

*Є.І. БАЙДА, О.О. ЧЕПЕЛЮК*

### УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ПОСТІЙНОЇ ЧАСУ НАГРІВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

У статті запропоновано удосконалення методу визначення сталої температури нагріву струмоведучих частин електричного апарату і його постійної часу нагріву в разі реальних вимірів значень температури, виконаних з деякою помилкою. У відповідності із зазначеним методом при відомій температурі навколишнього середовища проводиться включення апарату з вимірюванням температури його нагріву через однакові проміжки часу; за даними вимірів будується графік похідної від температури за часом; за даними графіка визначається стала температура і постійна часу нагріву. Показано, що неточності вимірювання температури можуть істотно спотворювати отримувані для визначення постійної часу та сталої температури нагріву залежності і для правильної оцінки параметрів необхідно вид апроксимуючої функції похідною температури за часом знати априорі - лінійна функція. Даний метод дозволяє істотно скоротити час випробувань електричних апаратів на нагрів в тривалому режимі роботи. Зазначений метод проілюстровано на прикладі визначення нагріву котушки в часі методом вимірювання активного опору. На підставі отриманих і оброблених експериментальних даних визначаються також коефіцієнти перевантаження по потужності в тривалому режимі роботи, а також у короткочасному та повторно-короткочасному режимах, що дозволяє правильно експлуатувати електричний апарат.

**Ключові слова:** електричний апарат, температура нагріву, постійна часу нагріву, режим роботи, коефіцієнт перевантаження.

*Е.И. БАЙДА, А.А. ЧЕПЕЛЮК*

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье предложено усовершенствование метода определения установившейся температуры нагрева токоведущих частей электрического аппарата и его постоянной времени нагрева в случае реальных измерений значений температуры, выполненных с некоторой ошибкой. В соответствие с указанным методом при известной температуре окружающей среды производится включение аппарата с замером температуры его нагрева через одинаковые промежутки времени; по данным измерений строится график производной от температуры по времени; по данным графика определяется установившаяся температура и постоянная времени нагрева. Показано, что неточности измерения температуры могут существенно исказить получаемые для определения постоянной времени и установившейся температуры зависимости и для правильной оценки параметров необходимо вид аппроксимирующей функции производной температуры по времени знать априори – линейная функция. Данный метод позволяет существенно сократить время испытаний электрических аппаратов на нагрев в продолжительном режиме работы. Указанный метод проиллюстрирован на примере определения нагрева катушки во времени методом измерения активного сопротивления. На основании полученных и обработанных экспериментальных данных определяются также коэффициенты перегрузки по мощности в длительном режиме работы, а также в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, что позволяет правильно эксплуатировать электрический аппарат.

**Ключевые слова:** электрический аппарат, температура нагрева, постоянная времени нагрева, режим работы, коэффициент перегрузки.

*E.I. BAIDA, O.O. CHEPELIUK*

### ADVANCED METHOD FOR DETERMINING THE STEADY TEMPERATURE AND CONSTANT HEATING TIME OF ELECTRIC APPARATUS

The article proposes an improvement in the method for determining the steady-state heating temperature of current-carrying parts of an electrical apparatus and its time constant in the case of real measurements of temperature values made with some error. In accordance with the specified method, at a known ambient temperature, the apparatus is turned on with the measurement of its heating temperature at regular intervals; based on the measurement data, a graph of the temperature derivative is plotted over time; according to the data of the graph, the steady-state temperature and the constant heating time are determined. It is shown that inaccuracies in temperature measurement can significantly distort the dependences obtained for determining the time constant and the steady-state heating temperature, and for a correct estimation of the parameters, the form of the approximating function of the temperature derivative with respect to time must be known a priori - a linear function. This method can significantly reduce the time for testing electrical devices for heating in continuous operation. This method is illustrated by the example of determining the heating of the coil over time by measuring the active resistance. On the basis of the obtained and processed experimental data, the power overload coefficients are also determined in the long-term operation mode, as well as in the short-term and intermittent modes, which makes it possible to correctly operate the electrical apparatus.

**Key words:** electric apparatus, heating temperature, heating time constant, operating mode, overload coefficient.

**Введение.** Функцией электрических аппаратов является защита людей, животных, имущества и окружающей среды от губительного воздействия электрической энергии [1]. Одним из проявлений таких функций является нагрев токоведущих частей при протекании по ним электрического тока. При этом, защищая людей, животных, имущество и окружающую среду электрический аппарат не должен и сам перегреваться в процессе работы (температура частей аппарата не должна превышать допустимых значений) [2]. Поэтому сам аппарат также должен проходить тепловые испытания по определенной методике [2].

Помимо определения температуры в продолжительном режиме работы, электрические аппараты должны проходить проверку на термическое воздействие токов перегрузки и короткого замыкания (проверка на термическую стойкость) [3]. При этом нельзя измерить установившуюся температуру нагрева устройства. Можно говорить лишь о допустимом значении интеграла Джоуля, который определяет тепловое воздействие тока за определенный промежуток времени [1]. В этом случае для расчетов температуры удобнее воспользоваться значением постоянной времени нагрева, определяющей скорость нагрева электрического аппарата.

Одним из способов определения температуры токоведущих частей электрических аппаратов, в частности – их обмоток, является метод определения температуры методом измерения активного сопротивления в установившемся тепловом режиме [2]. Недостатками такого метода является невозможность определения постоянной времени нагрева и длительность испытаний. Тепловым режим считают установившимся, если температура отдельных частей аппарата не изменяется более чем на 1°C в течение 1 часа [2]. Иногда такой процесс может длиться несколько часов и даже суток. Кроме этого, неопределенность постоянной времени нагрева не дает возможность определить допустимую термическую стойкость электрического аппарата.

**Метод определения установившейся температуры и постоянной времени процесса нагрева.** Метод приведен в литературе [4] и заключается в следующем: при известной температуре окружающей среды производится нагрев аппарата с замером температуры его нагрева через одинаковые промежутки времени; по данным измерения строится график производной от температуры по времени; по данным графика определяется установившаяся температура и постоянная времени нагрева (рис. 1).

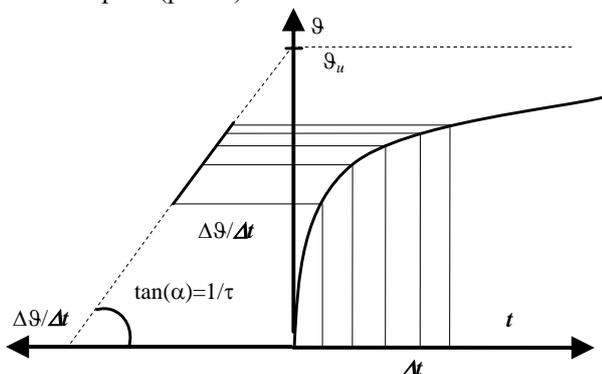


Рис. 1. Определение установившейся температуры и постоянной времени графическим методом

В [4] показано, что функция  $\Theta' = f(\Theta)$  – прямая линия, но непонятно, что будет, если при построении графика  $\Theta = \varphi(t)$  значения температур будут измерены с некоторой ошибкой? Очевидно, что в случае неточных значений температур (ошибки в измерении) линия  $\Theta' = f(\Theta)$  может значительно отличаться от линии, показанной на рис. 1 за счет увеличения ошибки при вычислении производной.

Поэтому целью статьи является усовершенствование метода определения установившейся температуры нагрева и его постоянной времени в случае реальных измерений значений температуры выполненных с некоторой ошибкой.

**Теоретическая часть.** Известно [4], что динамика изменения температуры нагрева тела может быть описана уравнением

$$\Theta = (\Theta_u - \Theta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \Theta_0, \quad (1)$$

где  $\Theta_u$  – установившаяся температура;  $\Theta_0$  – начальная температура;  $\tau$  – постоянная времени.

Производная от (1) по времени будет определять

скорость нагрева устройства

$$\Theta' = \frac{(\Theta_u - \Theta_0)}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

где  $\Theta'$  – производная от температуры по времени.

Определив из (1)  $e^{-\frac{t}{\tau}}$  и подставив это значение в (2) получим значение производной в функции температуры

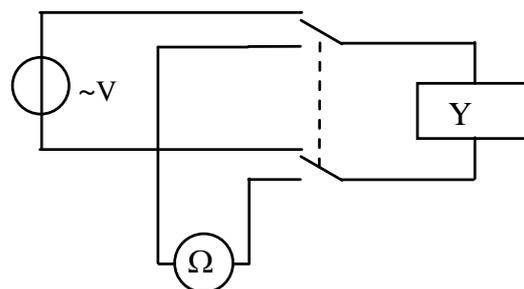
$$\Theta' = \frac{\Theta_u}{\tau} - \frac{\Theta}{\tau}. \quad (3)$$

Дальнейшая задача сводится к определению температуры устройства. Измерение температуры может проводиться методом термодпар, методом сопротивлений [2], также измерение температуры может проводиться пирометрами и др.

Термодпары (если они не встроены внутрь устройства) измеряют температуру поверхности объекта. Кроме того, необходимо учитывать ошибку в измерении за счет отвода термодпарой тепла. Такая ошибка может быть значительной [6]. Пирометры сложны в использовании, измеряют среднюю температуру поверхности и требуют определенной настройки. Потому для токоведущих частей электрических аппаратов, в частности их обмоток, более подходящим является определение температуры методом сопротивлений, с помощью которого можно определить *среднюю по объёму* температуру.

Схема для измерения активного сопротивления катушки переменного тока достаточно проста – рис. 2.

Последовательность измерений: 1) при известной температуре окружающей среды измеряется начальное сопротивление катушки; 2) катушка подключается к источнику напряжения; 3) измерение сопротивления производится через равные промежутки времени. Так как измерения сопротивления проводятся в течение 1...2 секунд, то время измерения практически не сказывается на точности измерения температуры катушки.



~V – источник переменного напряжения; Ω – омметр; Y – катушка

Рис. 2. Схема измерения сопротивления

Предположим, что за время измерений температура окружающей среды не изменилась, тогда рассчитать температуру по измеренным значениям сопротивлений можно по формуле

$$\Theta = \frac{R_{\Theta} - R_0}{\alpha} + \Theta_0, \quad (4)$$

где  $R_{\vartheta}$  – сопротивление при температуре  $\vartheta$ ;  $R_0$  – сопротивление при температуре  $\vartheta_0$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления равный для меди 1/235.

**Пример расчетов температуры.** В качестве примера приведен расчет нагрева катушки электромагнита переменного тока в притянутом положении якоря при напряжении источника питания 220 В. Температура окружающей среды равнялась 20 °С. Интервал времени измерения – 5 мин.

Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерения сопротивления, вычисления температуры и её производной

$t$ , мин	$R_{\vartheta}$ , Ом	$\vartheta$ , °С	$\vartheta'$ , °С/мин
0	43,8	20	
5	44,4	23,22603	0,645205
10	44,8	25,37671	0,430137
15	45,2	27,5274	0,430137
20	45,5	29,14041	0,322603
25	45,8	30,75342	0,322603
30	46	31,82877	0,215068
35	46,2	32,90411	0,215068

Обработка данных при помощи электронных таблиц Excel показана на рис. 3-4.

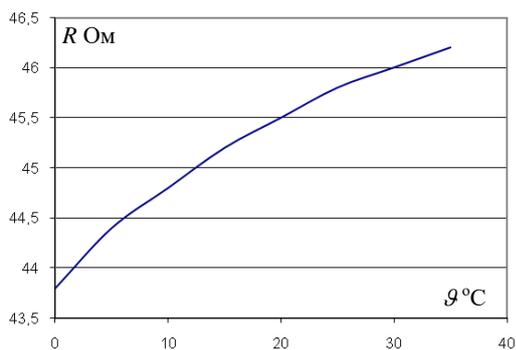


Рис. 3. Значение активного сопротивления катушки в функции температуры

Как видно из графика, в результате неточностей измерения, полученная зависимость имеет волнистый характер.

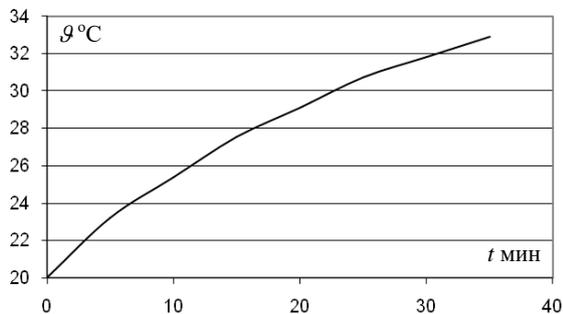


Рис. 4. Значение средней по объёму температуры катушки в функции времени

График температуры, как и график изменения сопротивления, имеет волнистый характер, что связано с неточностями измерения. На рис. 5 показан график производной от температуры.

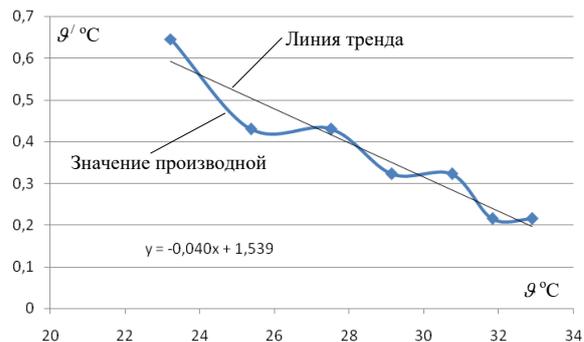


Рис. 5. Значение производной от температуры катушки в функции температуры

Как видно из рис. 5, ошибки измерения температуры приводят с существенному искажению теоретической зависимости  $\vartheta' = f(\vartheta)$ , по значению производной сложно определить вид аппроксимирующей функции.

На полученном участке лучшую аппроксимацию с точки зрения сглаживания данных (но **неправильную**) даёт и экспоненциальная и логарифмическая зависимость. Поэтому вид линии тренда надо знать заранее (3).

Функция линии тренда показана на графике рис. 5

$$y = -0,04 \cdot x + 1,539 = k \cdot \vartheta + b. \quad (5)$$

Сопоставляя (3) и (5) можно заметить

$$\tau = -\frac{1}{k} = 25 \text{ [min]}, \quad \vartheta_u = -\frac{b}{k} = 38,5 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Как видно из табл. 1, измерения были проведены за 35 мин, а время достижения температурой установившегося значения равно  $4,6 \cdot \tau = 115$  мин.

Полученные экспериментальные данные позволяют приближенно определить целый ряд важных параметров работы катушки в различных тепловых режимах.

**Определение допустимой тепловой мощности по допустимой температуре нагрева.** При известной установившейся температуре нагрева и постоянной времени уравнение нагрева выглядит, как показано в формуле (1). Если исследовать зависимость установившейся температуры от выделяемой тепловой мощности в небольшом диапазоне (мощность тепловых источников незначительно меняется с температурой) [4], то можно положить

$$\theta_m = m^2 \cdot \theta_u, \quad (7)$$

где  $\theta_m$  – установившееся превышение температуры при выделяемой тепловой мощности в  $m^2$  больше номинальной;  $m$  – кратность напряжения или тока источника;  $\theta_u$  – установившееся превышение температуры при номинальной тепловой мощности. В этом случае уравнение (1) примет вид

$$\vartheta_m = m^2 \cdot (\vartheta_u - \vartheta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \vartheta_0. \quad (8)$$

В том случае, если  $\vartheta_u$  больше или меньше допустимой температуры для изоляции [5], можно определить значение кратности  $m$  соответствующее этой допустимой температуре.

Пусть катушка включена на номинальное напряжение  $U=220$  [В], а постоянная времени  $\tau=25$  [мин]. Необходимо определить кратность (напряжения сети или тока) для следующих случаев 1)  $\vartheta_m > \vartheta_u$  и 2)  $\vartheta_m < \vartheta_u$ .

На рис. 6 показаны графики соответствующие этим случаям ( $\vartheta_m$  – допустимая температура изоляции).

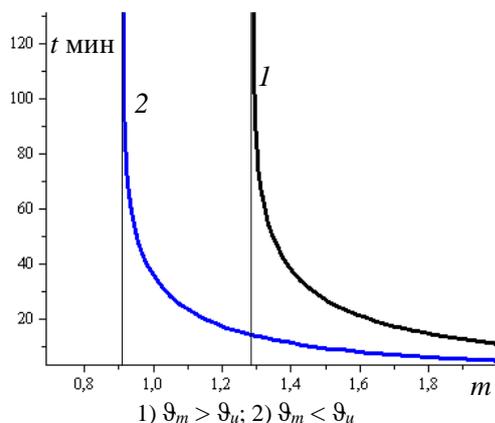


Рис. 6. Определение коэффициента кратности в длительном режиме работы

Очевидно, что в первом случае катушка недогружена и коэффициент кратности равен 1,29. Во втором случае – катушка перегрета и коэффициент кратности равен 0,9. По графикам можно ориентировочно определить за какое время произойдет нагрев до допустимой температуры при заданном коэффициенте кратности. Для исследуемой катушки нагрев до средней температуры  $80$  °С произойдет при кратности напряжения 1,8, что соответствует напряжению 396 В. Что практически совпадает с её номинальным напряжением – 380 В.

**Расчет теплового режима в кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы.** Уравнения (1), (8) определяют температуру нагрева аппарата в длительном режиме работы (время нахождения аппарата под нагрузкой таково, что его температура успевает достигнуть своего установившегося значения). В этом режиме

$$t_J > 4,6 \cdot \tau, \quad (9)$$

где  $t_J$  – время работы.

Если режим работы аппарата кратковременный

$$\begin{aligned} t_J &< 4,6 \cdot \tau; \\ t_p &\geq 4,6 \cdot \tau, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $t_p$  – время паузы.

Тогда коэффициент перегрузки по мощности будет [1, 4]

$$k = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_J}{\tau}}}. \quad (11)$$

Для повторно-кратковременного режима работы [1, 4]

$$\begin{aligned} t_J &< 4,6 \cdot \tau; \\ t_p &< 4,6 \cdot \tau. \end{aligned} \quad (12)$$

В этом случае

$$k = \frac{\frac{T}{1 - e^{-\frac{t_J}{\tau}}}}{1 - e^{-\frac{t_J}{\tau}}}, \quad (13)$$

где  $T = t_J + t_p$ ,  $T$  – длительность цикла.

Примеры значений коэффициентов перегрузки по мощности показаны на рис. 7.

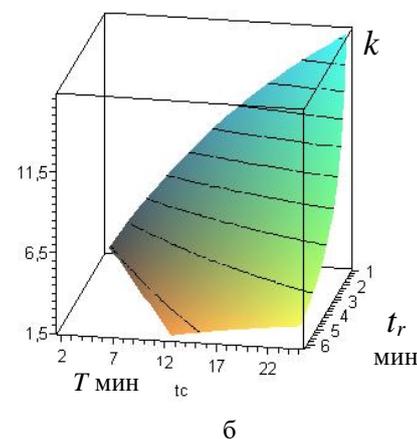
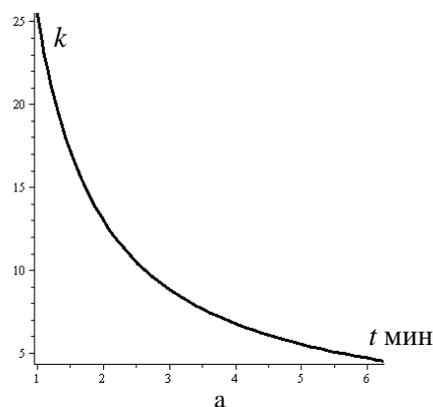


Рис. 7. Примеры значений коэффициентов перегрузки по мощности: а – кратковременный режим; б – повторно кратковременный режим

#### Выводы.

1. Получено простое доказательство вида функции  $\vartheta' = f(\vartheta)$ .

2. Показано, что неточности измерения температуры могут существенно исказить получаемые для определения постоянной времени нагрева и установившейся температуры зависимости и для правильной оценки параметров, необходимо вид аппроксимирующей функции производной температуры по времени знать априори – линейная функция.

3. На основании полученных и обработанных экспериментальных данных можно достаточно просто определить коэффициенты перегрузки по мощности в длительном режиме работы, а также в кратковременном и повторно-кратковременном режимах, что позволяет правильно эксплуатировать электрический аппарат.

4. Данный метод позволяет существенно сократить время испытаний электрических аппаратов на нагрев в продолжительном режиме работы.

## Список литературы

1. Клименко Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник (видання друге; допрацьоване та доповнене). – Харків: Вид-во «Точка», 2013. – 400 с.
2. ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. – 19 с.
3. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. – 58 с.
4. Таев И.С. Электрические аппараты цепей управления. – М.: Высшая школа, 1984. – 224 с.
5. ГОСТ Р МЭК 60085-2011. Электрическая изоляция. Классификация и обозначение по термическим свойствам. – 12 с.
6. Гарсия В. Измерение температуры: теория и практика. Доступен на <http://www.zimbeton.ru/info/3.pdf>. (Доступ 08.03.2021 г.).

## References (transliterated)

1. Klimenko B.V. Elektrichni aparati. Elektromekhanichna aparatura komutacii, keruvannya ta zakhistu. Zagal'nij kurs: navchal'nij posibnik (vidannya drugo; doprac'ovane ta dopovnene). – Kharkiv: Vid-vo «Tochka», 2013. – 400 p.
2. GOST 8024-90. Apparaty i ehlektrotekhnicheskie ustrojstva peremennogo toka na napryazhenie svyshe 1000 V. Normy nagreva pri prodolzhitel'nom rezhime raboty i metody ispytanij. – 19 s.
3. GOST 30323-95. Korotkie zamykaniya v ehlektroustanovkakh. Metody rascheta ehlektrodinamicheskogo i termicheskogo dejstviya toka korotkogo zamykaniya. – 58 p.
4. Taev I.S. Ehlektricheskie apparaty cepej upravleniya. – Moscow: Vysshaya shkola, 1984. – 224 p.
5. GOST R MIEK 60085-2011. Ehlektricheskaya izolyaciya. Klassifikaciya i oboznachenie po termicheskim svojstvam. – 12 p.
6. Garsiya V. Izmerenie temperatury: teoriya i praktika. Dostupen na <http://www.zimbeton.ru/info/3.pdf>. (Dostup 08.03.2021 g.).

Поступила (received) 12.04.2021

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

**Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Baida Evgen Ivanovich)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідуючий кафедрою електричних апаратів, м. Харків, e-mail: [baida.kpi@gmail.com](mailto:baida.kpi@gmail.com)

**Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepeliuk Oleksandr Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua)