

УПРОЩЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Инж. ЯКОВЛЕВ Г. В.

ПО «Витебскэнерго»

Работа практически всех элементов электрооборудования сопровождается выделением тепловой энергии. Наибольшее количество теплоты в процессе эксплуатации выделяют силовые трансформаторы и коммутационные элементы электрических аппаратов.

Представим упрощенно нагрев некоторого монолитного изотропного тела [1]. Пусть такое тело работает в системе двухпозиционного регулирования температуры (рис. 1).

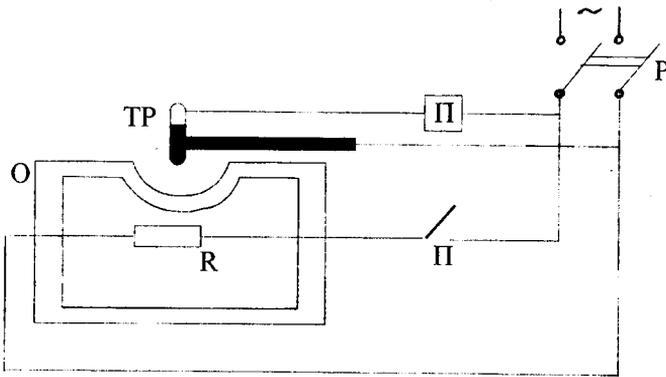


Рис. 1. О — объект регулирования; R — источник теплоты (нагреватель); П — магнитный пускатель (катушка и нормально замкнутый контакт); Р — рубильник; ТР — контактный ртутный термометр

При включении рубильника Р нагреватель R окажется подключенным к сети переменного тока, и начнется нагрев объекта О. Рост температуры θ объекта О можно представить в виде экспоненты, как это показано на рис. 2.

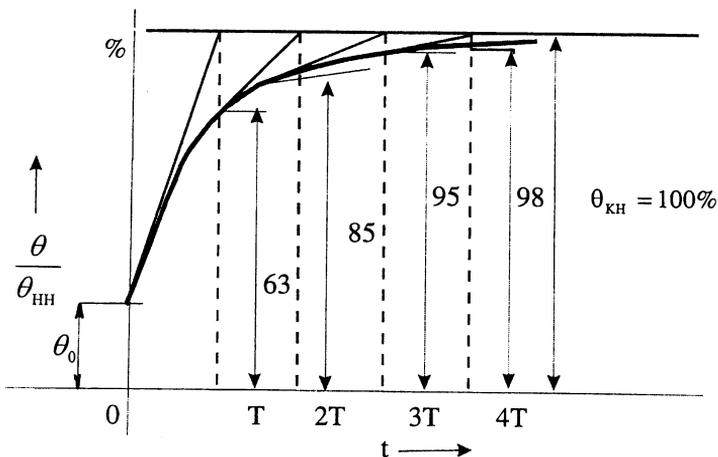


Рис. 2. К определению постоянной времени T

Процесс нагрева анизотропного тела описывается уравнением

$$Qdt = Gcd\theta + s\alpha\theta dt, \quad (1)$$

где Q — мощность объекта;
 G — масса объекта;
 c — весовая изобарная теплоемкость;
 t — время нагрева;
 s — поверхность нагреваемого объекта;
 α — коэффициент теплоотдачи;
 θ — температура.

При отключении объекта, когда будет достигнута его конечная температура $\theta_{\text{кн}}$ ($d\theta = 0$), выражение (1) примет вид

$$Qdt = s\theta\alpha dt$$

или

$$\theta_{\text{кн}} = Q / s\alpha.$$

После этого можно вычислить величину произведения

$$s\alpha = Q / \theta_{\text{кн}}.$$

Тогда

$$Q = s\alpha\theta_{\text{кн}}.$$

В итоге выражение (1) представим в виде

$$s\alpha(\theta_{\text{кн}} - \theta)dt = Gcd\theta,$$

откуда

$$- dt = \frac{Gc}{s\alpha} \cdot \frac{d(\theta_{\text{кн}} - \theta)}{\theta_{\text{кн}} - \theta}. \quad (2)$$

Обозначив величину $\frac{Gc}{s\alpha} = T$, выражение (2) перепишем в виде

$$- \frac{dt}{T} = d[\ln(\theta_{\text{кн}} - \theta)].$$

Для начала процесса нагрева объекта ($t = 0$) получим

$$- \frac{t}{T} = \ln(\theta_{\text{кн}} - \theta) - \ln(\theta_{\text{кн}} - \theta_0)$$

или

$$\theta = \theta_{\text{кн}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T}}. \quad (3)$$

При остывании объекта имеем

$$Gcd\theta + s\alpha\theta dt = 0.$$

Решение последнего уравнения получим в виде

$$\theta = \theta_{\text{кн}} e^{-\frac{t}{T}}.$$

При двухпозиционном регулировании температура колеблется от θ_{max} до θ_{min} , т. е. между верхним значением θ_{max} , на которое настроен ртутный термометр ТР, и нижним значением θ_{min} (рис. 3).

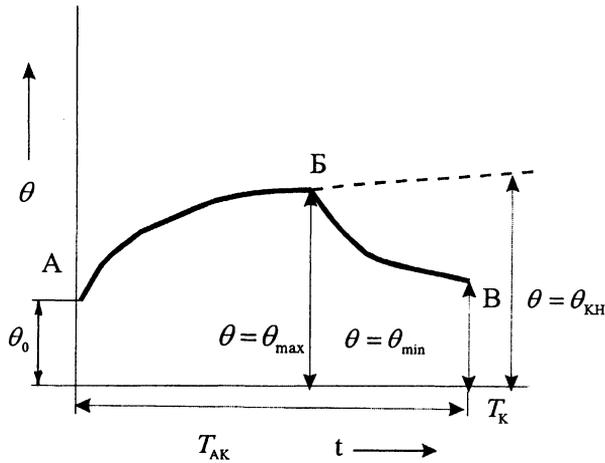


Рис. 3. График зависимости $\theta = f(t)$

В соответствии с (3) для нагрева имеем

$$\theta_{\text{max}} = \theta_{\text{кн}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{н}}}{T}}\right) + \theta_0 e^{-\frac{t_{\text{н}}}{T}}. \quad (4)$$

Из (4) находим время $t_{\text{н}}$, в течение которого происходит нагрев в интервале температур $\theta_0 \dots \theta_{\text{max}}$:

$$e^{-\frac{t_{\text{н}}}{T}} = \frac{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\text{max}}}{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\text{min}}};$$

$$t_{\text{н}} = -T \ln \frac{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\text{max}}}{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\text{min}}}.$$

Аналогично определяем время остывания объекта

$$t_0 = -T \ln \frac{\theta_{\min}}{\theta_{\max}}$$

Возникшие при этом температурные автоколебания совершаются в течение времени [2]

$$T_{\text{ак}} = T_{\text{к}} + T_0 = -T \ln \frac{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\min}}{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\max}} - T \ln \frac{\theta_{\min}}{\theta_{\max}}$$

или

$$T_{\text{ак}} = T \ln \frac{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\min}}{\theta_{\text{кн}} - \theta_{\max}} + T \ln \frac{\theta_{\min}}{\theta_{\max}}$$

Температура окончания нагрева $\theta_{\text{кн}}$ и постоянная времени могут быть определены методом касательных (рис. 4).

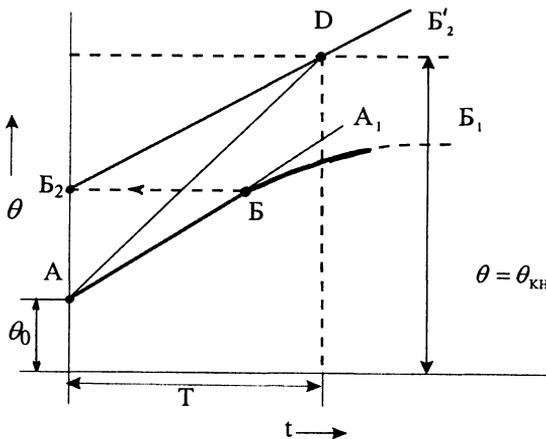


Рис. 4. К определению величины $\theta_{\text{кн}}$

При построении графиков на рис. 4 использовалась левая часть экспоненциальной кривой (рис. 2). С этой целью на кривой нагрева (рис. 4) выбирается произвольная точка Б, достаточно удаленная от точки А (начало нагрева θ_0). Из А проводится касательная АА₁, а из точки Б — касательная ББ₁. Затем точка Б проектируется на ось температур θ , и находится точка Б₂. И уже из Б₂ проводится линия (Б₂ — Б'₂), параллельная касательной в точке Б (А—Б₁). Определив точку D, находим $\theta_{\text{кн}}$ и T.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троттер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. — М.: Госэнергоиздат, 1961. — 256 с.
2. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. — М.: Энергия, 1972. — 376 с.

Представлена кафедрой электротехники и электроники БГПА

Поступила 11.11.1999