

## Раздел 8. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 66.011:681.51

УПРАВЛЕНИЕ РЕАКТОРНЫМ УЗЛОМ  
С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОДАЧЕЙ ИСХОДНОГО РЕАГЕНТАНевиницын Владимир Юрьевич (*nevinityn@gmail.com*)

Лабутин Александр Николаевич

Деветьяров Андрей Николаевич

Волкова Галина Витальевна

ФБГОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

В работе решена задача синтеза векторной системы управления температурным режимом и концентрацией целевого компонента в каскаде реакторов идеального смешения с распределенной подачей общего реагента при реализации последовательно-параллельной реакции.

**Ключевые слова:** реакторный узел, нелинейный регулятор, синергетическая система управления, аттрактор, инвариантное многообразие, макропеременная, компьютерное моделирование.

Реакторная подсистема во многих случаях является центральной в общей схеме превращения исходных реагентов в целевые продукты и в существенной степени определяет ресурсо- и энергосбережение, экономическую эффективность производственного процесса в целом, степень удовлетворения спроса потребителей на те или иные продукты [1-3].

Современным, научно обоснованным подходом к проектированию реакторных систем является интегрированный подход, предполагающий совместное проектирование непосредственно аппаратно-технологического оформления реакторного узла и системы управления узлом [4]. Согласно этой концепции, на стадии проектирования химического производства решается задача оптимального синтеза реакторного узла и задача синтеза алгоритмов управления процессом, а на стадии эксплуатации подзадача организации оптимального функционирования объекта в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений.

В силу того, что химические реакторы как объекты управления являются многомерными, многосвязными и нелинейными, использование линейных систем автоматического управления не позволяет обеспечить работоспособность комплекса «реакторный узел – подсистема управления» при существенных возмущениях и, соответственно, отклонениях переменных состояния от номинальных значений. Перспективным способом разработки алгоритмов управления динамическими объектами такого класса является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который предполагает разработку и реализацию способа направленной целевой самоорганизации диссипативных нелинейных систем «объект – регулятор». При этом цель движения системы формулируется в виде желаемого инвариантного многообразия в фазовом пространстве объекта, выполняющего роль целевого аттрактора  $\psi_S(x_1, \dots, x_n) = 0$ ,  $S = 1, \dots, m$  [5].

В общем виде задача синергетического синтеза системы управления формулируется следующим образом: необходимо найти закон управления  $u = (u_1, \dots, u_m)^T$  как функцию переменных состояния объекта  $u_1(x_1, \dots, x_n)$ , ...,  $u_m(x_1, \dots, x_n)$ , который переводит изображающую точку системы в фазовом пространстве из произвольного начального состояния в окрестности задаваемых инвариантных многообразий и дальнейшее движение вдоль пересечения многообразий в некоторую стационарную точку или в некоторый динамический режим. В приведенных выражениях  $n$  – размерность вектора состояния,  $m$  – число внешних управлений. На траектории движения должен достигаться минимум критерия оптимальности системы:

$$J = \int_0^{\infty} \left[ \sum_{S=1}^m \left( T_S^2 \dot{\psi}_S^2 + \psi_S^2 \right) \right] dt. \quad (1)$$

Множество устойчивых экстремалей, доставляющих минимум функционалу (1), задается уравнением

$$T_S \dot{\psi}_S + \psi_S = 0, \quad S = 1, \dots, m. \quad (2)$$

Условие асимптотической устойчивости системы в целом имеет вид  $T_S > 0$ . Уравнение (2) носит название основного функционального уравнения метода АКАР.

Эффективность алгоритмов управления нелинейными объектами, синтезированных методами синергетической теории управления (метод АКАР), показана в ряде работ [6-9]. Например, в работе [9] решена задача синергетического синтеза нелинейной скалярной системы управления концентрацией целевого компонента в каскаде изотермических реакторов идеального смешения с секционированной подачей общего реагента в аппараты.

В настоящей работе решается задача аналитического синтеза нелинейной векторной системы управления температурным режимом и концентрацией целевого компонента в каска-

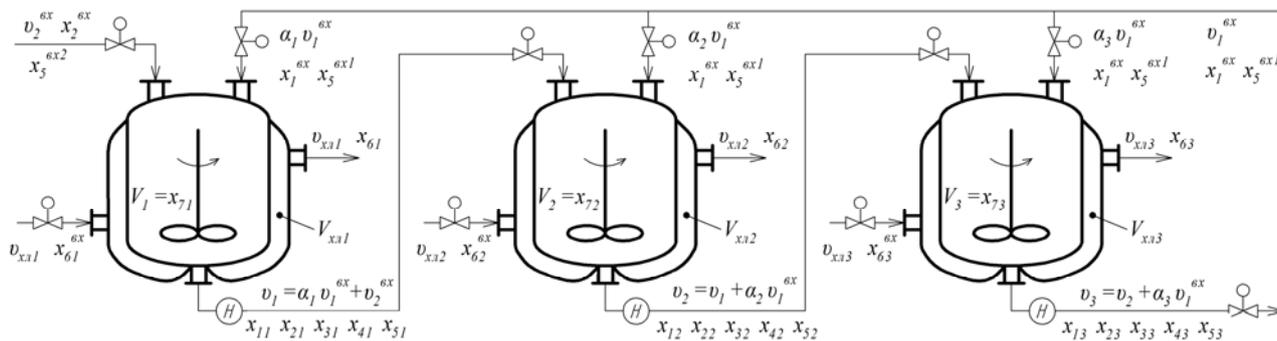
де химических реакторов идеального смешения с секционированной подачей общего реагента в аппараты (рис. 1). В реакторном узле реализу-



где  $A$  и  $B$  – исходные реагенты,  
 $P_1, P_2, P_3$  – продукты реакции,  
 $k_1, k_2, k_3$  – константы скоростей стадий.

ется многостадийная последовательно-параллельная реакция:

Целевым компонентом является вещество  $P_2$ . В общем случае при изменении спроса на продукты реакции целевым может быть и другой компонент или смесь ряда веществ.



**Рисунок 1. Принципиальная схема реакторного узла с секционированной подачей общего реагента**

На рис. 1 введены следующие обозначения:

$x_1^{ex}, x_2^{ex}$  – концентрации исходных реагентов  $A$  и  $B$ ;

$v_1^{ex}, v_2^{ex}$  – расходы исходных реагентов на входе в реакторную систему;

$x_5^{ex1}, x_5^{ex2}$  – температуры потоков исходных реагентов;

$\alpha_i, i = 1, \dots, 3$  – доля потока исходного реагента  $A$  на входе в  $i$ -й реактор;

$\alpha_i v_1^{ex}, i = 1, \dots, 3$  – поток реагента  $A$  на входе в  $i$ -й реактор;

$v_i, i = 1, \dots, 3$  – расход реакционной смеси на выходе из  $i$ -го аппарата;

$x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}, i = 1, \dots, 3$  – концентрации компонентов  $A, B, P_1, P_2$  в  $i$ -м реакторе;

$x_{5i}, i = 1, \dots, 3$  – температура реакционной смеси в  $i$ -м реакторе;

$v_{xli}, i = 1, \dots, 3$  – расход хладагента на входе и выходе из  $i$ -го аппарата;

$x_{6i}^{ex}, x_{6i}, i = 1, \dots, 3$  – температуры хладагента на входе и выходе из  $i$ -го аппарата;

$V_i = x_{7i}, i = 1, \dots, 3$  – объем реакционной смеси в  $i$ -м аппарате;

$V_{xli}, i = 1, \dots, 3$  – объем хладагента в рубашке  $i$ -го аппарата.

Целью функционирования реакторного узла является обеспечение на его выходе заданного оптимального значения концентрации целевого вещества (продукт  $P_2$ ).

Для рассматриваемого аппаратного оформления реакторного узла проведена режимно-технологическая оптимизация, в результате которой определены: среднее время пребывания реакционной смеси в аппаратах, температура проведения реакции, соотношение расходов исходных реагентов, доли потока исходного реагента на входе в аппараты, обеспечивающие максимальный выход целевого продукта на выходе реакторной системы.

Математическая модель последнего аппарата реакторного узла при постоянном объеме смеси в аппарате имеет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_{13}}{d\tau} &= R_{13} + \frac{(x_{12} - x_{13})}{V_3} v_2 + \frac{(x_1^{ex} - x_{13})}{V_3} \alpha_3 v_1^{ex}, & \frac{dx_{23}}{d\tau} &= R_{23} + \frac{(x_{22} - x_{23})}{V_3} v_2 - \frac{x_{23}}{V_3} \alpha_3 v_1^{ex}, \\
\frac{dx_{33}}{d\tau} &= R_{33} + \frac{(x_{32} - x_{33})}{V_3} v_2 - \frac{x_{33}}{V_3} \alpha_3 v_1^{ex}, & \frac{dx_{43}}{d\tau} &= R_{43} + \frac{(x_{42} - x_{43})}{V_3} v_2 - \frac{x_{43}}{V_3} \alpha_3 v_1^{ex}, \\
\frac{dx_{53}}{d\tau} &= \frac{(x_{52} - x_{53})}{V_3} v_2 + \frac{(x_5^{ex1} - x_{53})}{V_3} \alpha_3 v_1^{ex} + x_{13} (\lambda_1 k_1 x_{23} + \lambda_2 k_2 x_{33} + \lambda_3 k_3 x_{43}) - \beta_{13} x_{53} + \beta_{13} x_{63}, \\
\frac{dx_{63}}{d\tau} &= \frac{(x_{63}^{ex} - x_{63})}{V_{x13}} v_{x13} + \beta_{23} (x_{53} - x_{63}),
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $\lambda_i = \Delta H_i / (\rho C)$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ;

$$\beta_{13} = K_T F_{T3} / (V_3 \rho C);$$

$$\beta_{23} = K_T F_{T3} / (V_{x13} \rho_{x1} C_{x1});$$

$\Delta H_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – тепловой эффект соответствующей стадии реакции;

$\rho$ ,  $C$  – плотность и теплоемкость реакционной смеси;

$\rho_{x1}$ ,  $C_{x1}$  – плотность и теплоемкость хладагента;

$K_T$  – коэффициент теплопередачи через стенку аппарата;

$F_{T3}$  – поверхность теплообмена третьего аппарата каскада;

$$k_i = k_{i0} \cdot \exp(-E_i / R(x_{51} + 273)), \quad i = 1, \dots, 3$$

– константы скоростей стадий;

$k_{i0}$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – постоянный множитель (предэкспонента) констант скоростей стадий;

$E_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – энергия активации соответствующей стадии реакции;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$$R_{13} = -k_1 x_{13} x_{23} - k_2 x_{13} x_{33} - k_3 x_{13} x_{43},$$

$$R_{23} = -k_1 x_{13} x_{23},$$

$$R_{33} = k_1 x_{13} x_{23} - k_2 x_{13} x_{33},$$

$$R_{43} = k_2 x_{13} x_{33} - k_3 x_{13} x_{43} \text{ – скорость реакции}$$

по компонентам.

Математические модели первого и второго аппаратов реакторного узла записываются аналогичным образом.

Принимая во внимание цель функционирования реакторного узла, задачу системы управления технологическим объектом можно сформулировать следующим образом: стабилизация концентрации целевого вещества в выходном потоке и поддержание оптимального температурного режима в аппаратах в условиях действия на объект внешних и внутренних возмущений.

Анализ структуры математической модели объекта (4) показывает, что в качестве регули-

рующего воздействия для стабилизации концентрации целевого вещества на выходе реакторного узла может быть выбрана подача исходного реагента  $A$  на вход в третий аппарат каскада – поток  $\alpha_3 v_1^{ex}$ . Причем, принимая во внимание кинетические закономерности реализуемой в аппаратах реакции (вид зависимости  $R_{43}$ ) и структуру правых частей системы (4), непосредственное изменение величины  $\alpha_3 v_1^{ex}$  будет приводить к изменению концентрации  $x_{13}$ , которая, в свою очередь, оказывают влияние на регулируемую переменную  $x_{43}$ .

Управляющими воздействиями для стабилизации температурного режима в аппаратах являются величины расходов хладагента  $v_{x1i}$ , подаваемые в теплообменные рубашки реакторов. При этом, из структуры уравнений теплового баланса третьего аппарата (4) следует, что непосредственное изменение  $v_{x13}$  ведет к изменению температуры  $x_{63}$ , которая оказывает влияние на регулируемую переменную  $x_{53}$ . Данное утверждение справедливо и для первых двух аппаратов реакторной системы. Таким образом, каналы регулирования концентрации и температуры в многомерной векторной системе управления примут вид:

$$\begin{aligned}
u_1 &\rightarrow x_{13} \rightarrow x_{43}, \\
u_2 &\rightarrow x_{61} \rightarrow x_{51}, \\
u_3 &\rightarrow x_{62} \rightarrow x_{52}, \\
u_4 &\rightarrow x_{63} \rightarrow x_{53},
\end{aligned} \tag{5}$$

где  $u_1 = \alpha_3 v_1^{ex}$ ;  $u_2 = v_{x11}$ ;  $u_3 = v_{x12}$ ;  $u_4 = v_{x13}$ .

Согласно общепринятой методике синтеза алгоритмов управления многомерными объектами [10], на первом этапе осуществляется синтез закона управления в предположении, что измеряются (наблюдаются) все переменные состояния. На втором этапе, если это необходимо, синтезируется наблюдатель, позво-

ляющий оценить вектор состояния по измеряемому выходу.

Учитывая структуру математической модели реакторного узла (4) и каналы управления объектом (5), используем метод АКАР на основе параллельно-последовательной совокупности инвариантных многообразий [5].

Рассмотрим процедуру синергетического синтеза векторного регулятора методом АКАР для объекта (4). Поскольку каналы управления температурой для всех аппаратов реакторного узла аналогичны и структура математических моделей реакторов в каскаде одинакова, то процедура синтеза соответствующих законов управления температурным режимом в аппаратах будет совпадать. Ниже приводится вывод алгоритма управления температурой только для третьего аппарата каскада (канал  $u_4 \rightarrow x_{63} \rightarrow x_{53}$ ).

На первом шаге вводятся в рассмотрение инвариантные многообразия (аттракторы), определяющие заданные соотношения между регулируемыми переменными  $x_{43}$ ,  $x_{53}$  и переменными состояния  $x_{13}$ ,  $x_{63}$ , выступающими в качестве «внутренних» управлений.

Зададим инвариантные многообразия в виде:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_{13} + v_1(x_{43}) = 0, \\ \psi_2 &= x_{63} + v_2(x_{53}) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $v_1(x_{43})$ ,  $v_2(x_{53})$  – некоторые функции, подлежащие определению в ходе дальнейшей процедуры синергетического синтеза. Согласно методу АКАР, векторный закон управления  $u = (u_1, u_4)^T$  синтезируется таким образом, чтобы осуществлялся перевод изображающей точки системы в фазовом пространстве из произвольного начального положения на пересечение притягивающих многообразий  $\psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$ .

Макропеременные  $\psi_i$ ,  $i = 1, 2$  должны удовлетворять решению основного функционального уравнения метода АКАР (2). Для поиска управления  $u = (u_1, u_4)^T$  подставим макропеременные  $\psi_i$ ,  $i = 1, 2$  в функциональное уравнение (2). В результате получим следующие выражения:

$$T_1 \left[ \frac{dx_{13}}{d\tau} + \frac{\partial v_1}{\partial x_{43}} \cdot \frac{dx_{43}}{d\tau} \right] + x_{13} + v_1 = 0, \quad T_2 \left[ \frac{dx_{63}}{d\tau} + \frac{\partial v_2}{\partial x_{53}} \cdot \frac{dx_{53}}{d\tau} \right] + x_{63} + v_2 = 0. \quad (7)$$

В силу уравнений объекта (4) эти выражения примут вид:

$$\begin{aligned} T_1 \left[ R_{13} + \frac{(x_{12} - x_{13})}{V_3} v_2 + \frac{(x_1^{ex} - x_{13})}{V_3} u_1 + \frac{\partial v_1}{\partial x_{43}} \cdot \left( R_{43} + \frac{(x_{42} - x_{43})}{V_3} v_2 - \frac{x_{43}}{V_3} u_1 \right) \right] + x_{13} + v_1 &= 0, \\ T_2 \left[ \frac{(x_{63}^{ex} - x_{63})}{V_{x_{63}}} u_4 + \beta_{23}(x_{53} - x_{63}) + \frac{\partial v_2}{\partial x_{53}} \cdot \left( f_1 + \frac{(x_5^{ex} - x_{53})}{V_3} u_1 + x_{13} f_2 + \beta_{13} x_{63} \right) \right] + x_{63} + v_2 &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $f_1 = (x_{52} - x_{53})v_2 / V_3 - \beta_{13}x_{53}$ ,  $f_2 = \lambda_1 k_1 x_{23} + \lambda_2 k_2 x_{33} + \lambda_3 k_3 x_{43}$ .

Из (8) получаем выражения для векторного закона управления:

$$\begin{aligned} u_1 &= \left[ -\frac{(x_{13} + v_1)}{T_1} - R_{13} - \frac{(x_{12} - x_{13})}{V_3} v_2 - \frac{\partial v_1}{\partial x_{43}} \cdot \left( R_{43} + \frac{(x_{42} - x_{43})}{V_3} v_2 \right) \right] / \left[ \frac{(x_1^{ex} - x_{13})}{V_3} - \frac{\partial v_1}{\partial x_{43}} \cdot \frac{x_{43}}{V_3} \right], \\ u_4 &= \left[ -\frac{(x_{63} + v_2)}{T_2} - \beta_{23}(x_{53} - x_{63}) - \frac{\partial v_2}{\partial x_{53}} \cdot \left( f_1 + \frac{(x_5^{ex} - x_{53})}{V_3} u_1 + x_{13} f_2 + \beta_{13} x_{63} \right) \right] / \left[ \frac{(x_{63}^{ex} - x_{63})}{V_{x_{63}}} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Управления  $u_1$ ,  $u_4$  переводят изображающую точку системы в фазовом пространстве на пересечение многообразий  $\psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$ , на

котором реализуются связи  $x_{13} = -v_1$ ,  $x_{63} = -v_2$  и наблюдается эффект «сжатия фазового пространства», т.е. снижение размерно-

сти системы уравнений (4). Уравнения декомпозированной системы с учетом соотношений

$$\begin{aligned} \frac{dx_{23}}{d\tau} &= R_{23}^* + \frac{(x_{22} - x_{23})}{V_3} v_2 - \frac{x_{23}}{V_3} u_1, & \frac{dx_{33}}{d\tau} &= R_{33}^* + \frac{(x_{32} - x_{33})}{V_3} v_2 - \frac{x_{33}}{V_3} u_1, \\ \frac{dx_{43}}{d\tau} &= v_1(k_3 x_{43} - k_2 x_{33}) + \frac{(x_{42} - x_{43})}{V_3} v_2 - \frac{x_{43}}{V_3} u_1, & \frac{dx_{53}}{d\tau} &= f_1 + \frac{(x_5^{ex1} - x_{53})}{V_3} u_1 - v_1 f_2 - v_2 \beta_{13}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $R_{23}^* = k_1 v_1 x_{23}$ ,  $R_{33}^* = k_2 v_1 x_{33} - k_1 v_1 x_{23}$ . Обозначения  $f_1$  и  $f_2$  соответствуют принятым для выражений (8).

Функции  $v_i$ ,  $i = 1, 2$  в декомпозированной системе (10) играют роль «внутренних» управлений, под воздействием которых происходит движение объекта (10) вдоль пересечения многообразий  $\psi_i = 0$ ,  $i = 1, 2$ .

На втором шаге процедуры синергетического синтеза вводятся в рассмотрение инвари-

$x_{13} = -v_1$ ,  $x_{63} = -v_2$  примут вид:

антные многообразия, отражающие технологические требования к системе:

$$\begin{aligned} \psi_3 &= x_{43} - \bar{x}_{43} = 0, \\ \psi_4 &= x_{53} - \bar{x}_{53} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Макропеременные  $\psi_3$ ,  $\psi_4$  удовлетворяют решению основного функционального уравнения метода АКАР (2), в соответствии с которым в силу модели декомпозированной системы (10) будем иметь:

$$\begin{aligned} T_3 \left[ v_1(k_3 x_{43} - k_2 x_{33}) + \frac{(x_{42} - x_{43})}{V_3} v_2 - \frac{x_{43}}{V_3} u_1 \right] + x_{43} - \bar{x}_{43} &= 0, \\ T_4 \left[ f_1 + \frac{(x_5^{ex1} - x_{53})}{V_3} u_1 - v_1 f_2 - v_2 \beta_{13} \right] + x_{53} - \bar{x}_{53} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Выражения для «внутренних» управлений в соответствии с (12) примут вид:

$$\begin{aligned} v_1 &= -\frac{(x_{43} - \bar{x}_{43})}{T_3(k_3 x_{43} - k_2 x_{33})} - \frac{(x_{42} - x_{43})v_2}{V_3(k_3 x_{43} - k_2 x_{33})} + \frac{x_{43} u_1}{V_3(k_3 x_{43} - k_2 x_{33})}, \\ v_2 &= \frac{x_{53} - \bar{x}_{53}}{T_4 \beta_{13}} + \frac{f_1}{\beta_{13}} + \frac{(x_5^{ex1} - x_{53})u_1}{V_3 \beta_{13}} - \frac{v_1 f_2}{\beta_{13}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, векторный закон управления  $u = (u_1, u_4)^T$  третьим аппаратом реакторного узла определяется формулами (9), (13). Параметрами настройки алгоритма, определяющими качество управления в замкнутой системе «реакторный узел – управляющая подсистема», являются величины  $T_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ . Задаваясь их различными значениями, можно изменять длительность переходных процессов регулирования и, соответственно, время регулирования [5]. Причем, параметры  $T_1$  и  $T_3$  отвечают за характер переходных процессов регулирования концентрации, а величины  $T_2$  и  $T_4$  – за характер переходных процессов регулирования температурного режима в третьем аппарате.

Характерной особенностью замкнутой системы является асимптотическая устойчивость в целом по регулируемым переменным  $x_{43}$ ,  $x_{53}$ . Условия асимптотической устойчивости замкну-

той системы в целом имеют вид:  $T_i > 0$ ,  $i = 1, \dots, 4$ . При этом, можно показать, что на заключительном этапе движения замкнутой системы изменение фазовых координат  $x_{43}$ ,  $x_{53}$  при их приближении к притягивающим многообразиям (аттракторам) (11) под воздействием «внутренних» управлений (13) происходит по экспоненциальному (апериодическому) закону [5]. Так, если подставить выражение для  $v_1$  из (13) в уравнение, описывающее изменение переменной  $x_{43}$  в декомпозированной системе (10), то будем иметь:

$$T_3 \frac{dx_{43}}{d\tau} + x_{43} = \bar{x}_{43}. \quad (14)$$

Решение данного уравнения при произвольных начальных условиях и  $T_3 > 0$  носит затухающий характер:  $x_{43} |_{\tau \rightarrow \infty} \rightarrow \bar{x}_{43}$ . Аналогичным

образом можно показать затухающий характер изменения фазовой координаты  $x_{53}$ .

Методика синтеза законов управления температурным режимом для первых двух аппаратов реакторного узла аналогична вышеизложенной. При этом, выражения для управлений  $u_2$  и  $u_3$  легко получить, введя в рассмотрение соответствующие притягивающие многообразия и используя модель первого и второго аппаратов. В целом, в работе получен многомерный векторный алгоритм управления  $u = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$ , реализующий в полном объеме задачу управления объектом, сформулированную выше.

Работоспособность и эффективность синтезированного четырехканального векторного закона управления реакторным узлом определялась путем исследования замкнутой системы «реакторный узел – управляющая подсистема» на асимптотическую устойчивость в целом, инвариантность к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями, грубость. Компьютерное моделирование проводилось при следующих технологических и конструктивных параметрах реакторной системы:

$$\begin{aligned} V_1 = V_2 = V_3 &= 200 \text{ (л)}; \\ V_{xl1} = V_{xl2} = V_{xl3} &= 100 \text{ (л)}; \\ x_1^{ex} &= 19.74 \text{ (моль/л)}; \\ x_2^{ex} &= 10.93 \text{ (моль/л)}; \\ x_5^{ex1} &= 20 \text{ (}^\circ\text{C)}, \\ x_5^{ex2} &= 30 \text{ (}^\circ\text{C)}; \\ x_{61}^{ex} = x_{62}^{ex} = x_{63}^{ex} &= 20 \text{ (}^\circ\text{C)}; \\ v_1^{ex} &= 1.5 \text{ (л/мин)}; \\ v_2^{ex} &= 3.5 \text{ (л/мин)}; \\ \alpha_1 &= 0.33; \\ \alpha_2 &= 0.35; \\ \alpha_3 &= 0.32; \\ v_1 &= 3.995 \text{ (л/мин)}; \\ v_2 &= 4.52 \text{ (л/мин)}; \\ v_3 &= 5 \text{ (л/мин)}; \\ v_{xl1} &= 0.267 \text{ (л/мин)}; \\ v_{xl2} &= 2.992 \text{ (л/мин)}; \end{aligned}$$

$$v_{xl3} = 2.596 \text{ (л/мин)};$$

$$F_T = 1.5 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$K_T = 12 \text{ (кДж/[м}^2\text{·мин·К)}];$$

$$\rho = 0.9 \text{ (кг/л)};$$

$$C = 2 \text{ (кДж/[кг·К)}];$$

$$\rho_{xl} = 1 \text{ (кг/л)};$$

$$C_{xl} = 4.18 \text{ (кДж/[кг·К)}];$$

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 97 \text{ (кДж/моль)};$$

$$\text{энергия активации } E_1 = 48635 \text{ (Дж/моль)};$$

$$\text{предэкспоненциальный множитель константы скорости } k_1 \quad k_{10} = 109860 \text{ (л/[моль·мин)}];$$

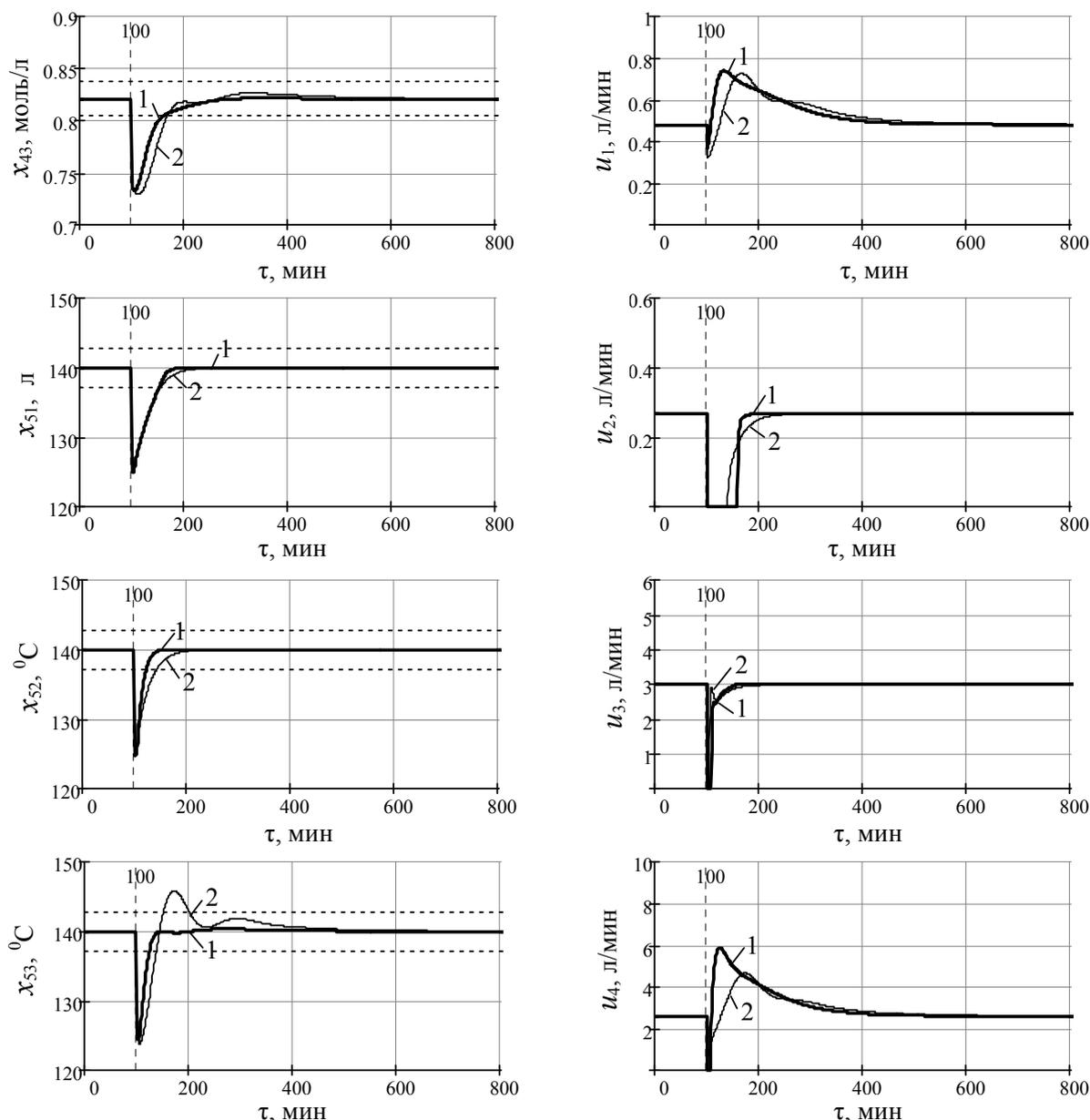
$$\text{соотношения констант скоростей последовательных стадий } k_2/k_1 = 2, \quad k_3/k_1 = 2.5;$$

$$\text{заданное значение концентрации целевого продукта } P_2 \text{ на выходе реакторного узла } \bar{x}_{43} = 0.821 \text{ (моль/л)};$$

$$\text{заданное значение температуры реакционной смеси в аппаратах } \bar{x}_{51} = \bar{x}_{52} = \bar{x}_{53} = 140 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

При моделировании предполагалось, что измеряются все переменные состояния объекта, либо синтезирован наблюдатель, позволяющий оценить вектор состояния по измеряемым выходным переменным. Исходя из физического смысла, при моделировании системы на управляющие воздействия были наложены ограничения.

В качестве примера, на рис. 2 представлен вариант переходных процессов регулирования в замкнутой системе «реакторный узел – векторная подсистема управления» при начальном отклонении переменных состояния объекта от статики на величины  $\Delta x_{i,j}^0 = -0.1x_{i,j}^0$ ,  $i = 1, \dots, 6$ ,  $j = 1, \dots, 3$  и различных параметрах векторного регулятора. Параметры настройки (величины  $T_i$ ) регуляторов температурного режима для всех аппаратов каскада принимались одинаковыми. Для наглядности, переходные процессы до момента приложения входного воздействия ( $\tau = 100$  (мин)) приводятся в статическом режиме.



**Рисунок 2. Переходные процессы выходных переменных и управлений в замкнутой системе «реакторный узел – векторный закон управления» при начальном отклонении**

**переменных состояния от статики  $\Delta x_{i,j}^0 = -0.1x_{i,j}^0$ ,  $i=1, \dots, 6$ ,  $j=1, \dots, 3$ ;**

**1 –  $T_1=T_3=20$  (для  $u_1$ ),  $T_2=T_4=5$  (для  $u_2, u_3, u_4$ ); 2 –  $T_1=T_3=40$  (для  $u_1$ ),  $T_2=T_4=10$  (для  $u_2, u_3, u_4$ )**

Результаты компьютерного моделирования замкнутой системы управления реакторным узлом при использовании синтезированного векторного нелинейного закона и различных входных воздействиях показали асимптотическую устойчивость комплекса «реакторный узел – управляющая подсистема» в целом, инвариантность к возмущениям и ковариантность с задающими воздействиями, а также грубость при условии полной наблюдаемости объекта.

Таким образом, в настоящей работе решена задача синтеза многомерной системы управления тепловым режимом и концентрацией целевого компонента в каскаде реакторов идеально-го смешения с секционированной подачей об-

щего реагента в аппараты для случая функционирования реакторов в политропическом режиме. Показан возможный вариант аналитического синтеза векторного закона управления методом АКАР на основе нелинейной модели объекта. Таким образом, метод АКАР позволяет решать задачу управления в нелинейной постановке с учетом индивидуальных особенностей химических реакторов. Это указывает на перспективность и эффективность синергетического подхода для конструирования новых классов замкнутых систем «реакторный узел – управляющая подсистема».

**Литература**

1. Лабутин А.Н. Оптимальный синтез гибкой реакторной системы / А.Н. Лабутин, А.Е. Исаенков, Г.В. Волкова // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2010. – Т. 53, вып. 12. – С. 125-127.
2. Лабутин А.Н. Режимно-технологическая оптимизация многопродуктовых реакторных систем непрерывного типа / А.Н. Лабутин, П.В. Гриневич, Р.Л. Хализов, М.Е. Сучков // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 1999. – Т. 42, вып. 3. – С. 139-141.
3. Лабутин А.Н. Оптимизация гибких многопродуктовых реакторных систем непрерывного типа // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 1999. – Т. 42, вып. 1. – С. 117-122.
4. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М. Интегрированное проектирование энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических процессов и систем управления: стратегия, методы и применение // Теорет. основы хим. технологии. – 2008. – Т. 42. – № 1. – С. 29-39.
5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
6. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Синтез и моделирование многомерной системы управления каскадом химических реакторов // Изв. вузов. Серия “Экономика, финансы и управление производством”. 2012. № 2. С. 150.
7. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синергетический синтез регулятора концентрации целевого компонента в каскаде химических реакторов // Изв. вузов. Серия “Экономика, финансы и управление производством”. 2011. № 3. С. 86.
8. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синергетический синтез системы управления химическим реактором // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. № 11. С. 104.
9. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Девятьяров А.Н. Система управления каскадом химических реакторов для проведения последовательно-параллельной реакции // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2013. – Т. 56. – Вып. 11. – С. 131-135.
10. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.