

узлах временной сетки из промежутка $[0, T]$.

В качестве таких узлов целесообразно брать нули первых из отбрасываемых членов в суммах.

Так, по расчетам ординат ИПХ по модели $M\tilde{k}_T(t)$ в виде суммы N -го порядка следует производить в узлах сетки

$$t_{2\nu-1} = \frac{(2\nu-1)T}{2N+1} \quad (\nu = \overline{1, N}),$$

являющимися нулями $\text{Cos}(2N+1)\frac{\pi}{2T}t$

– первого из отброшенных членов в сумме. А расчеты ПХ по модели (22) – в узлах сетки

$$t_\nu = \frac{2\nu T}{2N+1} \quad (\nu = \overline{1, N}),$$

т. к. это нули функции $\text{Sin}(2N+1)\frac{\pi}{2T}t$ – первого из отброшенных членов в сумме N -го порядка ряда (22).

Построенная по отсчетам ВЧХ на этой оптимальной сетке модель $M\tilde{k}_T(t)$ действительно обладает высоким уровнем устойчивости к погрешностям, что подтверждается многочисленными расчетами. Модели имеют простую аналитическую структуру и эффективны не только в смысле адекватности, но и в смысле компьютерной реализации, и могут быть

использованы для решения разнообразных задач прикладной теории линейных динамических систем. В частности, для расчета переходных процессов в аналогичных сетках.

Литература

1. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. В 3 ч. М.: Энергия, 1965. Ч. I.
2. Осипов В.В. Один подход к определению степени устойчивости линейных стационарных САР// Информатика и системы управления: Межвузовский аспирантский и докторантский сборник научных трудов /Отв. ред. А.И.Рубан, Б.П. Соустин; КГТУ. Красноярск, 1996. С.162 – 167.
3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
4. Ильин В. А., Поздняк Э. Г. О вычислении значений функции по приближенно заданным коэффициентам Фурье: прил. к кн. «Основы математического анализа». М.: Наука, 1973. Ч. 2.
5. Осипов В. М., Осипов В. В. Моделирование линейных динамических систем методом точечных представлений. М.: МАКС Пресс, 2005. 296 с.

УДК 621.865.8

В.В. Лузгин, В.В. Панасов*

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Предлагаются алгоритмы диагностики электротепловых промышленных объектов, разработанные в результате исследований динамики двухпозиционного регулирования их температуры при включении и отключении электронагревателя. Предложенные алгоритмы дают возможность определить структурные параметры электротепловых промышленных объектов, что позволяет диагностировать их состояние с использованием компьютерных технологий и регламента конкретных контрольных испытаний по локализации неисправностей электротепловых промышленных объектов.

* - автор, с которым следует вести переписку.

Ключевые слова: алгоритмы диагностики, электротепловой промышленный объект, математические модели, идентификация, передаточная функция, переходная характеристика, двухпозиционное регулирование.

Определение технического состояния электротепловых промышленных объектов (ЭТПО) в режимах нормального функционирования – одна из актуальных проблем. Первостепенную важность эта проблема приобретает в условиях все возрастающего дефицита и стоимости энергоносителей. Однако за исключением ряда работ, посвященных исследованию динамики ЭТПО, исследованию их как объектов диагностики не уделяется должного внимания, соответствующего важности этой проблемы.

В связи с этим обстоятельством необходимо в первую очередь обратить внимание на особенности исследования ЭТПО как объектов диагностики.

Кратко отметим эти особенности:

– при идентификации динамических процессов повышение точности математических моделей ограничивается необходимостью физической интерпретации найденных коэффициентов дифференциальных уравнений;

– если математическая модель принимается линейной, то необходимо исследовать эту модель на линейность во всем диапазоне изменения возмущающих воздействий, которые возможны в процессе эксплуатации ЭТПО;

– математическая модель (например, система дифференциальных уравнений) должна содержать такую группу коэффициентов, чтобы система нелинейных алгебраических уравнений, выражающая зависимости этих коэффициентов от структурных параметров, имела решение, а точность определения структурных параметров была достаточной для принятия решения о состоянии ЭТПО;

– в процессе реализации таких алгоритмов необходимо выполнять инверсные преобразования дифференциальных уравнений, когда операции интегрирования заменяются операциями дифференцирования, т. е. осуществляется много-

кратное численное дифференцирование переходных характеристик. Однако задачи дифференцирования экспериментальных переходных характеристик относятся к числу некорректно поставленных задач. Поэтому при формировании алгоритмов диагностики возникает необходимость в разработке и экспериментальном исследовании методов регуляризации и сглаживания переходных характеристик ЭТПО.

О линейности объектов можно судить по виду статической характеристики и переходных характеристик, в зависимости от входных воздействий. Объект считается линейным, если его статическая характеристика линейная и параметры качества переходных характеристик не изменяются при изменении входных воздействий в заданном диапазоне.

В нашем случае объектом является ЭТПО. Текущее значение температуры ЭТПО регистрировалось автоматическим электронным мостом КСМ-4. Желаемая мощность нагрева устанавливалась рукояткой ЛАТРа и контролировалась цифровыми вольтметром и амперметром.

Очевидно, что динамика температуры ЭТПО зависит от многих факторов. Если в качестве варьируемого фактора принять напряжение $U(t)$, то экспериментально можно определить временные характеристики температуры нагревательного элемента $\theta_{нэ}(t)$ при скачкообразном изменении $U(t)$ и передаточную функцию

$$W(p) = \frac{\theta_{нэ}(t)}{U(t)}.$$

Анализ экспериментальных характеристик $\theta_{нэ}(t)$ при разных значениях $U(t)$ позволил получить информацию о структуре передаточной функции $W(p)$ и значениях ее коэффициентов, а также о допустимости линеаризации исходного дифференциального уравнения, опреде-

ляющего динамику рассматриваемого объекта диагностики.

Для проверки вышеизложенного предположения были проведены экспериментальные исследования, сущность которых заключается в следующем.

Регистрация $\theta_{нэ}(t)$ проводилась при различных входных воздействиях:

$$U(t) = 60 \text{ В}; 70 \text{ В}; 80 \text{ В}; 90 \text{ В}.$$

Аппроксимацию переходных характеристик апериодическим звеном 2-го порядка можно произвести, например, методом интегральных площадей. Чтобы воспользоваться этим методом, необходимо выбрать на графике $h(t)$ шаг по времени Δt (25-30 шагов по всей кривой) и определить по графику соответствующие каждому шагу значения $h(t_i)$. Масштаб чисел $h(t_i)$ и шаг Δt служат входными данными программы, по которой ЭВМ вычисляет значения коэффициентов передаточной функции методом интегральных площадей.

В результате вычислений параметров для различных возмущающих воздействий получены следующие постоянные времени:

$$U(t) = 90 \text{ В}, T_1 = 8.2 \text{ мин},$$

$$T_2^2 = 16.9 \text{ мин}^2;$$

$$U(t) = 80 \text{ В}, T_1 = 8.8 \text{ мин},$$

$$T_2^2 = 20.8 \text{ мин}^2;$$

$$U(t) = 70 \text{ В}, T_1 = 9.1 \text{ мин},$$

$$T_2^2 = 21.3 \text{ мин}^2;$$

$$U(t) = 60 \text{ В}, T_1 = 9.8 \text{ мин},$$

$$T_2^2 = 24.7 \text{ мин}^2.$$

На основании этих экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что с увеличением величины входного воздействия $U(t)$ происходит уменьшение коэффициентов передаточной функции. По этим данным можно поставить предварительный диагноз о состоянии объекта в динамическом режиме.

Для определения линейности данного объекта в статическом режиме нужно экспериментально снять зависимость вы-

ходного сигнала от входного в установившемся режиме, т. е. статическую характеристику $\theta_{нэ}(t) = f(U(t))$, рис. 1.

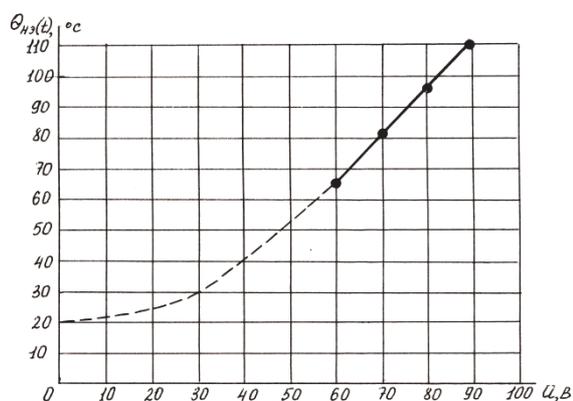


Рис. 1. Статическая характеристика ЭТПО.

Наблюдаемое изменение параметров качества переходного процесса в зависимости от величины $U(t)$ указывает на то, что рассматриваемый объект, в строгом смысле, ведет себя как нелинейный в динамическом режиме при изменении входного сигнала в диапазоне $60 \div 90 \text{ В}$.

При анализе поведения объекта в статическом режиме, т. е. по статической характеристике, можно говорить о линейности объекта, но только для заданного диапазона изменения входного сигнала $60 \div 90 \text{ В}$, т. е. линеаризация объекта в этом диапазоне изменения входного сигнала допустима.

Строго говоря, реальные объекты не являются линейными, однако рассматриваемые ЭТПО при определенных ограничениях на величины скачкообразных входных воздействий (включение или отключение потока тепла) можно с достаточной для инженерной практики точностью считать линейными объектами.

На рис. 2 представлены экспериментальная и расчетная переходные характеристики ЭТПО. Так как параметры переходного процесса линейного объекта не зависят от начальных условий, то значение температуры выразим в относительных единицах.

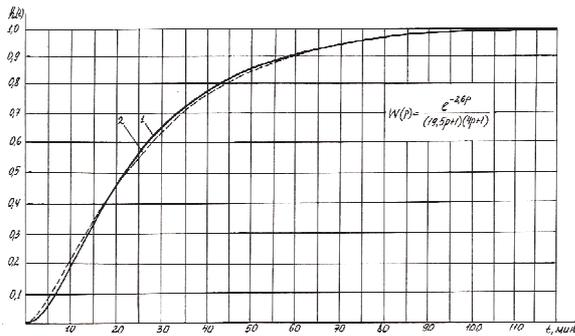


Рис. 2. Переходные характеристики ЭТПО: 1 – экспериментальная; 2 – расчетная.

При аппроксимации динамики ЭТПО передаточными функциями более высоких порядков могут быть получены переходные характеристики, сколь угодно близкие к экспериментальным. Однако в этом случае существенно затрудняется или становится практически невозможной физическая интерпретация коэффициентов таких структур передаточных функций. Полученные при этом абстрактные передаточные функции не могут быть использованы для решения поставленных задач диагностики технических объектов вообще и ЭТПО в частности.

Рассмотрим упрощенный алгоритм диагностики ЭТПО.

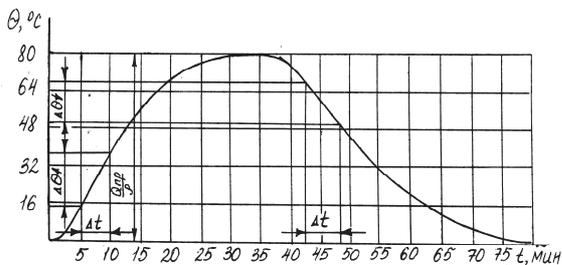


Рис. 3. Кривые нагрева и охлаждения ЭТПО.

Динамика ЭТПО (рис. 3) в первом приближении при включении притока тепла может быть описана уравнением:

$$C \frac{\Delta\theta_{\uparrow}}{\Delta t} = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{от}},$$

где C – усредненная суммарная теплоемкость объекта; $\frac{\Delta\theta_{\uparrow}}{\Delta t}$ – средняя скорость повышения температуры ЭТПО при включении притока тепла; $Q_{\text{пр}}$ – те-

пловой приток; $Q_{\text{от}}$ – тепловой отток.

При отключении притока тепла уравнение ЭТПО примет вид:

$$C \frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t} = -Q_{\text{от}},$$

где $\frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t}$ – средняя скорость понижения температуры ЭТПО при отключении притока тепла.

Решая систему уравнений при расчетном значении $Q_{\text{пр}}$:

$$\left. \begin{aligned} C \frac{\Delta\theta_{\uparrow}}{\Delta t} &= Q_{\text{пр}} - Q_{\text{от}}, \\ C \frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t} &= -Q_{\text{от}} \end{aligned} \right\}$$

найдем усредненную теплоемкость и отток тепла:

$$C = \frac{Q_{\text{пр}}}{\frac{\Delta\theta_{\uparrow}}{\Delta t} - \frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t}}, \quad Q_{\text{от}} = C \frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t}.$$

При известном значении $\theta_{\text{уст}}$ определим коэффициент самовыравнивания:

$$\rho = \frac{Q_{\text{пр}}}{\theta_{\text{уст}}}.$$

Предложенный метод позволяет оперативно определить диагностические параметры ЭТПО C и ρ . Усредненная теплоемкость C зависит от массы ЭТПО, теплофизических свойств, термодинамического состояния и вида того процесса, в котором объекту передается энергия в форме теплоты. При адиабатическом процессе, когда $\Delta Q = 0$, теплоемкость равна нулю, а при изотермическом ($\Delta\theta = 0$) понятие теплоемкости не имеет смысла ($C \rightarrow \infty$).

Параметры C и ρ можно считать обобщенными параметрами состояния ЭТПО, так как их отклонение за пределы допустимых значений указывает на неисправность ЭТПО. Например, C и ρ в процессе эксплуатации ЭТПО уменьшаются до такой величины, что расчетной мощности может оказаться недостаточно для нагрева ЭТПО до заданной темпера-

туры. Во время эксплуатации, в частности, может ухудшиться или уменьшиться теплоизоляция, увеличиться сопротивление электронагревателя.

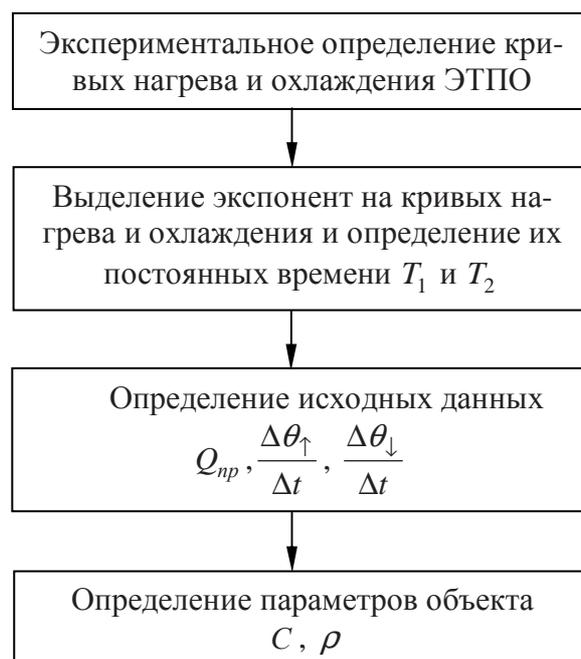
При установлении состояния ЭТПО на основании найденных значений C и ρ по закону «исправен-неисправен» принимается соответствующее решение. Если ЭТПО неисправен, то при отклонении ρ от допустимых значений наиболее вероятно неисправность электронагревательного элемента, причем, если ρ больше допустимого значения, то возможно наличие коротких замыканий; если ρ меньше допустимого значения, то увеличено сопротивление нагревательного элемента. Отклонение C от допустимых значений указывает на повреждение теплоизоляции или изменение ее теплотехнических характеристик.

После постановки предварительного диагноза по найденным значениям C и ρ принимается решение об алгоритме контрольных испытаний ЭТПО.

Например, если объектом диагностики является электропечь периодического действия (ЭППД) и на основании предварительного диагноза установлено отклонение от допустимых значений C и ρ , то алгоритм контрольных испытаний ЭППД может быть сформирован с учетом значений C и ρ .

Если требуется более точная оценка диагностических параметров ЭТПО, следует в данном случае использовать кусочно-экспоненциальную аппроксимацию.

Методика определения параметров C и ρ при кусочно-экспоненциальной аппроксимации представлена в виде блок-схемы.



При кусочно-экспоненциальной аппроксимации объект будет описываться системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_1 \frac{C}{T_1} e^{-\frac{t_1}{T_1}} &= Q_{\text{пр}} - Q_{\text{от}}, \\ \Delta\theta_2 \frac{C}{T_2} e^{-\frac{t_2}{T_2}} &= -Q_{\text{от}}. \end{aligned} \right\}$$

Решая данную систему, получим выражения для определения C :

$$C = \frac{Q_{\text{пр}}}{\frac{\Delta\theta_1}{T_1} e^{-\frac{t_1}{T_1}} - \frac{\Delta\theta_2}{T_2} e^{-\frac{t_2}{T_2}}}.$$

В свою очередь

$$\rho = \frac{Q_{\text{пр}}}{\theta_{\text{уст}}}$$

Для более углубленной диагностики передаточную функцию электронагревателя можно получить на основе уравнения теплового баланса и известных допущений.

При составлении уравнения переходного процесса электронагревателя принимаем за его выходную величину изменение температуры θ_b , а за входные величины изменение тока I , протекающего через спираль, расхода воздуха G_b и его

температуры θ'_b .

Кроме того, принимаем следующие допущения: электронагреватель обладает сосредоточенными параметрами, т. е. во всех точках объема нагревателя θ_b и металлической трубки $\theta_{тр}$ температура одинакова; тепловая емкость спирали электронагревателя пренебрежимо мала; коэффициент теплообмена α между воздухом и поверхностью металлической трубки, а также удельные теплоемкости воздуха C_b и материала трубки $C_{тр}$ постоянны во времени.

При этих допущениях составим уравнение теплового баланса для металлической трубки электронагревателя за бесконечно малый промежуток времени dt : $W_{тр}C_{тр}d\theta_{тр} + \alpha F(\theta_{тр} - \theta_b)dt = dQ$, (1) где $W_{тр}$ – масса металлической трубки; F – площадь наружной поверхности металлической трубки; Q – количество тепла, выделяемого спиралью при пропускании через нее переменного электрического тока.

По уравнению (1) часть тепла, выделяемого спиралью, расходуется на изменение температуры металлической трубки, а остальное тепло передается воздуху путем конвективного теплообмена.

Количество тепла, которое выделяет при активной нагрузке переменный ток с эффективным напряжением U , B и величиной I , A за бесконечно малый промежуток времени dt , определяется из равенства

$$dQ = 0,24 \cdot 10^{-3} UI dt = c UI dt. \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) получаем:

$$W_{тр}C_{тр} \frac{d\theta_{тр}}{dt} + \alpha F \theta_{тр} = c UI + \alpha F \theta_b. \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса для подогреваемого воздуха имеет вид:

$$\begin{aligned} W_b C_b d\theta_b + G_b C_b \theta_b dt = \\ = G_b C_b \theta'_b dt + \alpha F (\theta_{тр} - \theta_b) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где W_b – масса воздуха, находящегося в электронагревателе.

Разделим все члены уравнения (4) на

dt и перепишем его в следующем виде:

$$\begin{aligned} W_b C_b \frac{d\theta_b}{dt} + (G_b C_b + \alpha F) \theta_b = \\ = G_b C_b \theta'_b + \alpha F \theta_{тр}. \end{aligned} \quad (5)$$

Заменяя в уравнениях (2) и (4) переменные величины их конечными приращениями (отнесенными к произвольно выбранному базисным значениям переменных $\theta_{b,0}, \theta_{тр,0}, I_0, G_{b,0}, \theta'_{b,0}$), получим

$$\begin{aligned} W_b C_b \theta_{b,0} \frac{d\phi}{dt} + (G_{b,0} C_b + \alpha F) \theta_{b,0} \phi = \\ = -G_{b,0} C_b (\theta_{b,0} - \theta'_{b,0}) \mu + \\ + G_{b,0} C_b \theta'_{b,0} \phi'_{тр} + \alpha F \theta_{тр,0} \phi_{тр}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} W_{тр} C_{тр} \theta_{тр,0} \frac{d\phi_{тр}}{dt} + \alpha F \theta_{тр,0} \phi_{тр} \\ = c UI_0 \nu + \alpha F \theta_{b,0} \phi, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\phi = \frac{\Delta \theta_b}{\theta_{b,0}}; \mu = \frac{\Delta G_b}{G_{b,0}}; \phi' = \frac{\Delta \theta'_b}{\theta'_{b,0}};$$

$$\phi_{тр} = \frac{\Delta \theta_{тр}}{\theta_{тр,0}}; \nu = \frac{\Delta I}{I_0}.$$

Чтобы исключить из уравнений (6) и (7) переменную $\phi_{тр}$, продифференцируем первое из них по времени:

$$\begin{aligned} W_b C_b \theta_{b,0} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + (G_{b,0} C_b + \alpha F) \theta_{b,0} \frac{d\phi}{dt} = \\ = -G_{b,0} C_b (\theta_{b,0} - \theta'_{b,0}) \frac{d\mu}{dt} + \\ + G_{b,0} C_b \theta'_{b,0} \frac{d\phi'}{dt} + \alpha F \theta_{тр,0} \frac{d\phi_{тр}}{dt}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя значения $\frac{d\phi_{тр}}{dt}$ из уравнения (8) и $\phi_{тр}$ из уравнения (6) в равенство (7), получим искомое уравнение переходного процесса подогревателя воздуха:

$$\begin{aligned} & \frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}} W_{\text{в}}}{\alpha F G_{\text{в},0}} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \\ & + \left(\frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}{\alpha F} + \frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}{G_{\text{в},0} C_{\text{в}}} + \frac{W_{\text{в}}}{G_{\text{в},0}} \right) \frac{d\phi}{dt} + \phi = \\ & = \frac{c U I_0}{\theta_{\text{в},0} G_{\text{в}} C_{\text{в}}} v - \\ & - \frac{\theta_{\text{в},0} - \theta'_{\text{в},0}}{\theta_{\text{в},0}} \left(\frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}{\alpha F} \cdot \frac{d\mu}{dt} + \mu \right) + \\ & + \frac{\theta'_{\text{в},0}}{\theta_{\text{в},0}} \left(\frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}{\alpha F} \cdot \frac{d\phi'}{dt} + \phi' \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (9) представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Постоянные коэффициенты в этом уравнении перед относительными переменными величинами и их производными (кроме переменной μ) положительны. Естественно, что увеличение I и $\theta'_{\text{в}}$ вызывает повышение $\theta_{\text{в}}$, а увеличение $G_{\text{в}}$ – ее понижение. При этом $\theta_{\text{в}}$ перестает изменяться во времени лишь через некоторый промежуток времени после прекращения изменения входных величин. Таким образом, рассматриваемый тепловой объект обладает емкостью и положительным самовыравниванием.

При постоянстве значений $G_{\text{в}}$ и $\theta'_{\text{в}}$ изменение температуры воздуха на выходе обогревателя вызывается лишь изменением тока I , протекающего через спираль. В этом случае, принимая во внимание

$$c U I_0 = G_{\text{в},0} C_{\text{в}} (\theta_{\text{в},0} - \theta'_{\text{в},0})$$

и учитывая, что коэффициент при второй производной ϕ имеет размерность c^2 , при первой – c , а при v он безразмерный, получим уравнение переходного процесса для подогревателя воздуха:

$$T_2^2 \frac{d\phi^2}{dt^2} + T_1 \frac{d\phi}{dt} + \phi = k_v, \quad (10)$$

где

$$T_2^2 = \frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}} W_{\text{в}}}{\alpha F G_{\text{в},0}}; \quad k_v = \frac{\theta_{\text{в},0} - \theta'_{\text{в},0}}{\theta_{\text{в},0}};$$

$$T_1 = \frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}{\alpha F} + \frac{W_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}{G_{\text{в},0} C_{\text{в}}} + \frac{W_{\text{в}}}{G_{\text{в},0}}.$$

При делении уравнения (10) на k_v получим

$$T_2^2 \frac{d\phi^2}{dt^2} + T_1 \frac{d\phi}{dt} + \phi = 1.$$

При аппроксимации переходной характеристики электронагревателя нормированной передаточной функцией апериодического звена второго порядка без учета запаздывания

$$W(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$$

были найдены постоянные времена T_1 и T_2^2 , которые можно считать обобщенными диагностическими параметрами.

Определение состояния технических систем в режиме их нормального функционирования является наиболее важной научно-прикладной проблемой технической диагностики.

Рассмотрим решение данной проблемы на примере формирования алгоритма диагностики системы двухпозиционного регулирования электронагревателя (СДРЭ).

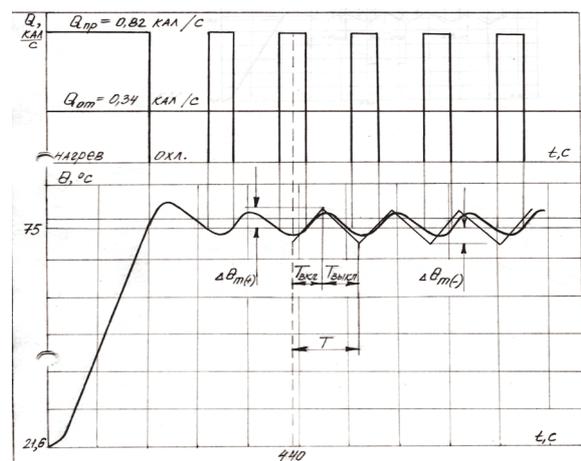


Рис. 3. Экспериментальная циклограмма СДРЭ.

Исходные данные, при которых снята экспериментальная циклограмма СДРЭ

(рис. 3):

– напряжение питания электронагревателя

$$U_n = 44 \text{ В};$$

– ток в спирали электронагревателя

$$J_n = 57.5 \text{ мА};$$

– время запаздывания

$$\Delta t_z = 30 \text{ с};$$

– заданная температура

$$2\Delta\theta_z = 75 \text{ }^\circ\text{C};$$

– диапазон нечувствительности

$$2\Delta\theta_0 = 0.3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По циклограмме требуется определить: приток тепла $Q_{\text{пр}}$; коэффициент самовыравнивания ρ ; среднюю скорость повышения температуры электронагревателя при включении притока тепла, $\frac{\Delta\theta_{\uparrow}}{\Delta t}$; среднюю скорость понижения температуры электронагревателя при выключении притока тепла, $\frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t}$; тепловую емкость C ; теплотери объекта, $Q_{\text{от}}$; кратность притока n ; амплитуды положительных $\Delta\theta_{m(+)}$ и отрицательных $\Delta\theta_{m(-)}$ отклонений температуры; время включения $T_{\text{вкл}}$ и выключения $T_{\text{выкл}}$; суммарный период колебаний T ; смещение среднего значения регулируемой величины $\Delta\theta_{\text{см}}$.

Формирование алгоритма диагностики ЭТПО может быть представлено решением данной задачи.

Приток тепла:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пр}} &= 0.24P = 0.24U_n J_n = \\ &= 0.24 \cdot 44 \cdot 57.5 \cdot 10^{-3} = 0.607 \frac{\text{кал}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Коэффициент самовыравнивания ρ :

$$\begin{aligned} \frac{Q_{\text{пр}}}{\rho} &= 102 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \rho &= \frac{Q_{\text{пр}}}{102} = \frac{0.607}{102} = 5.95 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Средняя скорость повышения темпе-

ратуры электронагревателя при включении притока тепла:

$$\frac{\Delta\theta_{\uparrow}}{\Delta t} = \frac{4.05}{42} = 0.096 \frac{^\circ\text{C}}{\text{с}}.$$

Средняя скорость понижения температуры электронагревателя при выключении притока тепла:

$$\frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t} = \frac{4.05}{36} = 0.1125 \frac{^\circ\text{C}}{\text{с}}.$$

Тепловая емкость:

$$\begin{aligned} C &= \frac{Q_{\text{пр}}}{\frac{\Delta\theta_{\uparrow}}{\Delta t} - \frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t}} = \\ &= \frac{0.607}{0.096 + 0.1125} = 2.91 \frac{\text{кал}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Тепловая емкость (по кривой разгона):

$$\theta = \theta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{\rho}{C} \Delta t} \right), \text{ где } \frac{1}{T} = \frac{\rho}{C}.$$

В момент времени $\Delta t = T$:

$$\theta = \theta_{\text{уст}} (1 - e^{-1}) = 0.63\theta_{\text{уст}};$$

$$\theta_{\text{уст}} = 102 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta = 102 \cdot 0.63 = 64.26 \text{ }^\circ\text{C}; T = 324 \text{ с};$$

$$C = \rho T = 5.95 \cdot 324 \cdot 10^{-3} = 1.927 \frac{\text{кал}}{\text{град}}.$$

Теплотери объекта:

$$Q_{\text{от}} = C \frac{\Delta\theta_{\downarrow}}{\Delta t} = 2.91 \cdot 0.1125 = 0.327 \frac{\text{кал}}{\text{с}}.$$

Кратность притока:

$$n = \frac{Q_{\text{пр}}}{Q_{\text{от}}} = \frac{0.607}{0.327} = 1.86.$$

Следовательно, процесс несимметричен, причем амплитуда положительных отклонений температуры больше отрицательных.

Амплитуда положительных отклонений

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{m(+)} &= \Delta\theta_0 + (\theta_{\text{уст}} - \theta_{n(0)} - \\ &- \Delta\theta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\rho}{C} \Delta t} \right) = 2.69 \text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

где $\theta_{n(0)} = \theta_z - \theta_0 = 75 - 19.2 = 55.7 \text{ }^\circ\text{C}$ – номинальное значение регулируемой температуры.

Амплитуда отрицательных отклонений

$$\Delta\theta_{m(-)} = -\Delta\theta_0 - (\theta_{н(0)} - \Delta\theta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\rho}{C}\Delta t}\right) =$$

$$= -0.15 - (55.7 - 0.15) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right) = -3.39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Суммарная амплитуда отклонений температуры

$$\Delta\theta_m = 2\Delta\theta_0 \cdot (\theta_{уст} - 2\Delta\theta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\rho}{C}\Delta t}\right) =$$

$$= 0.3 \cdot (102 - 0.3) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\rho}{C}\Delta t}\right) = 6.23 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Время включения

$$T_{\text{вкл}} = \frac{C \cdot \lg\left(1 - \frac{\Delta\theta_{m(-)} + \Delta\theta_{m(+)}}{\theta_{уст} - \theta_{н(0)} - \Delta\theta_{m(-)}}\right)}{0.434Q_{np}} =$$

$$= \frac{2.91 \cdot \lg\left(1 - \frac{3.39 + 2.69}{102 - 55.7 - 3.39}\right)}{0.434 \cdot 5.95 \cdot 10^{-3}} = 63.27 \text{ с.}$$

Время выключения

$$T_{\text{выкл}} = \frac{C \cdot \lg\left(\frac{\theta_{н(0)} + \theta_{m(+)}}{\theta_{н(0)} + \theta_{m(-)}}\right)}{0.434Q_{np}} =$$

$$= \frac{2.91 \cdot \lg\left(\frac{55.7 + 2.69}{55.7 + 3.39}\right)}{0.434 \cdot 5.95 \cdot 10^{-3}} = 55.37 \text{ с.}$$

Суммарный период колебаний

$$T = T_{\text{вкл}} + T_{\text{выкл}} = 63.27 + 55.37 = 118.64 \text{ с.}$$

Смещение среднего значения регулируемой величины

$$\Delta\theta_{см} = \left(\frac{Q_{np}}{\rho} - \theta_{н(0)} + |\Delta\theta_{m(-)}|\right) \times$$

$$\times \left(1 - e^{-\frac{\rho}{C}\Delta t}\right) = 2.95 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Формируемые алгоритмы диагностики ЭТПО по переходным характеристикам позволяют наиболее полно определять их индивидуальные состояния.

Посредством таких алгоритмов диагностики ЭТПО можно более оперативно и точно определить их структурные параметры, чем производить их расчет по известным методикам, когда на результат расчета существенным образом влияют принятые при расчете различного рода допущения, а отсутствие необходимых справочных данных делает такой расчет невозможным.

Определение структурных параметров ЭТПО по переходным характеристикам позволит сформировать более корректный и экономичный регламент контрольных испытаний по локализации конкретных неисправностей ЭТПО.

Для повышения глубины и достоверности формируемого диагноза может быть использовано программное обеспечение [1, 2], разработанное с участием авторов.

Литература

1. Программа по вторичной идентификации (VtorId v1.00) : программа для ЭВМ / Патрусова А. М., Колтыгин Д. С., Лузгин В. В. Св. ГР № 2003612203 ; зарег. в реестре программ 26.09.2003.

2. Программа по вторичной идентификации (Time-DelayId v.1.00) : программа для ЭВМ / Панасов В.В., Колтыгин Д.С., Лузгин В.В. Св. ГР № 2003612203; зарег. в реестре программ 21.01.2008.