipov K. M., Filippov A. A. (1998) Device for Continuous Monitoring of the State of Power Capacitor Bank. Patent Russian Federation no 2103778 (in Russian).
4. Fu Shengchun, Shi Juan (2014) Intelligent Monitoring System for Capacitor Complete Device: patent CN 203434604.
5. Xiaoxiang Ping, Xiangyu Liu, Changxing Yang (2009) Device for Capacitor Bank Protection and State Monitoring and Method Thereof. Patent CN 101609977 (A).
6. Zairong Lin, Xuebao Liu (2011) Dynamic Self-Adaptive Protection Device of Power Capacitor and Control Method. Patent CN 102130443.
7. Zhao Jiasong, Wang Guanlin, Hu Guofu (2013) Intelligent Power Capacitor with Overcurrent and Overtemperature Protection. Patent CN 203352146.
8. Karim A., Christophe R., Gerard R., Pascal V. (2012) Method and Device for Predicting Electrolytic Capacitor Defects, Converter and Uninterruptible Power Supply Equipped with Such a Device. Patent US 8090548 B2.
9. Zalizny D. I. (2015) *Development of Methods and Tools for Early Diagnosis of Electrical Motors and Power Capacitors According to their Thermal Parameters: a Concluding Report on Research Work*. Number of State Reg. 20141241. Gomel, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. 177 (in Russian).
10. Kuchinsky G. S. (1992) *Electrical Power Capacitors*. Moscow, Energoatomizdat. 320 (in Russian).

Received: 2 March 2016

Accepted: 27 May 2016

Published online: 29 November 2016