

Таким образом, сертификационные испытания на испытательном кольце подтвердили возможность и эффективность вычислительного эксперимента с имитационной моделью для разработки и отладки бортовых систем автоведения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гапанович В.А., Розенберг И.Н. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 4. – С. 5-11.
2. Баранов Л.А., Головичер Л.М., Ерофеев Е.В., Максимов В.И. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
3. Розенфельд В.Е. Исаев И. П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
4. Юренко К.И., Юренко И.К. Имитационное моделирование систем автоведения поездов // Политранспортные системы Сибири: Материалы VI Всерос. НТК, Новосибирск, 21-23 апреля 2009 г.: В 2 ч. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2009. – Ч. 2. – С. 388-391.
5. Никифоров Б.Д., Головин В.И., Кутырев Ю.Г. Автоматизация управления торможением поездов // Автоматизация управления движением поездов. – М.: Транспорт, 1985. – 263 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.

Юренко Константин Иванович – Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт); e-mail: ki-yurenko@yandex.ru; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; тел.: +78635255779; кафедра «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»; к.т.н.; доцент.

Фандеев Евгений Иванович – e-mail: eif@inbox.ru; кафедра «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»; д.т.н.; профессор.

Yurenko Konstantin Ivanovich – South-Russian State Technical University (Novocherkassk Politechnic Institute); e-mail: ki-yurenko@yandex.ru; 132, Prosveshheniya street, Novocherkassk; 346428, Russia; the department "Automation and management of technological processes and productions"; cand. of eng. sc.; associate professor.

Fandeev Evgeny Ivanovich – e-mail: eif@inbox.ru; the department "Automation and management of technological processes and productions"; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.51

Ал.А. Колесников, И.Е. Хариш

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ РАСПРОСТРАНЕННОГО КЛАССА

Рассматривается метод управления автоколебательными режимами химическими объектами распространенного класса. В химии и других отраслях промышленности распространены различные технологические процессы, в которых возникают нелинейные физико-химические реакции. К такому классу объектов относятся дисперсионные системы с химическими реакциями, например в задачах массовой кристаллизации из сложных растворов, процессы осаждения многокомпонентных пленок газовыми методами, процессы электролиза и т.д. В докладе рассматривается задача управления такого класса химическими объектами, описываемыми существенно нелинейными дифференциальными уравнениями. Такие объекты обладают свойством бифуркации и неустойчивости. Целью управления является обеспечение автоколебательных режимов, связанных с сущностью технологических процессов, например выращивание тонких пленок.

Химический объект; автоколебания; управление; нелинейная реакция; синергетическая теория управления.

A.I.A. Kolesnikov, I.E. Harish

SYNTHESIS AND MODELING OF COMMON CLASS OF CHEMICAL OBJECTS CONTROL SYSTEM

In the report we explore the self-oscillating mode control method for common class of chemical objects. In chemistry and other industries the different processes are spread in which a nonlinear physical and chemical reactions exists. Such class of objects are dispersed systems with chemical reactions, such as problems of mass crystallization from solutions of complex, multi-film deposition process gas methods, processes, electrolysis, etc. The report explore the problem of control of the chemical class of objects described by essentially nonlinear differential equations. These objects have the property of bifurcation and instability. The aim of control is to ensure the self-oscillatory modes associated with the nature of processes such as growth of thin films.

Chemical object; self-oscillations; control; nonlinear reaction; synergetics control theory.

В химической и других отраслях промышленности распространены различные технологические процессы, в которых возникают нелинейные физико-химические реакции. К такому классу объектов относятся дисперсные системы с химическими реакциями, например массовой кристаллизации из сложных растворов, процессы осаждения многокомпонентных пленок газовыми методами, процессы электролиза и др. [1–10]. В работе [1] показано, что указанные процессы могут быть представлены следующей общей нелинейной моделью в безразмерных переменных:

$$\begin{aligned}\dot{x}(\tau) &= u - xy^2; \\ \dot{y}(\tau) &= xy^2 - yz; \\ \dot{z}(\tau) &= y - a,\end{aligned}\tag{1}$$

где x , y – исходные вещества; z – продукт химической реакции; u – скорость поступления вещества x , $a = y_0$, $z \geq 0$. Моделью (1) описывается химическая реакция типа $x + y \leftrightarrow z$, т.е. в результате взаимодействия веществ x и y соответствующей концентрации возникает новое вещество z – продукт реакции [1]. Также в работе [1] показано, что система (1) при $z \equiv 0$, т.е. при отсутствии фазовых переходов, имеет следующее решение: $y = ur$, $x = \frac{1}{ur^2}$. При этом, как пока-

зал линейный анализ, особая точка $u_1 = a^3 - 1$ является точкой бифуркации, которая приводит к образованию устойчивого предельного цикла [1].

При определенных постоянных потоках $u < u_1$ система (1) стремится к равновесию, а при $u > u_1$ в ней могут возникать как незатухающие колебания, соответствующие предельному циклу, так и его разрушение, приводящее к неустойчивому «накопительному» режиму [1].

В связи с этим важной задачей является управление колебаниями в системе (1), при этом структура и свойства конечного продукта, например тонких пленок, будут зависеть от амплитуды и периода колебаний. При этом, в частности, возникает вопрос, как изменять внешний поток $u(\tau)$ для того, чтобы максимальное значение концентрации вещества z_{\max} со временем приближалось к ее заданному значению z_s в соответствующем технологическом процессе [1].

В работе [1] задача управления объектом (1) поставлена как задача поддержания на заданном уровне значений локальных максимумов координаты $z(\tau)$ путем соответствующего изменения управления $u(\tau) = u_0 + u_1$, где u_0 – неизвестное зна-

чение внешнего потока вещества x , а $u_1(\tau)$ подлежит определению. Иначе говоря, управлением является функция времени $u_1(\tau)$, а цель управления имеет вид [1]

$$|z_k(\tau) - z_0| \leq \Delta; \quad \Delta > 0,$$

где $z_k(\tau)$ – локальный максимум координаты $z(\tau)$, Δ – заданная величина. В работе [1] поиск функции $u_1(\tau)$ осуществляется на основе управляемого отображения Пуанкаре. Итак, в работе [1] поставлена и решается задача определения управления $u_1(\tau)$ как функции времени.

Поставим задачу управления как задачу синтеза закона управления $u(x, y, z)$ в функции координат состояния технологическими объектами (1). Требуется синтезировать закон управления $u(x, y, z)$, обеспечивающий устойчивый автоколебательный режим изменения координаты $z(\tau)$ в заданном диапазоне. Такая постановка задачи управления общим классом технологических объектов (1), во-первых, обеспечивает достижение указанной цели управления и, во-вторых, является более общей по сравнению с задачей поиска управления в функции времени. Синтезированный закон управления $u(x, y, z)$ должен гарантировать асимптотическую устойчивость замкнутой системы относительно цели при произвольных начальных условиях координат x_0, y_0, z_0 . Перейдем к решению этой задачи управления.

Задача управления объектом (1) состоит в синтезе такого закона управления $u(x, y, z)$ в функции координат x, y, z , который обеспечивает автоколебания концентрации x в определенном диапазоне и с некоторой частотой колебаний. Для решения этой сложной задачи, согласно СТУ [11], имеется несколько подходов, связанных с выбором макропеременных. Из системы (1) следует, что управление u , действуя на $\dot{x}(\tau)$, тем самым, согласно второму уравнению системы (1), через функцию x действует на $\dot{y}(\tau)$, которое, в свою очередь, через y действует, согласно третьему уравнению системы (1), на координату z . Таким образом, можно построить схему синтеза закона управления:

$$u \rightarrow \dot{x}(\tau) \rightarrow x \rightarrow \dot{y}(\tau) \rightarrow y \rightarrow \dot{z}(\tau) \rightarrow z. \quad (2)$$

В зависимости от выбора макропеременных из схемы (2) можно получить разные законы управления, решающие поставленную задачу синтеза.

Для решения поставленной задачи синтеза в соответствии с методом АКАР [12] введем первую макропеременную

$$\psi_1 = xy^2 - v(y, z), \quad (3)$$

где v – внутреннее управление.

Подставим ψ_1 (3) в инвариантное соотношение

$$T_1 \dot{\psi}_1(\tau) + \psi_1 = 0. \quad (4)$$

Тогда с учетом первых двух уравнений объекта (1) из (4) найдем общее выражение для закона управления $u(x, y, z)$:

$$y^2 u = xy^4 - \left(2xy - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \dot{y}(\tau) + \frac{\partial v}{\partial z} \dot{z}(\tau) - \frac{1}{T_1} \psi_1 \quad (5)$$

или с учетом $\dot{y}(\tau)$ и $\dot{z}(\tau)$ из (5) имеем

$$y^2 u = xy^4 - \left(2xy - \frac{\partial v}{\partial y} \right) (xy^2 - yz) + \frac{\partial v}{\partial z} (y - a) - \frac{1}{T_1} \psi_1. \quad (6)$$

Поведение системы на многообразии $\psi_1 = 0$ (3) описывается декомпозированным уравнением

$$\begin{aligned}\dot{y}_\psi(\tau) &= v(y_\psi, z_\psi) - y_\psi z_\psi, \\ \dot{z}_\psi(\tau) &= y_\psi - a.\end{aligned}\quad (7)$$

Для определения внутреннего управления $v(y_\psi, z_\psi)$ введем вторую макропеременную

$$\psi_2 = \dot{z}_1^2(\tau) + \beta z_1^2 - A, \quad (8)$$

где

$$z_1 = z - b. \quad (9)$$

Макропеременная ψ_2 (8) отражает энергию, связанную с изменением координаты z на многообразии $\psi_2 = 0$ (8). Продифференцируем уравнение $\psi_2 = 0$, получим

$$2\ddot{z}_1(\tau)\dot{z}_1(\tau) + 2\beta z_1\dot{z}_1(\tau) = 0$$

или

$$\ddot{z}_{1\psi}(\tau) + \beta z_{1\psi}(\tau) = 0. \quad (10)$$

Подставив (9) в (10), получим

$$\ddot{z}_\psi(\tau) + \beta z_\psi(\tau) = \beta b. \quad (11)$$

Уравнение (11) имеет решение в виде смещенного на величину βb гармонического колебания. Итак, на многообразии $\psi_2 = 0$ (8) координата $z_\psi(\tau)$ имеет вид гармонического колебания, частота и амплитуда которого определяется задаваемыми параметрами $\beta = \omega^2$ и A . В целом, это означает, что выбор макропеременной ψ_2 (8) отвечает существу поставленной технологической задачи.

Перейдем к определению внутреннего управления $v(y, z)$ на основе уравнения (7) и инвариантного соотношения

$$T_2 \dot{\psi}_2(\tau) + \psi_2(y - a)^2 = 0. \quad (12)$$

Подставив в (12) макропеременную ψ_2 (8) на основе уравнений (7), получаем выражение:

$$\begin{aligned}2(v - y_\psi z_\psi)(y_\psi - a) + 2\beta(z_\psi - b)(y_\psi - a) + \\ + \frac{(y_\psi - a)^2}{T_2} \left[(y_\psi - a)^2 + \beta(z_\psi - b)^2 - A \right] = 0,\end{aligned}$$

из которого находим

$$v(y_\psi, z_\psi) = y_\psi z_\psi - \beta(z_\psi - b) - \frac{1}{T_2}(y_\psi - a) \left[(y_\psi - a)^2 + \beta(z_\psi - b)^2 - A \right]. \quad (13)$$

Из выражения (13) имеем:

$$\frac{\partial v}{\partial y_\psi} = z_\psi - \frac{1}{2T_2} \left[3(y_\psi - a)^2 + \beta(z_\psi - b)^2 - A \right] \quad (14)$$

и

$$\frac{\partial v}{\partial z_\psi} = y_\psi - \frac{1}{T_2}(y_\psi - a)(z_\psi - b) - \beta. \quad (15)$$

Подставив (14) и (15) в (5), находим общий закон управления:

$$y^2 u = xy^4 - (xy^2 - zy) \left[2xy - z + \frac{3}{2T_2}(y-a)^2 + \frac{\beta}{2T_2}(z-b)^2 - \frac{A}{2T_2} \right] + (y-a) \left[y - \frac{1}{T_2}(y-a)(z-b) - \beta \right] - \frac{1}{T_1} \psi_1. \quad (16)$$

Закон управления u (16) в полной мере решает поставленную задачу устойчивых гармонических колебаний координаты $z(\tau)$, что и решает важную технологическую задачу управления колебательными режимами роста тонких пленок и других аналогичных процессов.

На рис. 1–5 приведены результаты моделирования замкнутой системы (1), (16). Эти результаты подтверждают эффективность предложенного здесь подхода к решению сложной нелинейной технологической задачи. Изменяя параметры b , β и A , можно получить разные режимы колебательных процессов.

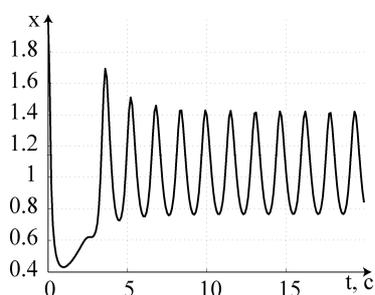
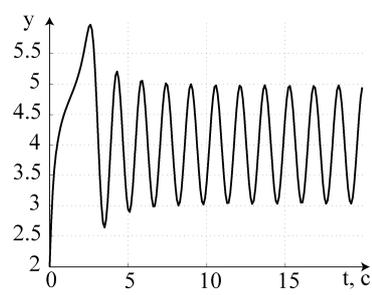
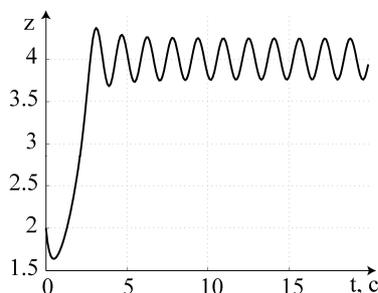
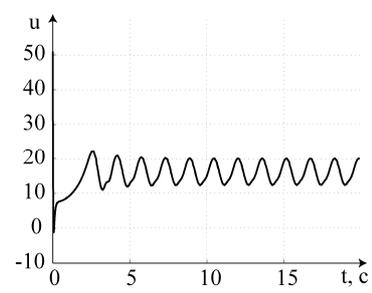
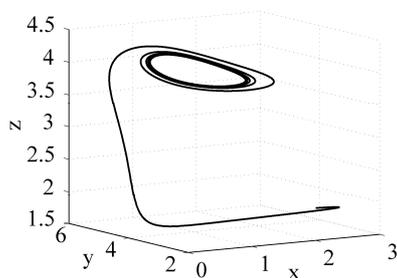
Рис. 1. Изменение координаты $x(\tau)$ Рис. 2. Изменение координаты $y(\tau)$ Рис. 3. Изменение координаты $z(\tau)$ Рис. 4. Изменение управления $u(\tau)$ 

Рис. 5. Фазовый портрет

Таким образом, в этом докладе решена важная прикладная задача синтеза законов управления автоколебательными режимами нелинейных технологических объектов (1), широко применяемых в различных отраслях промышленности. Решение указанной задачи имеет, на наш взгляд, и самостоятельное научное значение с точки зрения развития методов нелинейного системного синтеза в современной теории управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гузенко П.Ю., Кукушкин С.А., Осипов А.В., Фрадков А.Л.* / Под ред. А.Л. Фрадкова. Управление автоколебательными режимами роста тонких пленок // Анализ и управление нелинейными колебательными системами. – СПб.: Наука, 1998. – С. 177-191.
2. *Kukushkin S.A., Osipov A.V.* New phase formation on solid surface and thin film condensation // *Prog. Surf. Sci.* – 1987. – Vol. 51 (1). – P. 1-107.
3. *Kukushkin S.A., Osipov A.V.* Kinetics of thin film nucleation from multicomponent vapor // *J.Ph. Chem. Solids.* – 1995. – Vol. 56 (6). – P. 831-838.
4. *Kukushkin S.A., Osipov A.V.* Morphological stability of islands upon thin film condensation // *Phys. Rev. E.* – 1996. – Vol. 53. – P. 4964-4968.
5. *Кукушкин С.А., Осипов А.В.* Самоорганизация при зарождении многокомпонентных пленок // *ФТТ.* – 1995. – Т. 37, № 7. – С. 2127-2132.
6. *Трофимов В.И., Осадченко В.А.* Рост и морфология тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1993.
7. *Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.Н.* Системный анализ химической технологии. – М.: Наука, 1993.
8. *Кернер Б.С., Осипов В.В.* Самоорганизация в активных распределенных средах // *УФН.* – 1987. – Т. 160, № 9. – С. 1-73.
9. *Гольман Е.К., Гольдрин В.И., Плоткин Д.А., Разумов С.В., Кукушкин С.А., Осипов А.В.* Самоорганизация при зарождении пленок в системе высокотемпературного сверхпроводника Y-Ba-Cu-O // *ФТТ.* – 1997. – Т. 39, № 2. – С. 216-219.
10. *Fradkov A.L., Guzenko P.Yu.* Adaptive Control of Oscillatory and Chaotic Systems Based on Linearization of Poincare Map // *Proc. ECC'97.* 1997. ТН-М 12.
11. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
12. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Колесников Александр Анатольевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: ccsd.office@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, ГСП-284; тел.: 88634360707; доцент.

Хариш Игорь Емельянович – Эссентукский институт управления бизнеса и права; e-mail: vitalij-vx@mail.ru; 357600, г. Эссентуки, ул. Ермолова, 2; тел.: 89286359738; старший преподаватель.

Kolesnikov Aleksandr Anatolyevich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ccsd.office@gmail.com; GSP-284, 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; associate professor.

Harish Igor Emelyanovich – Essentukskiy Institute of Management, Business and Right; e-mail: vitalij-vx@mail.ru; 2, Jermolova street, Essentuki, 357600, Russia; phone: 89286359738; senior teacher.