

Н.М. Трипутень, В.В. Кузнецов, М.Е. Безденежных, И.В. Руденко
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ**

Аннотация. В статье представлен лабораторный стенд для исследования оптимальной и квазиоптимальной по быстродействию системы автоматического управления. Лабораторный стенд состоит из теплового объекта и программно-технического комплекса, включающего логический контроллер VIPA System 200 V и HMI/SCADA систему Zenon Supervisor 7.0. Тепловой объект описывается дифференциальным уравнением второго порядка по каналу управления "величина тока в преобразователе мощности электронагревателя – температура воздуха внутри теплового объекта". Коэффициенты дифференциального уравнения зависят от положения заслонки и частоты вращения центробежного вентилятора.

Приведена методика синтеза и результаты расчёта оптимального по быстродействию релейного закона управления тепловым объектом по выбранному каналу. Показаны результаты эксперимента по переводу теплового объекта из различных начальных состояний в конечные состояния. Показана возможность реализации оптимального по быстродействию управления в реальном масштабе времени путём совершенствования программного обеспечения включением в него алгоритмов решения трансцендентной системы уравнений либо формированием предикатной модели теплового объекта.

Указаны условия применения квазиоптимального по быстродействию релейного закона управления. Приведена методика синтеза и результаты расчёта длительности первого интервала управления в зависимости от заданной величины перерегулирования. Показаны результаты моделирования квазиоптимальной по быстродействию САУ в приложении Simulink пакета прикладных программ (ППП) Matlab. Установлена функциональная зависимость длительности первого интервала управления от величины перерегулирования для реализации квазиоптимальной САУ в реальном масштабе времени с использованием базовых решающих блоков программируемого логического контроллера.

Ключевые слова: лабораторный стенд, тепловой объект, аппаратно-программный комплекс, программируемый логический контроллер, квазиоптимальное управление.

Постановка проблемы и цель исследования. Подготовка квалифицированных кадров, которые владеют современными знаниями и практическими

навыками синтеза и анализа систем автоматического управления (САУ) технологическими процессами требует наличия в учебных аудиториях реальных объектов управления или их физических моделей, новейших программно-аппаратных управляющих устройств. Наличие в учебном процессе физических моделей САУ позволит глубже и качественнее изучать положения теории автоматического управления и, в частности, вопросов, касающихся разработки систем оптимального и квазиоптимального управления.

Анализ лабораторной базы Украины показал, что практически единственным шансом обновить лабораторное оборудование для подготовки специалистов по вопросам контроля и управления технологическими объектами, является применение технической продукции известных мировых фирм таких как: Siemens, ABB, Moeller, Shneiderelectric[1]. Использование в лабораторных практикумах современных устройств позволяет подготавливать конкурентно-способных на рынках труда будущих инженеров в области автоматизации. Однако созданные таким образом лаборатории имеют недостатки – низкую адаптацию к учебному процессу и отсутствие методического сопровождения.

Повышение эффективности использования лабораторного оборудования в учебном процессе за счет адаптации его к решению задач синтеза оптимальных и квазиоптимальных САУ [2]. Целью настоящей работы является разработка оптимальной и квазиоптимальной по быстродействию САУ тепловым объектом (лабораторный стенд) для решения учебных задач.

Материал и результаты исследований. На кафедре автоматизации и компьютерных систем Национального технического университета «Днепропетровская политехника» внедрён в учебный процесс лабораторный стенд, представляющий собой аппаратно-программный комплекс (рис.1) и включающий в себя тепловой объект управления, аппаратное и программное обеспечение системы автоматического управления.

Тепловой объект состоит из продуваемой ёмкости в виде прямоугольного параллелепипеда, центробежного вентилятора, всасывающей трубы, электрического нагревателя, заслонки и термодпары. Центробежный вентилятор и всасывающая труба расположены на противоположных сторонах ёмкости. Между ними находятся электрический нагреватель, заслонка и термосопротивление.

Центробежный вентилятор обеспечивает непрерывную подачу холодного воздуха из окружающей среды внутрь теплового объекта. В зависимости от положения заслонки, частоты вращения двигателя всасывающего вентилятора и электрической мощности, подводимой к нагревательному элементу, воздух на-

гревается до некоторой температуры [3]. Изменение температуры воздуха контролируется термосопротивлением.

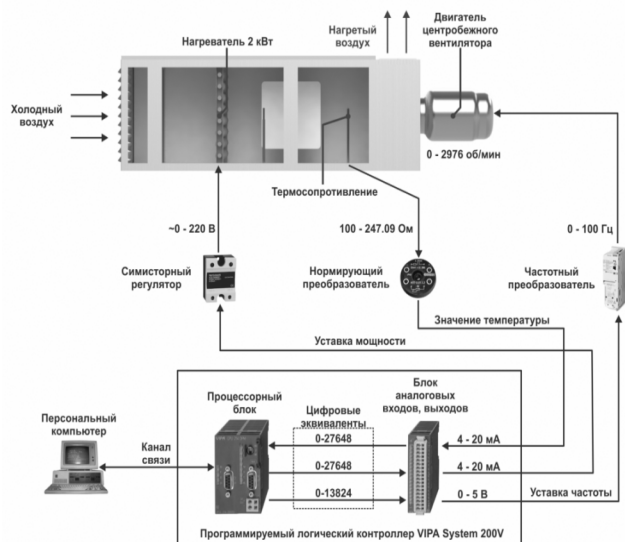


Рисунок 1 – Структура системы автоматического управления

Аппаратная часть системы автоматического управления создана на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) VIPA System 200 V. Структура аппаратной, части приведена на рис.1. ПЛК в системе автоматического управления выступает в качестве модуля удаленного аналогового ввода-вывода [4].

Программная часть САУ включает в себя программное обеспечение программируемого логического контроллера, предназначенного для организации вычислительных процессов, и программное обеспечение персонального компьютера выполненного на основе HMI/SCADA системы Zenon Supervisor 7.0 предназначенного для реализации человеко-машинного интерфейса и различных типов регуляторов.

Данный стенд позволяет решать широкий круг задач, связанных с изучением технических средств систем автоматизации, исследованием методов идентификации и законов управления технологических объектов, получения практических навыков программирования систем автоматизации в реальном масштабе времени [5]. Однако базовые аппаратно-программные средства лабораторного стенда не позволяют исследовать оптимальные САУ, что ограничивает его применение в учебных целях [6,7].

Динамическая модель теплового объекта по каналу управления "величина тока в электронагревателе – температура воздуха внутри теплового объекта"

(частота вращения центробежного вентилятора 50 Гц, заслонка полностью открыта) представляет собой апериодическое звено второго порядка с передаточной функцией $W(p) = k / (T_2 p^2 + T_1 p + 1)$. Здесь $k = 0,845$ – коэффициент усиления, $T_1 = 3,677$ и $T_2 = 3,362$ – постоянные времени [8].

В общем случае задача оптимального по быстродействию управления с использованием принципа максимума Понтрягина формулируется следующим образом. Объект управления необходимо перевести из начального состояния y_n в момент времени $t=0$ в конечное состояние y_k за минимальное время, используя при этом релейный закон управления с максимальным и минимальным значениями управляющих воздействий соответственно U_{\max} и U_{\min} . Так как тепловой объект описывается динамическим уравнением второго порядка, то для управления им, согласно теореме об n – интервалах, достаточно двух интервалов управления (одно переключение управляющего воздействия) [2]. Причём $U_{\min} = 0$ так как в тепловом объекте отсутствуют исполнительные механизмы, способные охладить воздух.

На рис. 2а и 2б показаны изменения выходной величины y_{vih} и управляющего воздействия U соответственно для случая, когда $y_k > y_n$, а на рис. 3а и 3б – для случая, когда $y_k < y_n$. Запишем законы изменения выходной величины y_{vih} и её производной \dot{y}_{vih} в моменты времени $t=0$, $t=t_1$ и $t=t_2$.

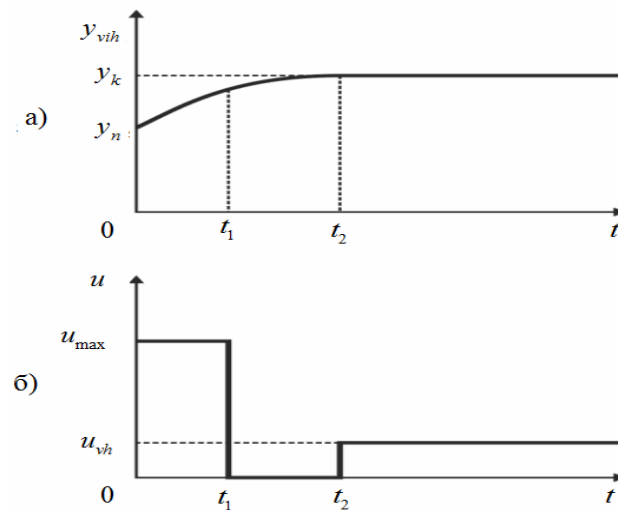


Рисунок 2 – Управление объектом при $y_k > y_n$: а) изменение выходной величины; б) изменение управляющего воздействия.

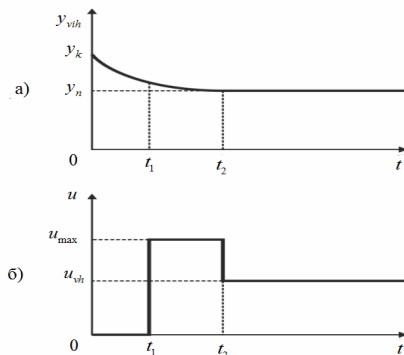


Рисунок 3 – Управление объектом $y_k < y_n$:а) изменение выходной величины; б) изменение управляющего воздействия.

В конце второго интервала управления (момент времени $t = t_2$):

$$\begin{cases} y_{vih} = U_{\min(\max)} + C_1^2 e^{-\alpha_1 t_2} + C_2^2 e^{-\alpha_2 t_2} \\ \dot{y}_{vih} = -\alpha_1 C_1^2 e^{-\alpha_1 t_2} - \alpha_2 C_2^2 e^{-\alpha_2 t_2} \end{cases} \quad (1)$$

Поскольку переходной процесс в конце второго интервала управления должен закончиться, то очевидно, что $y_{vih} = y_k$, а $\dot{y}_{vih} = 0$. Тогда система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{cases} y_k = U_{\min(\max)} + C_1^2 e^{-\alpha_1 t_2} + C_2^2 e^{-\alpha_2 t_2} \\ 0 = -\alpha_1 C_1^2 e^{-\alpha_1 t_2} - \alpha_2 C_2^2 e^{-\alpha_2 t_2} \end{cases} \quad (2)$$

В начале первого интервала управления (момент времени $t = 0$):

$$\begin{cases} y_{vih} = U_{\min(\max)} + C_1^1 e^{-\alpha_1 \cdot 0} + C_2^1 e^{-\alpha_2 \cdot 0} \\ \dot{y}_{vih} = -\alpha_1 C_1^1 e^{-\alpha_1 \cdot 0} - \alpha_2 C_2^1 e^{-\alpha_2 \cdot 0} \end{cases} \quad (3)$$

В начале первого интервала управления $y_{vih} = y_n$, а $\dot{y}_{vih} = 0$. Поэтому система уравнений (3) принимает вид:

$$\begin{cases} y_n = U_{\min(\max)} + C_1^1 + C_2^1 \\ 0 = -\alpha_1 C_1^1 - \alpha_2 C_2^1 \end{cases} \quad (4)$$

В момент времени $t = t_1$ (конец первого интервала управления и начало второго интервала управления) значение y_{vih} , рассчитанное по выражению (2) или по выражению (4), должны быть одинаковыми. Одинаковыми должны быть и значения \dot{y}_{vih} . Тогда:

$$\begin{cases} kU_{\min(\max)} + C_1^1 e^{-\alpha_1 t_1} + C_2^1 e^{-\alpha_2 t_1} = \\ = kU_{\min(\max)} + C_1^2 e^{-\alpha_1 t_1} + C_2^2 e^{-\alpha_2 t_1} \\ -\alpha_1 C_1^1 e^{-\alpha_1 t_1} - \alpha_2 C_2^1 e^{-\alpha_2 t_1} = \\ = -\alpha_1 C_1^2 e^{-\alpha_1 t_1} - \alpha_2 C_2^2 e^{-\alpha_2 t_1} \end{cases} \quad (5)$$

В формулах (1)-(5) в скобках указан индекс управляющего воздействия для случая, когда $y_k < y_n$. $C_1^1, C_2^1, C_1^2, C_2^2$ – постоянные интегрирования.

Исключив из систем уравнений (2), (4) и (5) постоянные интегрирования C_1^1, C_2^1, C_1^2 и C_2^2 и, учитывая, что $U_{\min} = 0$, получим следующие системы уравнений для определения моментов времени t_1 и t_2 :

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{y_n}{kU_{\max}}\right) + \frac{y_k e^{\alpha_1 t_2}}{kU_{\max}} - e^{\alpha_1 t_1} = 0 \\ \left(1 - \frac{y_n}{kU_{\max}}\right) + \frac{y_k e^{\alpha_2 t_2}}{kU_{\max}} - e^{\alpha_2 t_1} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

и

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{y_k}{kU_{\max}}\right) e^{\alpha_1 t_2} - e^{\alpha_1 t_1} + \frac{y_n}{kU_{\max}} = 0 \\ \left(1 - \frac{y_k}{kU_{\max}}\right) e^{\alpha_2 t_2} - e^{\alpha_2 t_1} + \frac{y_n}{kU_{\max}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Система уравнений (6) получена для случая $y_k > y_n$, а система уравнений (7) – для случая $y_k < y_n$. В конце второго интервала управления выходная величина y принимает заданное значение y_k , а управляющая величина U – значение равно:

$$\left\{ U_k = \frac{y_k}{k} \right. \quad (8)$$

Проверка математических выражений (6) – (8) осуществлена при управлении тепловым объектом. В качестве выходной величины принята температура T (°C) нагретого внутри ёмкости воздуха, а в качестве управляющего воздействия – величина тока i (mA) преобразователя мощности электрического нагревателя. Зависимость между величиной тока i и величиной относительной мощности P (%) имеет следующий вид:

$$P = 6,25i - 25 \quad (9)$$

Максимальное и минимальное значения тока управления равны $i_{\max} = 20$ mA, $i_{\min} = 0$ mA. Передаточная функция данного объекта по каналу "величина тока – температура воздуха" имеет вид $W(p) = 0,845 / (3,362p^2 + 3,677p + 1)$.

Корни характеристического уравнения соответственно равны: $-\alpha_1 = -0,59$ и $-\alpha_2 = -0,51$. Температуру воздуха в тепловом объекте необходимо было изменить последовательно с 0°C до 5°C, с 5°C до 10°C и с 10°C до 7°C с фиксацией установившихся режимов в течении времени Δt для оценки значений производных выходной величины в конце второго интервала управлений. В табл.1 приведены исходные данные для проведения эксперимента на лабораторном стенде (i_k - значение управляющего воздействия в конце второго интервала управления).

Исходные данные для проведения эксперимента

| Изменение T с 0°C до 5°C | | | | Изменение T с 5°C до 10°C | | | | Изменение T с 10°C до 7°C | | | |
|---|-------------|------------------|------------|--|-------------|------------------|------------|--|-------------|------------------|------------|
| t_1 , МИН | t_2 , МИН | Δt , МИН | i_k , мА | t_1 , МИН | t_2 , МИН | Δt , МИН | i_k , мА | t_1 , МИН | t_2 , МИН | Δt , МИН | i_k , мА |
| 1,51 | 2,69 | 2,31 | 5,92 | 2,37 | 2,93 | 2,07 | 11,83 | 1,77 | 2,29 | 2,72 | 8,28 |

Результаты эксперимента, зарегистрированные непосредственно на объекте управления, приведены на рис. 4.

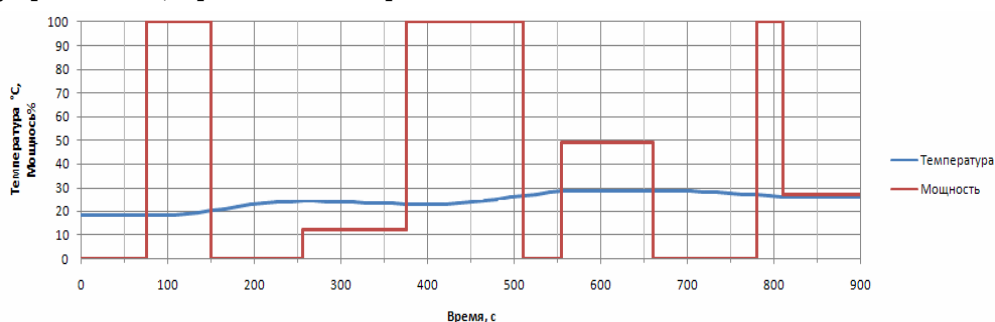


Рисунок 4 – Графики изменений температуры и мощности в ходе эксперимента

Как следует из графика на рис.4 результаты управления тепловым объектом свидетельствуют о хорошей согласованности теоретических расчётов и данных экспериментов. По окончании второго интервала управления изменения выходной величины T отсутствуют, а её значения по окончании переходных процессов соответствуют расчётным (с учётом начального значения температуры воздуха внутри ёмкости $T_n=18,4^{\circ}\text{C}$).

Системы уравнений (6) и (7) являются трансцендентными и аналитического решения не имеют. Их можно решить либо графическими либо численными методами. Решающе блоки ПЛК VIPA System 200 V не ориентированы на решение систем уравнений данного класса. Однако доработка программного обеспечения персонального компьютера выполненного на основе HMI/SCADA системы Zenon Supervisor 7.0 в части реализации алгоритмов оптимизации позволит реализовать оптимальное по быстродействию управление в реальном масштабе времени. Кроме того, реализовать оптимальное управление в реаль-

ном масштабе времени, возможно выполнив предварительные расчёты по поиску длительностей интервалов управления t_1 и t_2 на множестве начальных и конечных состояний теплового объекта и сформировав его предикатную модель согласно [9,10]. Выбор длительностей интервалов в этом случае осуществляется применением известного метода распознавания образов, допускающего разбиение факторного пространства на элементарные подобласти [11,12]. Данный метод легко реализуется в среде системы управления базами данных, использующей реляционную модель [13].

Значительно проще оказалась реализация в реальном масштабе времени квазиоптимальной по быстродействию системы управления. Такое управление может быть осуществлено в двух случаях:

- понижение порядка дифференциального уравнения объекта;
- исключение интервалов управления настолько малой длительности, что практическая реализация их невозможна;

В первом случае объект управления разбивают на отдельные звенья и исключают те из них, которые имеют малые постоянные времени. Эти звенья запасают малые количества энергии или вещества и очень слабо влияют на переходной процесс. Во втором случае исключение интервалов управления малой длительности не приведёт к большим ошибкам управления вследствие малых энергий, припадающих на эти интервалы.

Вместе с тем можно исключать и интервалы большой длительности при условии соблюдения ограничений по величине перерегулирования. В этом случае переходной процесс будет бесконечной длительности, но отклонение выходной величины будет в заданных пределах.

Рассмотрим возможность управления тепловым объектом второго порядка с одним интервалом управления, задавшись максимальным значением превышения выходной величины Δy над её установившемся значением y . При этом обозначим через t_2 интервал времени, за которое выходная величина достигает максимального значения $y+\Delta y$, а через t_1 момент времени первого переключения. Воспользуемся стыковкой решений.

В общем случае решение дифференциального уравнения в момент t_2 имеет вид:

$$\begin{cases} y + \Delta y = kU + C_1^2 e^{-\alpha_1 t_2} + C_2^2 e^{-\alpha_2 t_2} \\ 0 = -\alpha_1 C_1^2 e^{-\alpha_1 t_2} - \alpha_2 C_2^2 e^{-\alpha_2 t_2} \end{cases} \quad (10)$$

Решение на момент времени $t=0$:

$$\begin{cases} 0 = kU_{\max} + C_1^1 + C_2^1 \\ 0 = -\alpha_1 C_1^1 - \alpha_2 C_2^1 \end{cases} \quad (11)$$

В результате стыковки решений (10) и (11) на момент времени t_1 получим:

$$\begin{cases} kU_{\max} + C_1^1 e^{-\alpha_1 t_1} + C_2^1 e^{-\alpha_2 t_1} = \\ = kU + C_1^2 e^{-\alpha_1 t_1} + C_2^2 e^{-\alpha_2 t_1} \\ -\alpha_1 C_1^1 e^{-\alpha_1 t_1} - \alpha_2 C_2^1 e^{-\alpha_2 t_1} = \\ = -\alpha_1 C_1^2 e^{-\alpha_1 t_1} - \alpha_2 C_2^2 e^{-\alpha_2 t_1} \end{cases} \quad (12)$$

Определив постоянные интегрирования C_1^2, C_2^2, C_1^1 и C_2^1 из систем уравнений (10), (11) и подставив их математические выражения в (12), после тождественных преобразований получим систему уравнений с двумя неизвестными t_1 и t_2 :

$$\begin{cases} \frac{y + \Delta y - kU}{kU_{\max}} e^{-\alpha_1 t_1} - \left(1 - \frac{U}{U_{\max}}\right) e^{-\alpha_1 t_1} + 1 = 0 \\ \frac{y + \Delta y - kU}{kU_{\max}} e^{-\alpha_2 t_2} - \left(1 - \frac{U}{U_{\max}}\right) e^{-\alpha_2 t_2} + 1 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Данная система уравнений также является трансцендентной. А её решением являются значения t_1 и t_2 , из которых существенным является t_1 . В табл. 2 приведены результаты решений (13) относительно t_1 и t_2 , выполненных в программной среде Mathcad с использованием функции *Minerr* для $T=5^\circ\text{C}$ и различных значений превышения температуры ΔT .

В табл.2 во второй строке приведена величина перерегулирования σ рассчитываемая по формуле:

$$\sigma = \frac{\Delta T}{T} \cdot 100\% \quad (14)$$

Таблица 2

Результаты расчётов интервалов управления

| Превышение $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | 0,05 | 0,15 | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 2,0 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Величина перерегулирования $\sigma, \%$ | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 | 40 |
| Интервал управления t_1 мин | 0,888 | 0,987 | 1,058 | 1,201 | 1,44 | 1,869 |
| Время достижения максимального значения выходной величины t_2 мин | 7,049 | 5,726 | 5,18 | 4,539 | 4,055 | 3,81 |

График переходного процесса, полученного моделированием в приложении SIMULINK Matlab для $\Delta T=0,5^\circ\text{C}$, приведен на рис.5. Как видно параметры переходного процесса соответствуют рассчитанным значениям в табл.2.

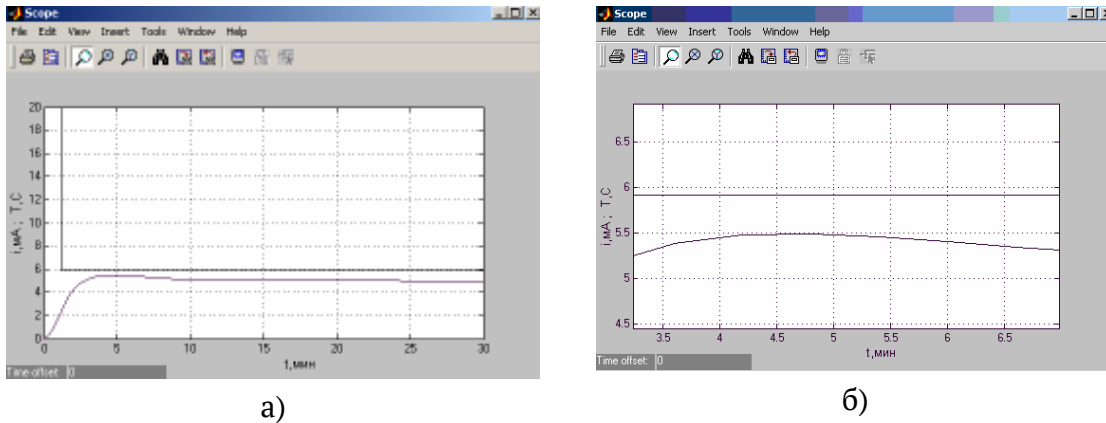


Рисунок 5 – Графики изменений управляющего воздействия и выходной величины при $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$; $\sigma=10\%$: а) общий вид переходного процесса и управления б) максимальное превышение ΔT

По данным табл.2 выполнен расчёт нормированного коэффициента корреляции $r_{\Delta T, t_1}$ для выявления линейной связи между величинами ΔT и t_1 по методике, приведенной в [14]. Результаты расчётов приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчёта нормированного коэффициента корреляции

| Показатель | Превышение ΔT | Интервал управления t_1 , мин |
|--|-----------------------|---------------------------------|
| Среднее $\overline{\Delta T}, \bar{t}_1$ | 0,66 | 1,23 |
| Среднеквадратичное отклонение, $\sigma_{\Delta T}, \sigma_{t_1}$ | 0,69 | 0,36 |
| Дисперсия, $D_{\Delta T}, D_{t_1}$ | 0,47 | 0,13 |
| Коэффициент корреляции, $R_{\Delta T, t_1}$ | 0,25 | |
| Нормированный коэффициент корреляции, $r_{\Delta T, t_1}$ | 0,99 | |

Здесь: $\overline{\Delta T}$ и \bar{t}_1 – средние значения величин превышения температуры над её установившимся значением и длительности первого интервала управления соответственно; $\sigma_{\Delta T}$ и σ_{t_1} – среднеквадратические отклонения величин ΔT и t_1 соответственно; $D_{\Delta T}$ и D_{t_1} – среднеквадратичные отклонения величин ΔT и t_1 соответственно; $R_{\Delta T, t_1}$ и $r_{\Delta T, t_1}$ – коэффициент корреляции и нормированный коэффициент корреляции.

Нормированный коэффициент корреляции $r_{\Delta T, t_1}$ близок к единице, что соответствует наличию линейной связи между величинами ΔT и t_1 . Линейная зависимость $t_1 = f(\Delta T)$ определяется из следующего выражения [14]:

$$t_1 - \bar{t}_1 = r_{\Delta T, t_1} \frac{\sigma_{t_1}}{\sigma_{\Delta T}} (\Delta T - \overline{\Delta T}) \quad (15)$$

После подстановки в (15) значений параметров из табл.3 получим:

$$t_1 - 1,23 = 0,99 \frac{0,36}{0,69} (\Delta T - 0,66), \quad (16)$$

В результате тождественных преобразований окончательно имеем:

$$t_1 = 0,89 + 0,52\Delta T \quad (17)$$

По выражению (17) легко рассчитать длительность интервала управления t_1 для известной величины перерегулирования σ (превышение ΔT) при помощи решающих блоков ПЛК VIPA System 200 V и реализовать квазиоптимальное управление на тепловом объекте.

В статье приведены методика и результаты расчётов оптимальной и квазиоптимальной САУ для конкретной частоты вращения центробежного вентилятора и положения заслонки в тепловом объекте. При изменении этих параметров результаты расчётов будут иными. Именно их поиск и проверка результатов моделированием САУ является малой исследовательской задачей в ходе выполнения лабораторных работ по дисциплине "Оптимальные и адаптивные системы".

Выводы

1. На основе аппаратно-программных средств лабораторного стенда возможно создание оптимальной и квазиоптимальной по быстродействию системы автоматического управления.

2. Реализация оптимальной по быстродействию САУ в реальном масштабе времени предполагает формирование предикатной модели теплового объекта в признаковом пространстве интервалов управления и начального и конечного состояний.

3. Реализация квазиоптимальной по быстродействию САУ в реальном масштабе времени предполагает формирование регрессионной модели вида $t_1 = f(\Delta T)$.

4. Конструктивные особенности лабораторного стенда позволяют использовать исходные данные для выполнения исследовательских работ.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Прітченко О.В. Концепція побудови малогабаритних лабораторних стендів /О.В. Прітченко, А.П. Калінов, В.О. Мельников, О.В. Скрипников // Щоквартальний науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». Вип. 2. Кременчук: КДПУ, 2010. С. 56-61.
2. Понтрягин Л.С. Применение принципа максимума в оптимальном управлении. – М.: Наука, 1998.
3. Трипутень Н.М., Бойко О. Разработка нечёткого регулятора для управления тепловым объектом на основе логического программируемого контролера - Матеріали XI міжнародної конференції Проблеми розвитку впровадження інформаційних технологій в наукову та інноваційну сферу освіти 25 листопада 2014 р. ДВНЗ “Національний гірничий університет” м. Дніпропетровськ С. 24-25.
4. Шишов О. В. Элементы систем автоматизации. Контроллеры, операторные панели, модули удалённого доступа: лабораторный практикум. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 185 с.
5. Rajib Mall. Real-time Systems: Theory and Practice. – IGI Global, 2006. – 242 p.
6. A.Scherbakov, V. Gubkina. Fuzzy Logic Systems - The 8th International Forum for Students and Young Researches WIDENING OUR HORIZONS April 11-12, 2013, Volume 2, p.78.
7. D. Belikov, N. Nechay. Extreme Control System for a Thermal Object - The 9th International Forum for Students and Young Researches WIDENING OUR HORIZONS April 3-4, 2014, Volume 2, p.92.
8. Трипутень Н.М., Беликов Д.В. Идентификация теплового объекта. - Матеріали XI міжнародної конференції Проблеми розвитку впровадження інформаційних технологій в наукову та інноваційну сферу освіти 25 листопада 2014р. ДВНЗ “Національний гірничий університет” м.Дніпропетровськ С.18-19.
9. Качан Ю.Г. Разработка управляющего блока для АСУ ТП крупнокускового дробления// *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1990. - №3. С.64-66.
10. Кузнецов В.В. Алгоритм распознавания в задачах повышения энергоэффективности асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии/ В.В. Кузнецов, А.В. Николенко, В.П. Иващенко// *Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"*. Вып.27(1249). Харьков: НТУ "ХПИ", 2017. С. 95-98.
11. Воронов В.А. Метод описания технологических ситуаций и его использование при управлении процессами // *Обогащение руд*. – 1982.- №2.-С.31-35.

12. Воронов В.А. Одномерное числовое кодирование ситуаций при автоматизированном управлении технологическими процессами // Обогащение руд. – 1984.- №4.-С.38-41.
13. Бешта Д.О. α -алгебра в задачах керування технологічними процесами// Науковий вісник НГА України.- 2001. - №2.-С.80-83.
14. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике.- М.: Высшая школа, 2004.

REFERENSES

1. Pritchenko O.V. (2010), “The concept of the incentives of small-sized laboratory stands”, Schokvartalnyi naukovo-virobnichiy zhurnal “Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi”, Kremenchuk: KDPU, Vol. 2., pp. 56-61.
2. Pontryagin L.S. (1998) Primenenie printsipa maksimuma v optimalnom upravlenii. [The application of the maximum principle in optimal control], Nauka, Moscow, Russia.
3. Triputen N.M. and Boyko O. (2014) “Development of a fuzzy regulator for controlling a thermal object based on a logic programmable controller” , Materiali XI mizhnarodnoyi konferentsiyi Problemi rozvitku vprovadzhennya Informatsiynih tehnologiy v naukovu ta innovatsiynu sferu osviti [Materials of the XI International Conference Problems of the development of the introduction of information technologies in the scientific and innovative sphere of education], Dnipropetrovsk, NGU, November 25, 2014, pp.24-25.
4. Shishov O.V. (2015) Elementyi sistem avtomatizatsii. Kontrolleryi, operatornyie paneli, moduli udalyonnogo dostupa: laboratorniy praktikum [Elements of automation systems. Controllers, operator panels, remote access modules: laboratory practice], Direkt-Media, Moscow, Russia – Berlin, Germany.
5. Rajib Mall. (2006), Real-time Systems: Theory and Practice. IGI Global.
6. Scherbakov A. and Gubkina V. (2013) “Fuzzy Logic Systems”, The 8th International Forum for Students and Young Researches WIDENING OUR HORIZONS, April 11-12, Volume 2, p.78.
7. Belikov D. and Nechay N. (2014) “Extreme Control System for a Thermal Object”, The 9th International Forum for Students and Young Researches WIDENING OUR HORIZONS, April 3-4, Volume 2, p.92.
8. Triputen N.M. and Belikov D.V. (2014), “Identification of the thermal object”, Materiali XI mizhnarodnoyi konferentsiyi Problemi rozvitku vprovadzhennya Informatsiynih tehnologiy v naukovu ta innovatsiynu sferu osviti [Materials of the XI International Conference Problems of the development of the introduction of information

technologies in the scientific and innovative sphere of education], Dnipropetrovsk, NGU, November 25, 2014, pp.18-19.

9. Kachan Yu.G. (1990) "The development of a control unit for the process control system for large-scale chipping", Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyishlennost, Vol.3, pp.64-66.

10. Kuznetsov V.V. (2017) "Algorithm of recognition in tasks of increasing the energy efficiency of induction motors operating in conditions of low-quality electric power", Vestnik Natsionalnogo tehničeskogo universiteta "Harkovskiy politehničeskij institut", Vol.27, no. 1249, pp. 95-98.

11. Voronov V.A. (1982), "Method of describing technological situations and its use in process management", Obogaschenie rud, Vol.2, pp.31-35.

12. Voronov V.A. (1984), "One-dimensional numerical coding of situations in the automated control of technological processes", Obogaschenie rud, Vol.4, pp.38-41.

13. Beshta D.O. (2001), " α -algebra in the problems of control of technological processes", Naukovyy visnyk NHA Ukrayiny, Vol. 2, pp.80-83.

14. Gmurman V.E. (2004), Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike [A guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

Received 18.02.2019.

Accepted 22.02.2019.

Дослідження оптимальних за швидкістю систем автоматичного управління на лабораторному стенді

У статті представлений лабораторний стенд для дослідження оптимальної і квазіоптимальної по швидкості системи автоматичного управління. Приведена методика синтезу і результати розрахунку оптимального по швидкості релейного закону управління тепловим об'єктом по вибраному каналу. Показані результати експерименту по переводу теплового об'єкту з різних початкових станів в кінцеві стани. Показана можливість реалізації оптимального по швидкості управління в реальному масштабі часу шляхом вдосконалення програмного забезпечення включенням в нього алгоритмів рішення трансцендентної системи рівнянь або формуванням предикатної моделі теплового об'єкту.

Встановлена функціональна залежність тривалості першого інтервалу управління від величини перегулювання для реалізації квазіоптимальної САУ в реальному масштабі часу з використанням базових вирішальних блоків програмованого логічного контролера.

Research of optimal fast-acting systems of automatic control on laboratory bench

Purpose. This paper presents a laboratory bench for research of optimal and quasi-optimal automatic control system in respect of its operation speed. Laboratory bench consists of thermal unit and software and hardware suite which includes VIPA System 200 V and HMI/SCADA logic controller and Zenon Supervisor 7.0 system. Thermal unit is described by differential equation of second order pursuing the control channel "amperage in electric heating unit power converter – air temperature inside thermal unit." Differential equation coefficients depend on screen position and centrifugal blower rotation frequency. Methodology. Reported the methodology of synthesis and results of calculation of optimal relay hypothesis for thermal unit control through the

chosen channel. Were demonstrated the results of experiment in transition of thermal unit from various initial states to final states. Was shown the possibility of implementing optimal control system in respect of its operation speed in real time scale by means of software development by including algorithms for transcendence set of simultaneous equations into it or by means of development of predicative model of thermal unit. Results. Were specified conditions for application of quasi-optimal relay control hypothesis in respect of its operation speed. Reported the methodology of synthesis and results of calculation of the length of the first control interval depending on the predetermined value of readjustment. Were demonstrated the results of modeling of quasi-optimal automatic control system in respect of its operation speed in Simulink of Matlab app. Was established functional relation of the length of the first control interval depending on the predetermined value of readjustment for implementing of quasi-optimal automatic control system in real time scale with application of basic operational units of programmed logic controller.

Трипутень Н.М. - доцент кафедри автоматизації і комп'ютерних систем, Національний ТУ «Дніпровська політехніка».

Кузнецов В.В. - доцент кафедри електротехніки і електропривода, Національна металургічна академія України.

Бездієжних М.Є. - ст.преп. кафедри електротехніки і електропривода, Національна металургічна академія України.

Руденко І.В. - студент факультета Електротехніки, спеціальність Промислова електроніка, Варшавська політехніка.

Трипутень М.М. - доцент кафедри автоматизації і комп'ютерних систем, Національний ТУ «Дніпровська політехніка».

Кузнецов В.В. - доцент кафедри Електротехніки та електропривода, Національна металургічна академія України.

Бездієжних М.Є. - ст.викл.кафедри Електротехніки та електропривода, Національна металургічна академія України.

Руденко І.В. - студент факультету Електротехніки, спеціальність Промислова електроніка, Варшавська політехніка.

Tryputen M. - department of automation and computer systems, National TU Dnipro Polytechnic Dnipro, Ukraine.

Kuznetsov V. - Department of the electrical engineering and electromechanic National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

Bezdieniezhykh M. - Department of the electrical engineering and electromechanic National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro.

Rudenko I. - student of Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology.