

УДК 681.51

И.Е. Хариш

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКТОРАМИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Рассматривается сложная задача создания новых методов управления химическими реакторами периодического действия (РПД), представляющими собой нелинейные много-связные объекты. В основу этих методов положена идеология общей синергетической теории управления. Суть новых методов управления сводится к синтезу объективных законов управления, которые наилучшим образом учитывают естественные химические свойства РПД и требования технологической задачи управления. При этом целями синтезируемых систем управления являются желаемые инварианты – аттракторы, отражающие технологические требования. Разработка таких методов является важной проблемой современной прикладной теории управления. Развиваемые в докладе методы охватывают широкий класс химико-технологических процессов. В докладе приведен пример синтеза системы управления распространенными РПД, показавший эффективность развиваемых методов синтеза. Предложенный в докладе метод синтеза объективных законов управления может быть применен для широкого класса химических реакторов, которые применяются в разных областях современной промышленности.

Химический реактор; технологический инвариант; синергохимическая теория управления; синтез закона управления.

I.E. Harish

THE SYNERGETIC METHOD OF THE SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS OVER CHEMICAL BATCH REACTORS

In the report a complex problem of the creation of new control methods over chemical batch reactors (BR) is viewed. Those reactors represent non-linear multilinked objects. An ideology of general synergetic control theory is a basis of these methods. The core of new control methods comes to the synthesis objective control laws that take account of the natural chemical behavior of BR & the aspirations of the technological control task in the best way. At that the aims of the synthesized control systems are the desired invariants – attractors that reflect the technological aspirations. The design of such methods represents an important problem of the modern applied control theory. The methods that are developed in the report include a wide class of chemical-engineering processes. In the report an example of the synthesis of the control system over widespread BR is given, & it illustrates the efficiency of the developed synthesis methods. The method of the objective control laws synthesis suggested in the report can be applied to the wide class of the chemical reactors that are used in different spheres of modern industry.

Chemical reactor; technological invariant; synergetic-chemical control theory; control law synthesis.

Введение. Синергетические методы, основанные на нелинейной динамике и неравновесной термодинамике, позволяют успешно как исследовать разнообразие химико-технологические процессы, так и эффективно управлять ими. Дело в том, что большинство таких процессов являются неравновесными и обладают кооперативными нелинейными эффектами. В качестве примера можно привести знаменитую колебательную реакцию Белоусова – Жаборинского в приточном реакторе с рециклами, концентрационные колебания в процессах с фазовыми превращениями и др. В таких неравновесных системах из химического хаоса могут возникать упорядоченные пространственно-временные диссипативные структуры. Следует подчеркнуть, что методы синергетики – теория самоорганизации – в той или иной конкретной форме уже довольно давно находят практическое применение в химической технологии [1–3]. Однако в этой весьма обширной области науки и промышленности существует фундаментальная проблема поиска *общих объективных законов*

процессов управления, которая сводится к максимальному учету естественных закономерностей нелинейных динамических объектов соответствующей химической природы. Объективные законы управления – это законы, синтезированные на основе наиболее полных нелинейных моделей объектов химической технологии с непосредственным учетом их физико-химических критериев и ограничений.

Иначе говоря, возникает новая сложная проблема создания своего рода *синергохимической теории управления* (СХТУ), которая порождает самостоятельные задачи в тех предметных областях химической технологии, к которым принадлежит соответствующий объект управления.

1. Синтез законов управления реакторами периодического действия. В различных отраслях промышленности широко распространены разнообразные химико-технологические процессы, протекающие в реакторах периодического действия (РПД). Математическим моделям РПД присущи характерные мультипликативные нелинейности, оказывающие определяющее влияние на их статику и динамику. Важной технологической задачей для указанных реакторов является обеспечение желаемых конечных концентраций выходных продуктов, что ведет к повышенным требованиям к качеству управления на заключительных стадиях протекания технологических процессов.

Возникает проблема построения СХТУ, в основу которой целесообразно положить идеологию и методы синергетической теории управления [4, 5]. Это означает, что для синтеза законов синергетического управления химико-технологическими процессами следует использовать такие инвариантные многообразия, на которых наилучшим образом согласуются естественные свойства химического объекта и требования задачи управления. Целями синтезируемых систем управления являются желаемые химические инварианты и аттракторы [4–6]. Разработка такого рода СХТУ представляет собой крупную самостоятельную проблему современной прикладной науки управления.

Для развития основ СХТУ используем метод АКАР, основанный на идеологии синергетической теории управления [4, 5]. В этой связи, следуя известному указанию И. Ньютона, что для развития теории «примеры не менее поучительны, чем правила», рассмотрим характерный пример решения важной самостоятельной задачи синтеза синергетических законов управления типовыми химическими реакторами периодического действия (рис. 1). В реактор поступают потоки растворов некоторых веществ – компоненты G_A и G_B с начальными концентрациями C_{A0} и C_{B0} . С помощью мешалки производится интенсивное перемешивание реагентов, что позволяет усреднить концентрации по объему и использовать модель идеального смешения. В реакторе происходит необратимая химическая реакция соединения второго порядка типа $A + B \rightarrow D$, проводимая в гомогенной фазе с изотермическим превращением.

В процессе химического синтеза необходимо управлять подачей потока G_A для приготовления раствора вещества D в течение желаемого времени.

Математическая модель реактора имеет следующий вид [6]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= \frac{x_{10} - x_1}{x_3} u - kx_1x_2, \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{x_2}{x_3} u - kx_1x_2, \\ \dot{x}_3(t) &= u,\end{aligned}\tag{1}$$

где $x_1 = C_A$, $x_2 = C_B$ – текущие значения концентраций веществ A и B соответственно; $x_3 = V$ – объем (уровень) получаемого продукта D ; $u = \frac{G_A}{S}$ – входной поток вещества A с начальной концентрацией $x_{10} = C_{A0}$; S – площадь сечения реактора.

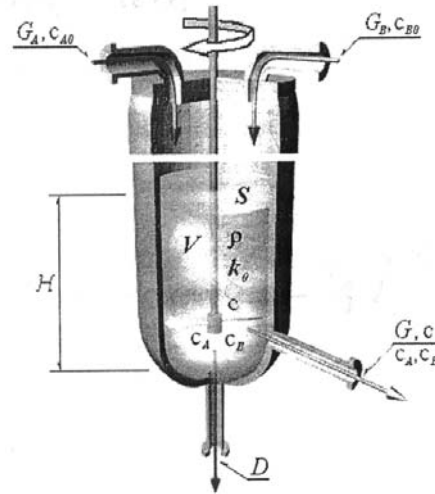


Рис. 1. Химический реактор периодического действия

Иначе говоря, реактор имеет один канал G_A подачи реагента (A), а другой канал после загрузки компонента B закрыт. Можно показать [6, 7], что начальная стадия протекания процессов в реакторе (1) при $U = \text{const}$ характеризуется энергичным вступлением компонентов A и B в химическую реакцию. При этом с убыванием изначально загруженного компонента B происходит процесс накопления подаваемого компонента A , что может привести к неуправляемому возрастанию его концентрации на завершающей стадии. Такое явление обычно недопустимо, так как оно ведет к излишнему загрязнению продукта D исходным компонентом A . В этой связи необходимо изменять поток G_A компонента A таким образом, чтобы на финишной стадии его концентрация уменьшалась вместе с убыванием концентрации ранее загруженного компонента B . Иначе говоря, требуется обеспечить управляемое плавное достижение желаемых конечных концентраций компонентов A и B и, в частности, их нулевых значений. Из уравнений (1) также следует, что при $U = 0$, т.е. при прекращении подачи компонента A , в реакторе происходит неуправляемое естественное завершение химического процесса [6, 7].

Объект (1) включает управление во все уравнения и при $u \neq 0$ обладает статической характеристикой в виде прямой

$$x_1 - x_2 - x_{10} = 0,$$

не зависящей от управления. Это означает, что синтезируемый закон управления $u(x_1, x_2, x_3)$ должен обеспечивать асимптотически устойчивое удержание объекта (1) в одной из точек указанной характеристики.

Поставим задачу синтеза закона управления $u(x_1, x_2, x_3)$, обеспечивающего желаемое значение концентраций $x_1 = x_{1s}$; $x_2 = x_{2s}$, в том числе и $x_{1s} = x_{2s} = 0$. В соответствии с методом АКАР введем следующую макропеременную:

$$\psi_1 = x_1 - \beta x_2 + \lambda A, \quad (2)$$

где $\lambda = \pm 1$, $A < x_{10}$. Тогда, используя функциональное уравнение

$$T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1(t) = 0,$$

в силу уравнений объекта (1) получаем закон управления:

$$u_1 = \frac{(1-\beta)kx_1x_2x_3}{x_{10} - x_1 + \beta x_2} - \frac{x_3\psi_1}{T_1(x_{10} - x_1 + \beta x_2)}. \quad (3)$$

Этот закон обеспечивает неизбежный перевод объекта (1) сначала на многообразии $\psi_1 = 0$ (2), а затем движение вдоль него вплоть до попадания в заданное состояние $x_1 = x_{1s}$; $x_2 = x_{2s}$. Найдем управление (3) и уравнения движения объекта (1) на многообразии $\psi_1 = 0$. Подставив $\psi_1 = 0$ в (3), получим закон управления

$$u_{1\psi} = \frac{(1-\beta)k}{x_{10} + \lambda A} x_{1\psi} x_{2\psi} x_{3\psi}, \quad (4)$$

обеспечивающий движение вдоль многообразия $\psi_1 = 0$ (2), а также и уравнения относительно концентраций:

$$\dot{x}_{1\psi}(t) = -\frac{k\lambda A(x_{10}\beta + \lambda A)}{\beta(x_{10} + \lambda A)} x_{1\psi} - \frac{k}{\beta} \left[\frac{(1-\beta)\lambda A}{x_{10} + \lambda A} + 1 \right] x_{1\psi}^2 - \frac{(1-\beta)k}{\beta(x_{10} + \lambda A)} x_{1\psi}^3, \quad (5)$$

$$\dot{x}_{2\psi}(t) = k\lambda A x_{2\psi} + \left[\frac{(1-\beta)k\lambda A}{x_{10} + \lambda A} - k\beta \right] x_{2\psi}^2 - \frac{\beta(1-\beta)k}{x_{10} + \lambda A} x_{2\psi}^3. \quad (6)$$

Подчеркнем, что уравнения (5) и (6) являются автономными.

В зависимости от выбора величин β , A и λ решения уравнений (5), (6) имеют разный вид. При любой комбинации величин β , A и λ уравнения (5), (6) асимптотически устойчивы относительно желаемых конечных концентраций $x_1 = x_{1s}$; $x_2 = x_{2s}$. Так, например, если $\beta < 1$ и $\lambda = +1$, имеем $x_{1s} = 0$, $x_{2s} > 0$; при $\beta > 1$ и $\lambda = +1$ получаем $x_{1s} > 0$, $x_{2s} > 0$ и т.д. Технологически эти случаи означают, в частности, промежуточный отбор продукта из реактора (рис. 1).

Особым является выбор $\beta = 1$. В этом случае управление $u_{1\psi}$ (4) и уравнения (5), (6) принимают вид

$$\begin{aligned} u_{1\psi} &= 0, \\ \dot{x}_{1\psi}(t) &= -k\lambda A x_{1\psi} - kx_{1\psi}^2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{x}_{2\psi}(t) = k\lambda Ax_{2\psi} - kx_{2\psi}^2. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8), описывающие естественные процессы в реакторе, – это логистические уравнения (соответственно при $\lambda = -1$ и $\lambda = +1$), которые, как известно, имеют транскритическую бифуркацию [5].

Из (7), (8) следует, что конечные значения концентраций равны:

при $\lambda = +1$:

$$x_{1s} = 0, \quad x_{2s} = A,$$

а при $\lambda = -1$:

$$x_{1s} = A, \quad x_{2s} = 0.$$

Очевидно, что при $A = 0$ конечные концентрации $x_{1s} = x_{2s} = 0$, и образуется чистый продукт в результате полного превращения исходных веществ A и B в вещество D .

2. Результаты моделирования. На рис. 2–5 для случая $\beta = 1, A = 0, T_1 = 1, \lambda = 1, k = 0,001 \text{ м}^3/\text{моль} \cdot \text{с}, x_{10} = 20 \text{ моль}/\text{м}^3$ представлены графики переходных процессов замкнутой системы (1), (3) и график изменения управления (3), подтверждающий эффективность синтезированных законов управления. Начальные условия переменных состояния: $x_1(0) = 15 \text{ моль}/\text{м}^3, x_2(0) = 1000 \text{ моль}/\text{м}^3$.

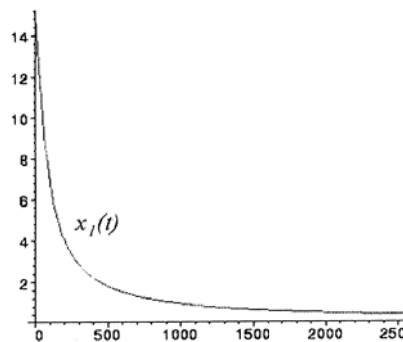


Рис. 2. График изменения $x_1(t)$

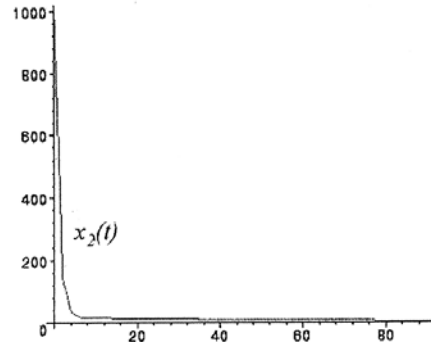


Рис. 3. График изменения $x_2(t)$

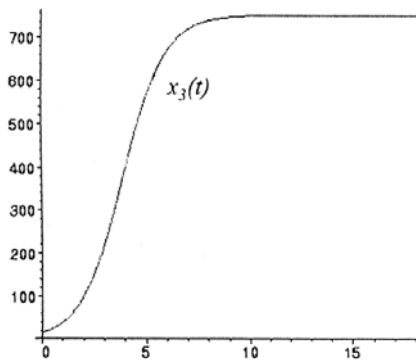


Рис. 4. График изменения $x_3(t)$

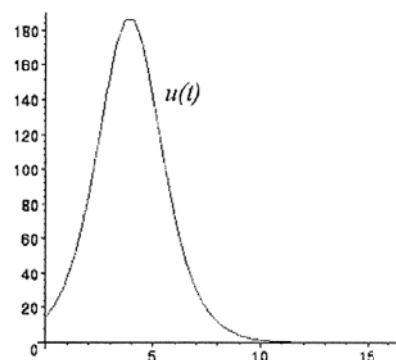


Рис. 5. График изменения $u(t)$

Выберем теперь макропеременную (2) в следующем виде:

$$\psi_2 = x_1 - \beta x_2 + \lambda A + ax_1^3.$$

Тогда, повторив процедуру синтеза, описанную выше, получим закон управления:

$$u_2 = \frac{(1 - \beta + 3ax_1^2)kx_1x_2x_3}{x_{10} - x_1 + \beta x_2 + 3ax_1^2(x_{10} - x_1)} - \frac{x_3\psi_2}{T_2(x_{10} - x_1 + \beta x_2 + 3ax_1^2(x_{10} - x_1))}. \quad (9)$$

Промоделируем систему (1) с законом управления (9) при тех же параметрах ($a = 0,15$) и начальных условиях. На рис. 6–9 представлены графики переходных процессов координат состояния и управления. Из сравнения рис. 5 и 9 следует, что интенсивность управления u_2 (9) уменьшилась, что привело к затягиванию переходных процессов.

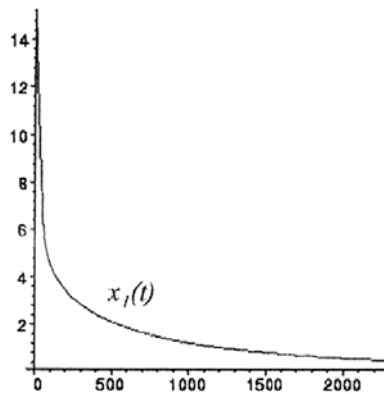


Рис. 6. График изменения $x_1(t)$

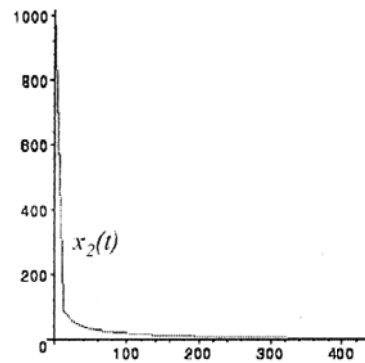


Рис. 7. График изменения $x_2(t)$

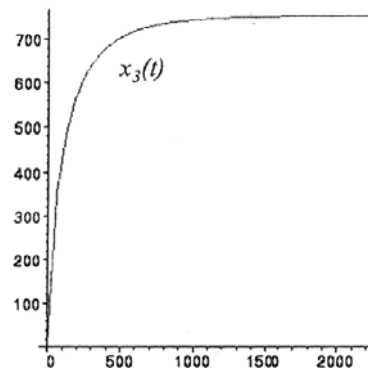


Рис. 8. График изменения $x_3(t)$

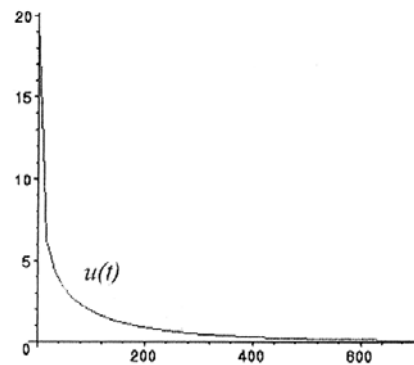


Рис. 9. График изменения $u(t)$

Аналогично можно построить законы управления и другими классами химических реакторов периодического действия.

Таким образом, метод АКАР позволяет осуществить аналитический синтез нового класса синергетических законов управления нелинейными химическими объектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кольцова Э.М., Гордеев Л.С.* Методы синергетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1999.
2. *Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М.* Системный анализ химической технологии. Энтروпийный и вариационный методы неравновесной термодинамики в задачах химической технологии. – М.: Наука, 1988.
3. *Пригожин В.Р., Дефей Р.* Химическая термодинамика. – М.: Наука, 1966.
4. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
5. Современная прикладная теория управления. Ч.II. Синергетический подход в теории управления // Под ред. А.А. Колесникова. ФЦП «Интеграция». – М.–Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
6. *Нейдорф Р.А.* Характерные нелинейные инварианты и математические модели объектов управления химических производств // Современная прикладная теория управления. Ч.III. Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А.А. Колесникова. ФЦП «Интеграция». – М. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
7. *Ковалев П.А.* Анализ задач управления химико-технологическими системами // Проблемы автоматизации и управление производственными системами. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 1999.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.Е. Веселов.

Хариш Игорь Емельянович

НОУ ВПО «Ессентукский институт управления, бизнеса и права».

E-mail: vitalij-vx@mail.ru.

357600, Ставропольский край, г. Ессентуки, ул. Ермолова, 2.

Тел.: 88793462600.

Harish Igor Emelianovich

Essentuki Institute of Control, Business & Law.

E-mail: vitalij-vx@mail.ru.

2, Ermolov Street, Essentuki, Stavropol region, 357600, Russia.

Phone: +78793462600.