

УДК 621.313

*Е.И. БАЙДА, А.А. ЧЕПЕЛЮК***ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕГОРАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ВКЛЮЧЕННЫХ В ТРЕХФАЗНУЮ СЕТЬ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА С НЕЙТРАЛЬЮ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТОКА НЕЙТРАЛИ С ПОМОЩЬЮ РЕЛЕ ТОКА**

Пропонується виявлення несправностей, пов'язаних з відгоранням проводів живлення чи перегоранням спіралей трубчатих електронагрівачів однакової потужності, увімкнених у трифазну мережу за схемою зірка з нейтраллю, шляхом контролю струму у нейтральному провіднику за допомогою реле струму. Проведено дослідження впливу допустимих відхилень напруги живлення та її несиметрії, відхилень електричних параметрів нагрівачів на струм нейтрального провідника при справних нагрівачах та у разі несправностей, пов'язаних з відгоранням проводів живлення чи перегоранням їх спіралей. За результатами досліджень розроблено рекомендації щодо налаштування уставок реле струму.

**Ключові слова:** трубчатий електронагрівач, струм нейтралі, реле струму, уставка реле струму.

Предлагается определение неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей трубчатых электронагревателей одинаковой мощности, включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью, путем контроля тока в нейтральном проводнике с помощью реле тока. Проведены исследования влияния допустимых отклонений напряжения питания и его несимметрии, отклонений электрических параметров электронагревателей на ток нейтрального провода при исправных нагревателях и в случае неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием их спиралей. По результатам исследования разработаны рекомендации по настройке уставок реле тока.

**Ключевые слова:** трубчатый электронагреватель, ток нейтрального провода, реле тока, уставка реле тока.

Was offered a determination of the failure connected with wires' burnout or burnout of spirals of tubular electric heaters with identical power included in a three-phase network according to the star scheme with a neutral, by the way of control of current in the neutral wire with the help of the current relay. Researches of influence of deviations of supply voltage and its asymmetry, deviations of electrical parameters of electric heaters on neutral wire current in case of the normal functioning heaters and in case of the failures connected with wires' burnout or burnout of their spirals were conducted. By results of a research were developed recommendations about setup of settings of the current relay.

**Keywords:** tubular electric heaters, neutral current, current relays, the relay current setting.

**Введение.** Для комплектации промышленных установок, осуществляющих нагрев различных сред путем излучения, конвекции или теплопроводности широко применяются трубчатые электронагреватели (ТЭНы) в которых в качестве нагревательных элементов используются материалы, выполненные из сплавов с высоким удельным сопротивлением. Широкая номенклатура указанных нагревателей: по мощности (от сотен до 25 кВт); номинальному напряжению (от 12 до 380 В); рабочей температуре на поверхности оболочки (от 100 до 600 °С); нагреваемой рабочей среде (вода; растворы кислот, растворы щелочей; спокойная или движущаяся среда воздуха, прочих газов, смесей газов; жиры, масла; щелочи; легкоплавкие металлы; литейные формы, пресс-формы; металлические плиты) и т. д. [1] обусловлена разнообразием современных технологических процессов использующих электронагрев.

Для поддержания необходимой температуры нагрева рабочей среды в электроустановках с электронагревателями используются терморегуляторы (электронные или электромеханические) или термовыключатели с самовозвратом, отключающие нагреватели при достижении заданной температуры нагрева рабочей среды и осуществляющие автоматическое повторное включение нагревателей при снижении температуры рабочей среды на заданный дифференциал температур. Как правило, с помощью контактного или бесконтактного выхода терморегулятора осуществляется коммутация цепи управления силового коммутационного аппарата (контактора, твердотельного реле и др.), осуществляющего подключение электронагревателей к силовой питающей сети.

Для ограничения температуры нагрева нагревателей, неконтролируемый рост которой может привести не только к нарушению технологического процесса вследствие неконтролируемого роста температуры ра-

бочей среды, но и к пожароопасным ситуациям и выходу нагревателей из строя, в цепях управления нагревателями применяются также термовыключатели без самовозврата (термоограничители) или термopредохранители.

Для отключения коротких замыканий в нагревателях, возникающих вследствие пробоя изоляции на корпус, применяют автоматические выключатели или предохранители.

Контроль токов утечки нагревателей может быть реализован с помощью аппаратов разностного тока (дифференциальные реле), отключающих нагреватели в случае достижения токов утечки недопустимого значения.

Помимо указанных выше аварийных режимов, возникающих в нагревателях, распространенным также является отгорание питающих проводников в местах соединения с выводами нагревателя, а также перегорание нагревательных спиралей внутри нагревателей. Указанные аварийные ситуации не всегда сопровождаются короткими замыканиями, поэтому в промышленных установках, использующих несколько нагревателей включенных параллельно или в разные фазы, могут оставаться долгое время незамеченными и обнаруживаются, как правило, с появлением нарушений в технологическом процессе нагрева в виде недостаточного, медленного или (и) неравномерного нагрева рабочих сред, что может приводить к снижению производительности, недоставке или браку продукции. В таких случаях, помимо непрерывного контроля температуры рабочей среды, целесообразным также является ведение контроля исправности нагревателей во время их работы.

**Цель работы и постановка задач исследования.**

Целью данной работы является исследование возможности обнаружения неисправностей, связанных с

отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей трубчатых электронагревателей одинаковой мощности включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью путем контроля тока в нейтральном проводе с помощью реле тока.

Электрическая схема включения таких нагревателей в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью приведена на рис. 1. Как правило, в таких схемах, с целью обеспечения равномерной нагрузки фаз, используют нагреватели одинаковой мощности, одновременное подключение которых к трехфазной сети осуществляется посредством трехполосного коммутационного аппарата.

Контроль исправности нагревателей во время их работы в указанной схеме может быть реализован посредством контроля тока через каждый из нагревателей с помощью токовых реле или датчиков тока, включенных последовательно с нагревателями. Недостатком указанного способа контроля является то, что его практическая реализация требует установки в каждой ветви нагревателей токового реле или датчика, количество которых увеличивается пропорционально количеству ступеней нагрева.

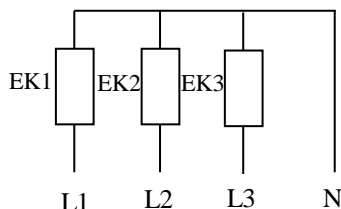


Рис. 1 – Схема включения нагревателей (ЕК1-ЕК3) в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью

Для устранения указанного недостатка предлагается вести контроль исправности нагревателей одинаковой мощности, включенных по схеме звезда с нейтралью, посредством контроля суммарного тока нейтрали с помощью включенного в нейтраль токового реле КА (рис. 2). В случае использования нескольких ступеней нагрева, каждая из ступеней подключается по схеме звезда с нейтралью, а токовое реле включается общую для всех ступеней нейтраль.

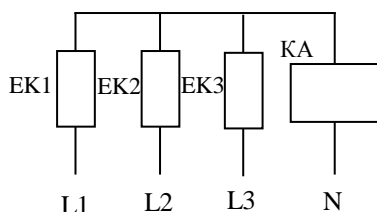


Рис. 2 – Схема включения нагревателей (ЕК1-ЕК3) в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью и реле тока КА

При такой схеме включения предполагается, что при исправных нагревателях, в соответствии с первым законом Кирхгофа, ток нейтрали будет равняться или близким к нулю, так как нагрузка при этом является практически симметричной. В случае прерывания тока в одном из нагревателей из-за его перегорания или обрыва цепи его питания – в нейтрали появится ток, вызванный несимметрией нагрузки.

Для практической реализации таких схем контроля необходимо определить граничные значения

токов нейтрали при исправных электронагревателях и в случае неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей нагревателей с учетом допустимых отклонений напряжения питания и его несимметрии и отклонения электрических параметров электронагревателей вследствие случайного разброса параметров. По указанным значениям может быть определена токовая уставка реле.

**Допустимые отклонения напряжений и электрических параметров нагревателей.** Нормы отклонения напряжения питания и его несимметрии установлены в [2]. Применительно к четырехпроводным электрическим сетям с глухозаземленной нейтралью (номинальное напряжение 0,38 кВ) нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии равны соответственно  $\pm 5\%$  и  $\pm 10\%$  от номинального напряжения электрической сети; нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям в точках общего присоединения к электрическим сетям равны 2,0 % и 4,0 % соответственно.

В соответствие с [1] отклонение потребляемой мощности ТЭН при номинальном напряжении не должно превышать плюс 5 % и минус 10 % от номинальной потребляемой мощности для ТЭН с активным сопротивлением свыше 10 Ом и  $\pm 10\%$  для ТЭН с активным сопротивлением менее 10 Ом. Под номинальной потребляемой мощностью ТЭНа (указывается изготовителем на изделии) понимают мощность, потребляемую ТЭНом при номинальном напряжении в условиях нормальной теплоотдачи при рабочей температуре. Рабочие температуры ТЭНов в зависимости от нагреваемой среды составляют до (100, 320, 450, 600) °С.

**Алгоритм определения граничных значений токов нейтрали в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей.** Здесь и далее под нормальным режимом работы нагревателей включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью будем понимать работу при исправных нагревателях, а под аварийным режимом работы нагревателей - работу при неисправностях, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей нагревателей. Под напряжениями и токами будем понимать их среднеквадратичные значения.

Из теории трехфазных цепей [3] следует, что ток в нейтральном проводнике определяется как несимметрией напряжений по обратной и нулевой последовательностям [2] (определяется внешними факторами), так и несимметрией нагрузки (нагревателей), которая определяется случайным разбросом номинальных значений мощности нагревателей [1].

Алгоритм определения граничных значений токов нейтрали при этом сводится к следующему.

1. Определить предельно допустимые (максимальные и минимальные) значения фазных напряжений сети при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям.

2. Определить предельно допустимый случайный разброс электрических параметров (мощности) нагре-

вателей.

3. Определить граничные значения токов нейтрали при предельно допустимых значениях фазных напряжений сети и предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям с учетом случайного разброса параметров нагревателей в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей.

4. Определить значение тока уставки реле тока.

Далее предложенный алгоритм будет реализован на примере включения до трех ступеней нагрева, каждая из которых состоит из трех ТЭНов номинальной мощностью 1 кВт, включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью (рис. 1).

**Определение предельно допустимых значений фазных напряжений сети при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений.**

Для определения предельно допустимых значений напряжений предположим, что фазные напряжения

$$U_i = U + \Delta U_i, \tag{1}$$

где  $U_i$  – значения фазных напряжений;

$U$  – номинальные фазные напряжения с учетом сдвига в пространстве;

$i = a, b, c$  – индексы фаз;

$\Delta U_i$  – отклонение фазных напряжений от номинального.

Тогда [2, 3]

$$K_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_0}{U_1} = f_0(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c), \tag{2}$$

$$K_2 = \frac{U_2}{U_1} = f_2(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c),$$

где  $K_0, K_2$  – коэффициенты несимметрии напряжений нулевой и обратной последовательности;

$\Delta U_i$  – подлежащие определению отклонения фазных напряжений.

Используя значения предельно допустимых коэффициентов несимметрии напряжений нулевой и обратной последовательности [2], решаем систему (3) относительно  $\Delta U_a, \Delta U_b$

$$\begin{aligned} f_0(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c) &= 0,04, \\ f_2(\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c) &= 0,04. \end{aligned} \tag{3}$$

В результате получим:

$$\begin{aligned} \Delta U_a &= \varphi(\Delta U_c), \\ \Delta U_b &= \varphi(\Delta U_c). \end{aligned} \tag{4}$$

Неизвестное значение отклонения фазного напряжения  $\Delta U_c$  в (4), подбиралось согласно условию по предельно допустимым значениям установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии:

$$\begin{aligned} U_{i \max} &= 1,1 \cdot U \\ \text{или} \\ U_{i \min} &= 0,9 \cdot U. \end{aligned} \tag{5}$$

Следовательно, условия [2] по предельно допустимым значениям установившегося отклонения напряжения на выводах приемников электрической энергии ( $\pm 10\%$  от номинального напряжения электрической сети) и предельно допустимых значениях коэффициента несимметрии напряжений по обратной и ну-

левой последовательностям (4 %) выполнены (наихудший вариант работы сети).

В табл. 1 приведены полученные предельно допустимые максимальные и минимальные значения фазных напряжений при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям.

Таблица 1 – Предельно допустимые максимальные и минимальные значения фазных напряжений при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям

$U$	$a$	$b$	$c$
$U_{\max}, \text{В}$	242	220,4	220,4
$U_{\min}, \text{В}$	217,3	198	198

**Определение предельно допустимых отклонений мощности нагревательных элементов и расчет токов нейтрали.** Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей можно предположить, что случайные значения мощностей нагревателя подчиняется нормальному закону распределения случайных величин [4].

В соответствие с [1] для ТЭН с активным сопротивлением свыше 10 Ом отклонение потребляемой мощности ТЭНа при номинальном напряжении не должно превышать плюс 5 % и минус 10 % от номинальной потребляемой мощности. Приняв это отклонение за предельно допустимое, можно определить среднее значение мощности одного нагревателя и дисперсию (на основании правила «трёх сигм») [4].

Результат расчета для нагревателя номинальной мощностью 1000 Вт:

$$P_s = 975 \text{ Вт}, \sigma = 25 \text{ Вт},$$

где  $P_s$  – среднее значение мощности одного нагревателя;

$\sigma$  – разброс значений.

Вид функции плотности вероятности при нормальном законе распределения случайной величины

$$p = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(P-P_s)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \tag{6}$$

где  $p$  – плотность вероятности появления мощности нагревателя со значением  $P$ .

График плотности вероятности показан на рис. 3.

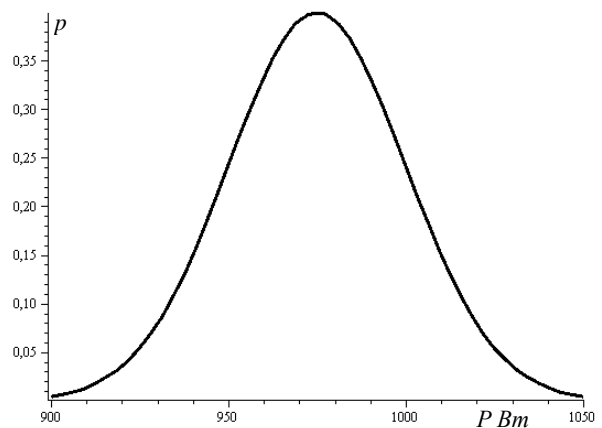


Рис. 3 – Плотность вероятности отклонения мощности одного нагревателя

Вид расчетных уравнений для схемы звезда с нейтралью для определения тока нейтрали:

$$\begin{cases} U_a = I_a \cdot (Z_a + Z_l) + I_0 \cdot Z_0, \\ U_b = I_b \cdot (Z_b + Z_l) + I_0 \cdot Z_0, \\ U_c = I_c \cdot (Z_c + Z_l) + I_0 \cdot Z_0, \\ I_0 = I_a + I_b + I_c. \end{cases} \quad (7)$$

где  $U_a, U_b, U_c$  – фазные напряжения;

$I_a, I_b, I_c$  – фазные токи;

$I_0$  – ток нейтрали;

$Z_l$  – полное сопротивление фазного проводника;

$Z_a, Z_b, Z_c$  – эквивалентное сопротивление нагревателей, включенных в соответствующие фазы;

$Z_0$  – полное сопротивление нейтрального проводника.

Сопротивление фазных и нейтрального проводника определялось по удельным сопротивлениям питающего кабеля марки АВВГ (3x95+1x50) мм<sup>2</sup>, приведенным в [5], при длине питающего кабеля 100 м.

Эквивалентные сопротивления нагревателей, включенных в соответствующие фазы при включенных трех ступенях нагрева определяются из выражения:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_{1j} + R_{2j} + R_{3j}}. \quad (8)$$

В (8) каждое из  $R_j$  – сопротивление отдельного нагревателя 1, 2 и 3-й ступени нагрева, определяемое по формуле:

$$R_j = \frac{P_j}{U^2}, \quad (9)$$

где  $U$  – номинальное напряжение соответствующей фазы;

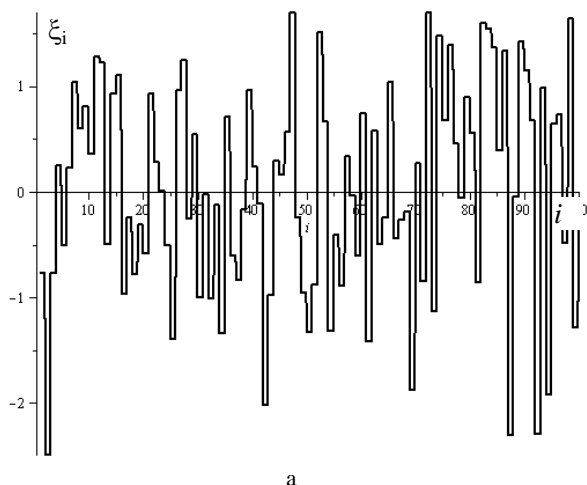
$P_j$  – значение мощности, изменяющейся в соответствии с нормальным законом распределения случайной величины.

Значения случайных величин мощности нагревателей вычислялись по формуле

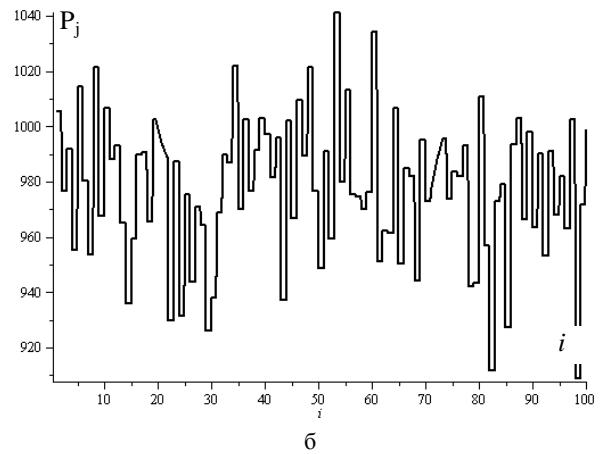
$$P_j = P_s + \sigma \cdot \xi_i, \quad (10)$$

где  $\xi_i$  – генерируемая псевдослучайная величина, распределённая по нормальному закону [6] и изменяющаяся в диапазоне (минус 3...плюс 3).

Графики некоторых значений  $\xi_i$  и  $P_j$  показаны на рис. 4.



а



б

Рис. 4 – Значения случайной величины, распределённой по нормальному закону (а) и мощности (б) в зависимости от числа генераций

**Определение граничных значений токов нейтрали.** Для получения достоверных значений граничных токов нейтрали при предельно допустимых значениях фазных напряжений сети и предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжений с учетом случайного разброса параметров нагревателей в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей число генераций подбиралось расчетным путём и равнялось 5000.

Алгоритм определения граничных значений токов нейтрали при этом состоял из следующих действий.

1. Для каждого испытания генерировалось девять значений случайной величины  $\xi_i$ .

2. По (10) определялись случайные значения мощности нагревателей.

3. По (9) рассчитывались случайные значения сопротивлений нагревателей.

4. Из (8) определялись значения эквивалентных сопротивлений нагревателей, включенных в соответствующие фазы.

5. Решалась система уравнений (7).

Среднее значение тока нейтрали и его предельные отклонения рассчитывались по формулам

$$I_{0s} = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N I_{0i}, \quad \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_1^N (I_{0i}^2 - I_{0s}^2), \quad (11)$$

где  $I_{0s}$  – среднее значение тока нейтрали;

$N$  – число генераций;

$\sigma^2$  – квадрат дисперсии тока нейтрали;

$I_{0i}$  – текущее значение тока нейтрали для каждой генерации.

Граничные значения токов нейтрали определялись по выражениям

$$I_{0\min} = I_{0s} - 3 \cdot \sqrt{\sigma^2}, \quad (12)$$

$$I_{0\max} = I_{0s} + 3 \cdot \sqrt{\sigma^2},$$

где  $I_{0\min}$ ,  $I_{0\max}$  – минимальное и максимальное значение тока нейтрали для каждого опыта.

Результаты расчетов токов нейтрали по изложенному выше алгоритму при работе одной, двух и трёх ступеней нагревателей в нормальном и аварийном режимах работы приведены в табл. 2 – табл. 4.

Таблица 2 – Расчетные значения тока нейтрали при работе одной ступени нагревателей

Нормальный режим		
$U$	$I_{0min}, A$	$I_{0max}, A$
$U_{max}$	0,03	0,88
$U_{min}$	0,029	0,79
Аварийный режим		
$U$	$I_{0min}, A$	$I_{0max}, A$
$U_{max}$	4,17	4,65
$U_{min}$	3,74	4,17

Таблица 3 – Расчетные значения тока нейтрали при работе двух ступеней нагревателей

Нормальный режим		
$U$	$I_{0min}, A$	$I_{0max}, A$
$U_{max}$	0,26	1,49
$U_{min}$	0,24	1,32
Аварийный режим		
$U$	$I_{0min}, A$	$I_{0max}, A$
$U_{max}$	3,43	4,43
$U_{min}$	3,08	3,98

Таблица 4 – Расчетные значения тока нейтрали при работе трех ступеней нагревателей

Нормальный режим		
$U$	$I_{0min}, A$	$I_{0max}, A$
$U_{max}$	0,55	2,03
$U_{min}$	0,49	1,81
Аварийный режим		
$U$	$I_{0min}, A$	$I_{0max}, A$
$U_{max}$	2,82	4,11
$U_{min}$	2,53	3,70

В табл. 2 - табл. 4 отмечены максимальные значения токов нейтрали в нормальном режиме работы нагревателей и минимальные значения токов нейтрали в аварийном режиме работы нагревателей. Полученными максимальными значениями токов нейтрали в нормальном режиме работы нагревателей определяется минимальная граница диапазона токов несрабатывания реле тока, а минимальными значениями токов нейтрали в аварийном режиме работы нагревателей – максимальная граница токов срабатывания реле тока.

Анализ данных из указанных таблиц свидетельствует о том, что наибольшее значения максимального тока нейтрали в нормальном режиме работы нагревателей и наименьшее значение минимального тока нейтрали в аварийном режиме работы нагревателей будут протекать в нейтрали при включении трех ступеней нагревателей. Поэтому токовая уставка реле тока при использовании ступенчатого включения нагревателей должна выбираться при включении максимального числа ступеней.

**Рекомендации по настройке уставки реле тока.**

На электротехническом рынке широко представлены электронные реле тока, которые помимо задания токовой уставки позволяют задавать также и задержку срабатывания реле. Выходными элементами таких реле являются переключающие контакты, которые легко могут быть интегрированы в схемы сигнализации или аварийного отключения.

При использовании таких реле в предложенных схемах благодаря наличию настраиваемой задержки срабатывания можно исключить ложные срабатывания защиты вследствие переходных процессов и неодно-

временности замыкания контактов при включении-отключении отдельных ступеней нагревателей.

Для корректной настройки реле его ток уставки рекомендуется устанавливать на середине диапазона токов - максимально возможного тока нейтрали при исправных нагревателях и минимально возможного тока нейтрали при отгорании питающих проводников или перегорании спиралей нагревателей.

Для трех ступеней нагрева (табл. 4) ток уставки реле, в соответствие с указанными выше рекомендациями, должен быть установлен равным 2,28 А. Данный ток уставки реле обеспечивает обнаружение отгорания питающего проводника или перегорания спирали нагревателей при их мощности 1 кВт.

Значения токов уставки реле тока при других мощностях ТЭНов (с учётом условия, что его сопротивление не меньше 10 Ом) при включенных трех ступенях нагрева, приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Значения граничных токов и тока уставки реле тока в зависимости от мощности ТЭНа при работе трех ступеней нагрева

$P_n$ кВт	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$I_{0max}, A$	1,03	2,03	2,98	3,94	4,85	5,72	6,55	7,37
$I_{0min}, A$	1,29	2,53	3,73	4,9	6,03	7,18	8,25	9,32
$I_{0u}, A$	1,16	2,28	3,355	4,42	5,44	6,45	7,4	8,345

На рис. 5 приведены графические зависимости граничных токов и тока уставки реле -  $I_{0u}$  из табл. 5 от номинальной мощности ТЭНов.

Уравнение для тока уставки в функции номинальной мощности полученное в результате аппроксимации данных из табл. 5 запишется в виде:

$$I_{0u} = 0,134 + 2,053 \cdot P_n, \tag{13}$$

где  $I_{0u}$  – ток уставки реле, А;  
 $P_n$  – номинальная мощность ТЭНа, кВт.

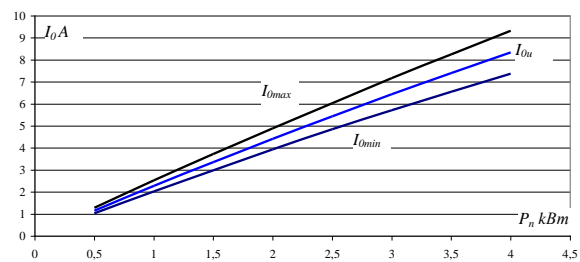


Рис. 5 – Зависимость тока уставки реле от мощности ТЭНов

Формула (13) справедлива в диапазоне номинальных мощностей ( $0,5 \leq P_n \leq 4$ ) кВт.

В заключение, было проведено компьютерное моделирование одного из вариантов работы ТЭНов в системе SimPowerSystem при номинальном напряжении и номинальной мощности, которое иллюстрирует изменение токов в фазных и нейтральном проводниках в нормальном и аварийном режимах работы нагревателей. Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 6-7.

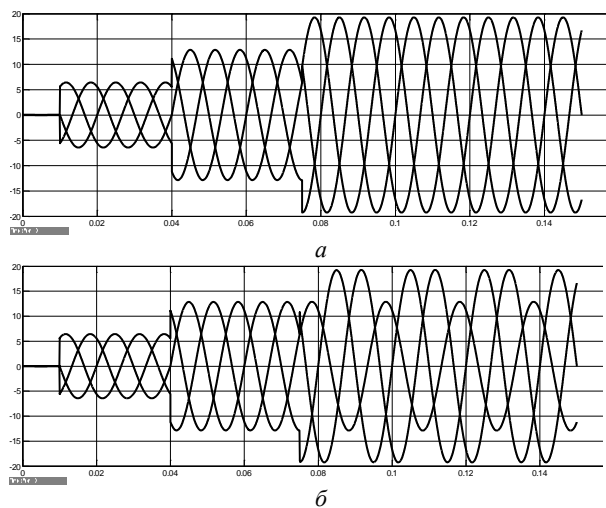


Рис. 6 – Токи в фазах при включенні 1, 2 і 3 ступеней нагрівачей: *a* - в нормальному режимі роботи трьох ступеней нагрівачей; *б* - в нормальному режимі роботи двох ступеней нагрівачей і аварійному режимі в третій ступені

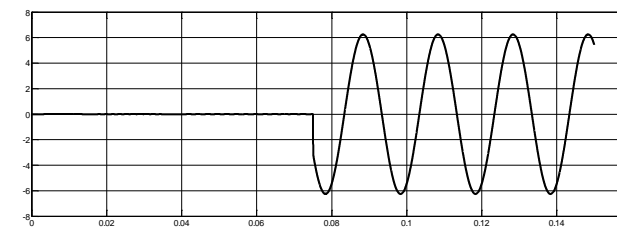


Рис. 7 – Ток нейтралі в аварійному режимі роботи третьої ступені нагрівачей

#### Выводы.

1. Предложена методика обнаружения неисправностей, связанных с отгоранием питающих проводников или перегоранием спиралей трубчатых электронагревателей включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью путем контроля тока в нейтральном проводе с помощью реле тока.

2. Предложен алгоритм определения граничных токов нейтрали.

3. Предложена методика определения предельно допустимых значений напряжений питания нагревателей при предельно допустимых коэффициентах несимметрии напряжения.

4. Определены предельно допустимые отклонения мощности нагревательных элементов (ТЭНов) с учётом случайного характера этой величины.

6. Определены граничные значения токов нейтрали при исправных нагревателях нейтрали и при отгорании питающих проводников или перегорании спиралей нагревателей с учетом допустимых отклонений напряжения питания и его несимметрии, отклонения электрических параметров (мощность, активное сопротивление) электронагревателей.

7. На основании п. 1-6 выводов разработаны рекомендации по настройке уставок реле тока.

8. Получены значения уставок реле тока для ТЭНов мощностью (0,5-4) кВт, что делает предложенную методику универсальной.

#### Список литературы

1. ГОСТ 13268-88 Электронагреватели трубчатые.
2. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Каплянский А. Е., Лысенко А. П., Полотовский Л. С. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1972. – 447 с.
4. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 64 с.
5. ГОСТ 2849-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.
6. Дьяконов В. П. Математическая система Maple. – М.: Солон, 1998. – 399 с.
7. Справочник электрика промышленных предприятий. Под редакцией Л.Б. Геллера – Минск.: Редакция научно-технической литературы, 1963. – 585 с.

#### References (transliterated)

1. *GOST 13268-88 Jelektronagrevateli trubchatye* [State Standard 13268-88. Heating elements]. Moscow, Standartinform Publ.
2. *GOST 13109-97 Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehničeskix sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskox jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [State Standard 13109-97. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems]. Moscow, Standartinform Publ.
3. Kapljanskij A. E., Lysenko A. P., Polotovskij L. S. *Teoreticheskie osnovy jelektrotehniky* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow : High school, 1972. 447 p.
4. Sobol' I. M. *Metod Monte-Karlo* [Monte Carlo method]. Moscow: 1978. 64 p.
5. *GOST 2849-93. Korotkie zamykanija v jelektroustanovkah. Metody raschjota v jelektroustanovkah peremennogo toka naprjazheniem do 1 kV* [State Standard 2849-93. Short circuits in electrical installations. calculation methods in AC electrical voltage up to 1 kV].
6. D'jakonov V. P. *Matematicheskaja sistema Maple* [A mathematical system Maple]. Moscow : Solon, 1998. 399 p.
7. Geller L.B. *Spravochnik jelektrika promyshlennyh predprijatij.* Minsk.: Redakcija nauchno-tehnicheskox literatury, 1963. 585 p.

Поступила (received) 20.06.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Виявлення перегорання трубчатих електронагрівачів увімкнених у трифазну мережу за схемою зірка з нейтраллю за зміною струму в нейтралі за допомогою реле струму / Є. І. Байда, О. О. Чепелюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 32 (1204). – С. 16-22. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Обнаружение перегорания трубчатых электронагревателей включенных в трехфазную сеть по схеме звезда с нейтралью по изменению тока нейтрали с помощью реле тока / Е. И. Байда, А. А. Чепелюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 32 (1204). – С. 16-22. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Detection of burnout of tubular electric heaters, included in the three-phase network with the star scheme with the neutral on change of current of neutral with the help of current relay / E. I. Baida, O. O. Chepelyuk //**

NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 16-22. Bibliography: 7. – ISSN 2079-3944.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Байда Евгений Иванович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических аппаратов; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [baida\\_kpi@i.ua](mailto:baida_kpi@i.ua).

**Байда Євген Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [baida\\_kpi@i.ua](mailto:baida_kpi@i.ua).

**Baida Evgeniy Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Electrical Apparatus; tel.: (057) 707-68-64; e-mail: [baida\\_kpi@i.ua](mailto:baida_kpi@i.ua).

**Чепелюк Александр Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических аппаратов; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua).

**Чепелюк Олександр Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua).

**Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Electrical Apparatus; tel.: (057) 707-68-64; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua).