

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 66.011:681.51

СИНТЕЗ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА МЕТОДАМИ ТЕОРИИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.Н. ЛАБУТИН, В.Ю. НЕВИНИЦЫН, Г.В. ВОЛКОВА, А.В. ПАНАСЕНКОВА, В.А. ЗАЙЦЕВ
ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: lan@isuct.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Основной особенностью технологических объектов управления, в которых в результате гидромеханических, физических, химических воздействий на потоки исходных веществ происходит изменение их физических свойств, агрегатного состояния и состава, является их многомерность, нелинейность, многосвязность, а также параметрическая неопределенность математической модели на стадии проектирования. К такому типу объектов относится химический реактор, управление тепловым режимом которого в большинстве случаев осуществляется с использованием одноконтурных или каскадных систем автоматического регулирования на основе линейных алгоритмов. Основным недостатком таких систем является проблема сохранения свойств робастности, т.е. сохранения устойчивости и показателей качества управления при действии параметрических возмущений. Перспективным в этом плане представляется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов, разработанный в рамках синергетической теории управления.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием методов системного анализа технологических процессов как объектов управления; методов теории автоматического управления; методов аналитического синтеза алгоритмов управления на базе синергетической теории управления; методов компьютерного моделирования.

Результаты. Методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов решена задача алгоритмического синтеза системы каскадно-связанного управления тепловым режимом технологического объекта (химического реактора) в нелинейной постановке – с использованием нелинейной математической модели объекта. Методами компьютерного моделирования доказана работоспособность комплекса «объект – подсистема управления»: устойчивость системы, ковариантность с заданием. Показано, что при управлении тепловыми процессами рассматриваемого вида параметрическая неопределенность по коэффициенту теплопередачи может приводить к недопустимо большой величине статической ошибки, что требует совершенствования алгоритмической структуры системы автоматического управления.

Выводы. Для обеспечения полной робастности системы автоматического управления рекомендовано усложнение алгоритмической структуры системы путем введения в закон управления астатической составляющей и коррекции настроечных параметров алгоритма.

Ключевые слова: аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, синергетическая теория управления, технологический объект, каскадная система управления, компьютерное моделирование

SYNTHESIS OF THE CASCADE CONTROL SYSTEM OF THE THERMAL REGIME OF A TECHNOLOGICAL OBJECT BY THE METHODS OF SYNERGETIC CONTROL THEORY

A.N. LABUTIN, V.Yu. NEVINITSYN, G.V. VOLKOVA, A.V. PANASENKOVA, V.A. ZAITSEV
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lan@isuct.ru

Abstract

Background. The paper considers technological control objects whose physical properties, state of aggregation and composition are changed by hydromechanical, physical and chemical effects on the flows of initial substances. The main feature of such objects is their multi-dimensionality, nonlinearity, multiconnectivity, and parametric uncertainty of the mathematical model at the design stage. One of such objects is the chemical reactor with the thermal regime predominantly controlled by single-loop or cascade automatic control systems based on linear algorithms. The main disadvantage of such systems is the problem of maintaining robustness, i.e. stability and control quality under the action of parametric disturbances. In our opinion, the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR), developed within the framework of the synergetic control theory, is promising in this sense.

Materials and methods. The research uses methods of system analysis of technological processes as control objects, methods of the automatic control theory and analytical synthesis of control algorithms based on the synergetic control theory and computer simulation methods.

Results. Using the ADAR method, we have solved the problem of algorithmic synthesis of the cascade-coupled control system of the thermal regime of a technological object (chemical reactor) in the nonlinear formulation applying a nonlinear mathematical model of the object. Computer simulation methods have proved the functionality of the «object – control subsystem» complex: system stability, covariance with the set point. It is shown that in the systems controlling thermal processes of the considered type, the heat transfer coefficient parametric uncertainty can lead to an excessive value of the static error, which means that the algorithmic structure of the automatic control system has to be improved.

Conclusions. To ensure full robustness of the automatic control system, it is recommended to make the system's algorithmic structure more complex by introducing an astatic component into the control law and correcting the algorithm tuning parameters.

Key words: analytical design of aggregated regulators, synergetic control theory, technological object, cascade control system, computer simulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.041-048

Введение. Производственный процесс получения тех или иных целевых продуктов из исходных веществ представляет собой упорядоченную совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих между собой технологических процессов, в которых в результате гидромеханических, физических, химических воздействий на потоки исходных веществ происходит изменение их физических свойств, агрегатного состояния и состава. В ряде отраслей (например, нефтехимической) центральной является реакторная подсистема, определяющая ресурс- и энергоэффективность производственного процесса в целом, степень удовлетворения спроса потребителей на те или иные продукты [1].

При фиксированной нагрузке по исходным реагентам значение концентрации целевого продукта зависит от температуры процесса, так как она определяет скорость

превращения исходных веществ в продукты реакции. По этой причине и в силу сложности оперативного измерения концентраций компонентов на практике часто процесс ведут по температуре, и задача системы автоматического управления объектом заключается в стабилизации теплового режима объекта в условиях действия возмущений, а также при переводе объекта с одного режима на другой [2, 3].

Основной особенностью химических реакторов как объектов управления является их нелинейность и многосвязность, а также параметрическая неопределенность математической модели реактора на стадии проектирования. До настоящего времени управление тепловым режимом реакторов осуществляется с помощью одноконтурных или каскадных систем автоматического регулирования на основе линейных ПИД-алгоритмов [2, 3]. Основным недо-

статком таких систем является проблема сохранения свойств робастности, т.е. сохранения устойчивости и показателей качества управления при действии параметрических возмущений и переходе объекта с одного режима на другой [4, 5], так как при синтезе этих систем не учитывается нелинейность математической модели объекта.

На наш взгляд, перспективным в этом плане представляется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), разработанный в рамках синергетической теории управления [6, 7], обеспечивающий асимптотическую устойчивость системы автоматического управления в целом в широком диапазоне изменения переменных состояния и входных переменных.

Ранее в [8] решена задача синтеза нелинейного алгоритма стабилизации температуры в жидкофазном химическом реакторе методом АКАР на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий. Рассмотрим вариант синтеза нелинейной системы каскадно-связанного управления тепловым режимом методом АКАР.

Методы исследования. Жидкофазный химический реактор представляет собой емкостной аппарат непрерывного действия, работающий в политропическом режиме (рис. 1).

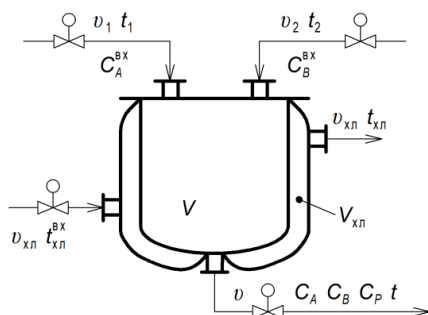


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора: C_A^{BX} , C_B^{BX} – концентрации исходных реагентов; v_1 , v_2 – расход исходных реагентов; t_1 , t_2 – температуры потоков исходных реагентов; $t_{хл}^{BX}$, $t_{хл}$ – температуры хладагента на входе и выходе из аппарата; $v_{хл}$ – расход хладагента на входе и выходе из аппарата; t – температура реакционной смеси в аппарате; v – расход реакционной смеси на выходе из аппарата; C_A , C_B , C_P – концентрации компонентов A , B , P в реакторе; V – объем реакционной смеси в аппарате; $V_{хл}$ – объем хладагента в рубашке

В аппарате протекает бимолекулярная экзотермическая реакция:



где A , B – исходные вещества; P – продукт реакции; k_1 – константа скорости.

Исходные реагенты A и B подаются в аппарат отдельными потоками. Смесь из реактора забирается насосом. Для отвода тепла и стабилизации температуры в реакторе аппарат снабжен рубашкой, в которую поступает хладагент.

Математическая модель реактора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} V \frac{dC_A}{dt} &= v_1 C_A^{BX} - (v_1 + v_2) C_A - V k_1 C_A C_B, \\ V \frac{dC_B}{dt} &= v_2 C_B^{BX} - (v_1 + v_2) C_B - V k_1 C_A C_B, \\ V \frac{dC_P}{dt} &= V k_1 C_A C_B - (v_1 + v_2) C_P, \\ V \frac{dt}{dt} &= v_1 t_1 + v_2 t_2 + \frac{V \Delta H k_1 C_A C_B}{\rho C_T} - (v_1 + v_2) t - \\ &\quad - \frac{K_T F_T (t - t_{хл})}{\rho C_T}, \\ V_{хл} \frac{dt_{хл}}{dt} &= v_{хл} (t_{хл}^{BX} - t_{хл}) + \frac{K_T F_T (t - t_{хл})}{\rho_{хл} C_{хл}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $k_1 = k_1^0 \cdot \exp(-E_1/R(t+273))$ – константа скорости; k_1^0 – постоянный множитель (предэкспонента) константы скорости; E_1 – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; ΔH – тепловой эффект реакции; ρ , C_T – плотность и теплоемкость реакционной смеси; $\rho_{хл}$, $C_{хл}$ – плотность и теплоемкость хладагента; K_T – коэффициент теплопередачи; F_T – поверхность теплообмена.

Общая задача управления химическим реактором заключается в стабилизации температуры смеси в аппарате на заданном уровне \bar{t} в условиях действия возмущений. Управляющим воздействием является расход хладагента, подаваемый в рубашку.

Конструктивные и технологические особенности химического реактора, особенности реализации сложного технологического процесса и, соответственно, структурные особенности математической модели (1) позволяют провести декомпозицию системы (1) на две подсистемы. Первая подсистема – это уравнения материального баланса по компонентам и уравнение теплового баланса реакционной

смеси. В качестве управляющего воздействия для температуры смеси в емкости выступает температура хладагента в рубашке. Вторая подсистема – рубашка реактора, функционирование которой описывается уравнением теплового баланса, а состояние характеризуется температурой $t_{хл}$. Управлением для $t_{хл}$ является расход хладагента $v_{хл}$. Структурная схема объекта представлена на рис. 2.

В линейной теории автоматического управления и в практике автоматизации объектов данной структуры широко используются системы каскадно-связанного регулирования [9]. Решим задачу синтеза системы каскадно-связанного управления температурой в реакторе методами синергетической теории управления. Математическая модель возмущенного движения первой подсистемы (реакционной емкости) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dC_A}{d\tau} &= f_1, \\ \frac{dC_B}{d\tau} &= f_2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = f_4 + \frac{\beta_1}{V} u_1,$$

$$\text{где } f_1 = \frac{v_1 C_A^{Bx} - (v_1 + v_2) C_A - V k_1 C_A C_B}{V};$$

$$f_2 = \frac{v_2 C_B^{Bx} - (v_1 + v_2) C_B - V k_1 C_A C_B}{V};$$

$$f_4 = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2 + \alpha k_1 C_A C_B - (v_1 + v_2) t - \beta_1 t}{V};$$

$$\alpha = \frac{V \Delta H}{\rho C_T}; \quad \beta_1 = \frac{K_T F_T}{\rho C_T}; \quad u_1 = t_{хл}.$$

Задача формулируется следующим образом: необходимо синтезировать закон управления $u_1(C_A, C_B, t)$, переводящий объект из произвольного начального положения в окрестность заданного инвариантного многообразия $\psi_1(C_A, C_B, t) = 0$ и обеспечивающий устойчивое движение вдоль $\psi_1(C_A, C_B, t) = 0$ в конечное состояние.

Эта задача решается за один шаг, так как управление входит непосредственно в уравнение для температуры реакционной смеси [6].

Введем в рассмотрение макропеременную ψ_1 :

$$\psi_1 = t - \bar{t},$$

где \bar{t} – заданное значение температуры.

Управляющее воздействие должно быть таким, чтобы изменение макропеременной ψ_1 подчинялось основному функциональному уравнению:

$$T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0.$$

Запишем это уравнение в развернутом виде в силу уравнений модели объекта (2):

$$f_4 + \frac{\beta_1}{V} u_1 = -\frac{1}{T_1} (t - \bar{t}).$$

Из этого следует

$$u_1 = -\frac{V}{T_1 \beta_1} (t - \bar{t}) - \frac{f_4 V}{\beta_1}. \quad (3)$$

Параметром настройки алгоритма управления является величина T_1 . Условием асимптотической устойчивости замкнутой подсистемы управления реакционной емкостью является неравенство $T_1 > 0$.

Для доказательства устойчивости движения замкнутой системы в заданное конечное состояние подставим выражение для управления (3) в последнее уравнение модели (2). Получим, что изменение температуры описывается уравнением

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{1}{T_1} (t - \bar{t})$$

или

$$T_1 \frac{dt}{d\tau} + t = \bar{t}.$$

Это уравнение аperiodического звена первого порядка, согласно которому при $T_1 > 0$ $t|_{\tau \rightarrow \infty} = \bar{t}$, т. е. движение асимптотически устойчиво.

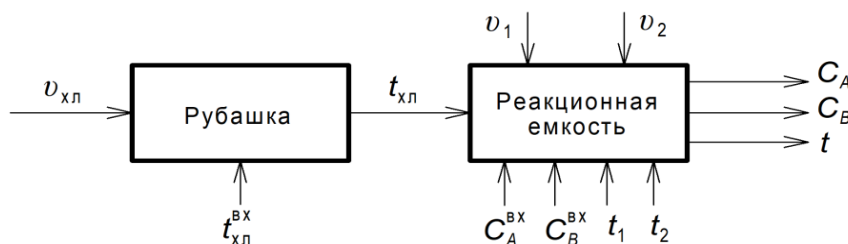


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

Следующий этап синтеза системы управления тепловым режимом заключается в синтезе алгоритма управления температурой хладагента $t_{хл}$. Задача подсистемы управления температурой хладагента в рубашке заключается в определении такого внешнего управляющего воздействия $\Delta u_{хл}$, которое обеспечило бы определенное на первом этапе значение температуры хладагента $\bar{t}_{хл} = u_1$. Модель подсистемы имеет вид

$$\frac{dt_{хл}}{dt} = f_5 + \frac{(t_{хл}^{BX} - t_{хл})}{V_{хл}} u_2, \tag{4}$$

где $u_2 = \Delta u_{хл}$; $f_5 = \frac{v_{хл}(t_{хл}^{BX} - t_{хл}) + \beta_2(t - t_{хл})}{V_{хл}}$;

$$\beta_2 = \frac{K_T F_T}{\rho_{хл} C_{хл}}$$

В терминах метода АКАР задача синтеза алгоритма управления температурой хладагента формулируется следующим образом: синтезировать закон управления $u_2(t_{хл})$, переводящий объект из произвольного начального положения в окрестность многообразия $\psi_2(t, t_{хл}) = 0$ и устойчивое движение в заданное конечное состояние.

Притягивающее инвариантное многообразие запишется следующим образом:

$$\psi_2 = t_{хл} - u_1 = 0.$$

Используя функциональное уравнение $T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$ и уравнение (4), получим закон управления:

$$u_2 = -\frac{V_{хл}}{T_2(t_{хл}^{BX} - t_{хл})} (t_{хл} - u_1) - \frac{f_5 V_{хл}}{(t_{хл}^{BX} - t_{хл})}. \tag{5}$$

Параметром настройки алгоритма управления является величина T_2 . Условием асимптотической устойчивости замкнутой подсистемы управления рубашкой является неравенство $T_2 > 0$. Проверка асимптотической устойчивости подсисте-

мы управления температурой хладагента проводится так же, как на первом этапе.

Исходя из вида выражений (3), (5), структура каскадно-связанной системы управления без учета параметрических возмущений может быть представлена схемой, изображенной на рис. 3.

Подставив u_1 из (3) в (5), получим закон управления для вспомогательного регулятора, определяющий величину внешнего управляющего воздействия:

$$u_2 = -\frac{V_{хл}}{T_2(t_{хл}^{BX} - t_{хл})} \left[t_{хл} + \frac{V}{T_1 \beta_1} (t - \bar{t}) + \frac{f_4 V}{\beta_1} \right] - \frac{f_5 V_{хл}}{(t_{хл}^{BX} - t_{хл})}. \tag{6}$$

Результаты исследования. Методами компьютерного моделирования проведено исследование работоспособности каскадно-связанной системы управления тепловым режимом химического реактора с использованием синтезированного нелинейного закона (6). Исследованы свойства инвариантности к возмущениям, ковариантности с задающими воздействиями по температуре и асимптотической устойчивости замкнутой системы.

Моделирование проводилось при технологических и конструктивных параметрах, обеспечивающих оптимальный режим работы химического реактора: $V = 500$ л; $V_{хл} = 290$ л; $C_A^{BX} = 19,74$ моль/л; $C_B^{BX} = 10,93$ моль/л; $v_1 = 1,5$ л/мин, $v_2 = 3,5$ л/мин, $v = 5,0$ л/мин, $v_{хл} = 3,84$ л/мин; $t_1 = 20$ °С; $t_2 = 30$ °С; $t_{хл}^{BX} = 20$ °С; $K_T = 12$ кДж/(м²·мин·К); $F_T = 2,9$ м²; $\rho = 0,9$ кг/л; $C_T = 2$ кДж/(кг·К); $\rho_{хл} = 1$ кг/л; $C_{хл} = 4,18$ кДж/(кг·К); $\Delta H = 80$ кДж/моль; $E = 48635$ Дж/моль; $k_1^0 = 109860$ л/(моль·мин).

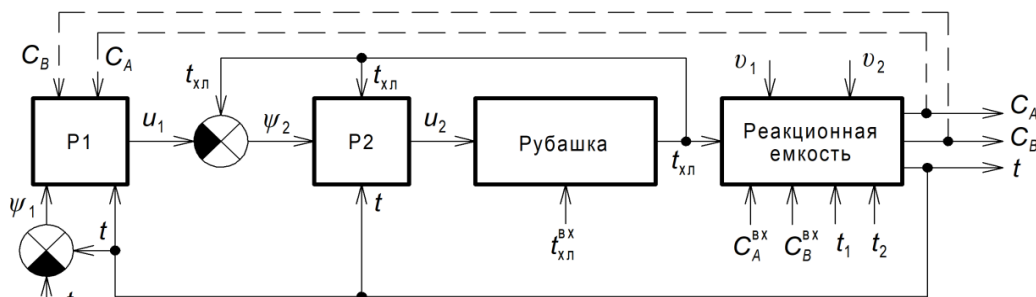


Рис. 3. Структура каскадно-связанной системы управления тепловым режимом реактора: P1 – главный регулятор; P2 – вспомогательный

Параметры закона управления (6) следующие: значения постоянных времени $T_1 = 10$ мин, $T_2 = 20$ мин (определялись из требований к времени процесса управления); заданное значение температуры смеси в аппарате $\bar{t} = 140$ °С.

На рис. 4, 5 приведены примеры переходных процессов управления в замкнутой системе при начальном отклонении переменной состояния C_A от статики на -20% ($\Delta C_A = -0,2C_A^0$) и ступенчатом изменении задающего воздействия ($\Delta \bar{t} = -10$ °С). Для наглядности переходные процессы до момента приложения входного воздействия ($\tau = 50$ мин) приводятся в статическом режиме. Скачкообразное изменение управления u_2 в момент приложения возмущений объясняется тем, что не учитывалась инерционность исполнительного механизма на линии подачи хладагента. Статическая ошибка регулирования температуры отсутствует.

На рис. 6 приведены примеры переходных процессов управления в замкнутой

системе при ступенчатом изменении параметрического возмущения по коэффициенту теплопередачи K_T на -20% от значения в статике ($\Delta K_T = -0,2K_T^0$). В данном случае имеет место статическая ошибка регулирования температуры. Устранение статической ошибки возможно путем синтеза астатического алгоритма управления с интегральной составляющей [5].

Выводы. Предложенный вариант синтеза системы управления тепловым режимом химического реактора с применением структуры системы каскадного типа и полученные нелинейные алгоритмы управления для главного и вспомогательного регуляторов каскадной системы с использованием нелинейной математической модели объекта без применения процедуры линеаризации являются существенным преимуществом при синтезе системы автоматического управления на стадии проектирования при отсутствии физического объекта управления.

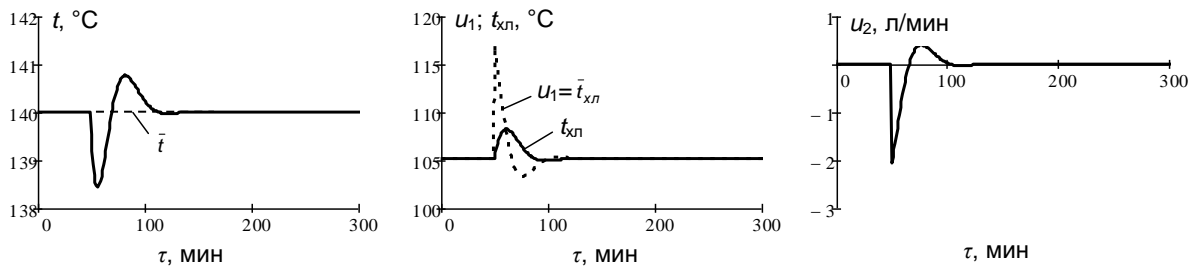


Рис. 4. Переходные процессы в замкнутой системе при начальном отклонении переменной состояния C_A от статики на -20%

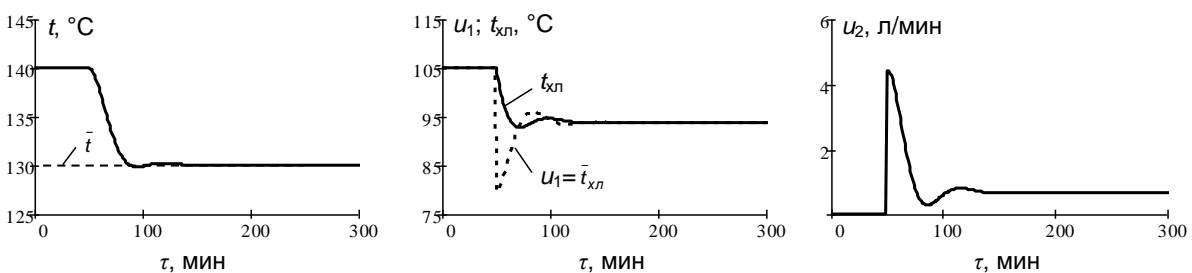


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутой системе при ступенчатом изменении заданного значения температуры на -10 °С

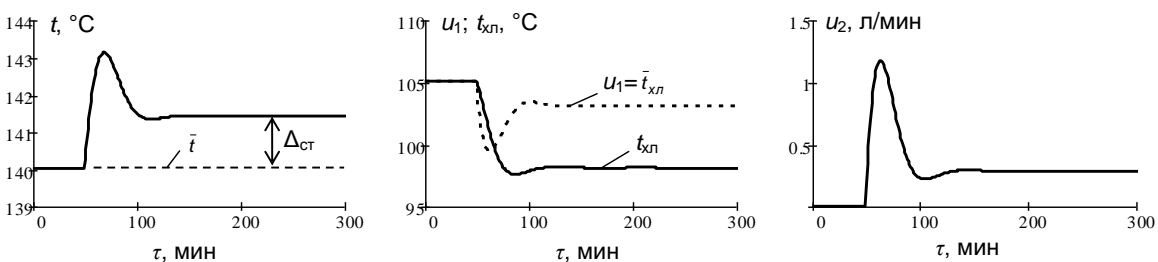


Рис. 6. Переходные процессы в замкнутой системе при ступенчатом изменении параметра K_T на -20%

Принципиальное отличие предлагаемого подхода к синергетическому синтезу системы автоматического управления тепловым режимом реактора от «классического» подхода (АКАР на основе последовательного введения инвариантных многообразий) заключается в следующем. При использовании «классического» метода АКАР реализуется каскадный синтез системы автоматического управления, при котором происходит динамическая декомпозиция модели с уменьшением ее размерности на единицу после первого этапа синтеза (определения внешнего управления, переводящего объект на первое инвариантное многообразие). На втором этапе определяется закон изменения внутреннего управления, обеспечивающий движение объекта вдоль первого многообразия в конечное состояние. В предлагаемом подходе предварительно осуществляется декомпозиция объекта и, следовательно, динамической модели на две соподчиненные подсистемы. На первом этапе определяется внутреннее управление, переводящее объект в заданное конечное состояние, а на втором – внешнее управление, обеспечивающее вычисленное значение внутреннего.

Ошибка регулирования в статике при параметрическом возмущении ΔK_T может быть уменьшена за счет увеличения скорости изменения u_1 , т.е. уменьшения T_1/T_2 или введения интегральной составляющей в алгоритм управления.

В целом синтезированная система автоматического управления тепловым режимом оказалась работоспособной и может быть рекомендована к применению при реализации реакций произвольного типа.

Список литературы

1. **Gordeev L.S., Labutin A.N., Gordeeva E.L.** Optimal synthesis of multiproduct resource-conserving reactor systems // *Theor. Found. Chem. Eng.* – 2014. – V. 48, no. 5. – P. 637–643. doi: 10.1134/S0040579514050170.
2. **Chitturi A., Ravi P.S.** PID control of integrating systems using Multiple Dominant Pole-placement method // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. – 2015. – V. 10, no. 5. – P. 734–742.
3. **Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors / D. Krishna, K. Suryanarayana, G. Aparna, R.P. Sree** // *Indian Chemical Engineer*. – 2012. – V. 54, no. 3. – P. 157–179.

4. **Тютиков В.В., Воронин А.И.** Анализ влияния нулей передаточной функции объекта на параметрическую чувствительность систем, синтезированных по методу АКАР // *Вестник ИГЭУ*. – 2012. – Вып. 2. – С. 48–51.

5. **Тютиков В.В., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В.** Условия параметрической грубости САУ с регуляторами состояния // *Известия ТРТУ*. – 2005. – № 1(45). – С. 53–62.

6. **Колесников А.А.** Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

7. **Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А.** Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2016. – Т. 17, № 10. – С. 657–669.

8. **Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В.** Робастное управление температурным режимом химического реактора // *Информатика и системы управления*. – 2018. – № 3. – С. 115–123. doi: 10.22250/isu.2018.57.115-123.

9. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.

References

1. **Gordeev, L.S., Labutin, A.N., Gordeeva, E.L.** Optimal synthesis of multiproduct resource-conserving reactor systems. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 637–643. doi: 10.1134/S0040579514050170.
2. **Chitturi, A., Ravi, P.S.** PID control of integrating systems using Multiple Dominant Pole-placement method. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 10, no. 5, pp. 734–742.
3. **Krishna, D., Suryanarayana, K., Aparna, G., Sree, R.P.** Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors. *Indian Chemical Engineer*, 2012, vol. 54, no. 3, pp. 157–179.
4. **Tyutikov, V.V., Voronin, A.I.** Analiz vliyaniya nuley peredatochnoy funktsii ob'ekta na parametriceskuyu chuvstvitel'nost' sistem, sintezirovannykh po metodu AKAR [Analysis of the influence of zeros of the object transfer function on parametric sensitivity of the systems synthesized by the ADAR method]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 48–51.
5. **Tyutikov, V.V., Kotov, D.G., Tararykin, S.V.** Usloviya parametriceskoy grubosti SAU s regulatorami sostoyaniya [Parametric roughness conditions of the ACS with state regulators]. *Izvestiya TRTU*, 2005, no. 1 (45), pp. 53–62.
6. **Kolesnikov, A.A.** *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* [Synergetic theory of control]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 344 p.
7. **Kolesnikov, A.A., Kolesnikov, Al.A., Kuz'menko, A.A.** Metody AKAR i AKOR v zadachakh sinteza nelineynykh sistem upravleniya [Methods of analytical design of aggregated

regulators (ADAR) and analytical design of optimal regulators (ADOR) in the problems of synthesis of nonlinear control systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 657–669.

8. Labutin, A.N., Nevinitsyn, V.Yu., Volkova, G.V. Robustnoe upravlenie temperaturnym rezhimom khimicheskogo reaktora [Robust

control of chemical reactor temperature regime]. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2018, no. 3, pp. 115–123. doi: 10.22250/isu.2018.57.115-123.

9. Rotach, V.Ya. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2004. 400 p.

Лабутин Александр Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры технической кибернетики и автоматизации, адрес: г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, кор. Д, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: lan@isuct.ru

Labutin Aleksandr Nikolayevich,

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Engineering Cybernetics and Automation Department, address: Ivanovo, Sheremetevsky, No. 7, building D, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: lan@isuct.ru

Невиницын Владимир Юрьевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики и автоматизации, адрес: г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, кор. Д, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: nevinitsyn@gmail.com

Nevinitsyn Vladimir Yuryevich,

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Engineering Cybernetics and Automation Department, address: Ivanovo, Sheremetevsky, No. 7, building D, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: nevinitsyn@gmail.com

Волкова Галина Витальевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики и автоматизации, адрес: г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, кор. Д, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: konf_gv@mail.ru

Volkova Galina Vitalyevna,

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Engineering Cybernetics and Automation Department, address: Ivanovo, Sheremetevsky, No. 7, building D, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: konf_gv@mail.ru

Панасенкова Анастасия Валерьевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», магистрант кафедры технической кибернетики и автоматизации, адрес: г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, кор. Д, телефон (4932) 32-72-26, e-mail: trafalgar322@gmail.com

Panasenkova Anastasia Valeryevna,

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Master course student of the Engineering Cybernetics and Automation Department, address: Ivanovo, Sheremetevsky, No. 7, building D, telephone (4932) 32-72-26, e-mail: trafalgar322@gmail.com

Зайцев Виктор Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий, адрес: г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 10, кор. Б, телефон (4932) 32-74-15, e-mail: z-viktor-a@mail.ru

Zaitsev Viktor Aleksandrovich,

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Information Technologies Department, address: Ivanovo, Sheremetevsky, No. 10, building B, telephone (4932) 32-74-15, e-mail: z-viktor-a@mail.ru