

Раздел V. Технологическая безопасность

УДК 681.51

А.А. Колесников

ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

Рассматривается проблема управления нелинейными объектами с динамическим хаосом. В качестве базовой модели такого рода объектов рассматривается знаменитая модель Лоренца, которой описывается широкий класс хаотических объектов разной природы. В статье рассмотрен анализ модели Лоренца и два способа управления – с помощью управляющего параметра и путем внешнего управления. Решение проблемы управления объектами с хаотической динамикой позволит создать принципиально новые системы и устройства в задачах управления и хаосодинамической обработки информации. Указанная проблема является принципиально новой и весьма важной для современной науки о процессах управления.

Хаотическая динамика; управляющий параметр; бифуркация; законы управления.

A.A. Kolesnikov

THE PROBLEM OF INTEGRATED SECURITY OF COMPLEX SYSTEM: SYNERGETICS APPROACH

In the paper we explore the problem of nonlinear objects control with dynamics chaos. As a base model for this kind of objects we explore the famous Lorenz model that describes the wide class of chaotic objects of various natures. In the paper we explore the analysis of Lorenz model and two ways of control: with the control parameter and by external control action. Solution of the problem of chaotic dynamics object control will provide creation of essentially new systems and devices of for control and chaos-dynamical data processing problems. This problem is essentially new and very important for modern science of control processes.

Chaotic dynamics; control parameter; bifurcation; control laws.

Введение. Развитие современной нелинейной науки показало, что во многих сложных природных и технических системах существенную роль играют диссипативные структуры, сопровождаемые бифуркационными и хаотическими явлениями. Хаотические режимы таких систем могут быть как нежелательными, так и требуемыми технологическими процессами. Примером желательности хаотического поведения являются технологии псевдооживления, широко применяемые при сжигании топлива на электростанциях, сушке различных материалов, в химических процессах и др. Нежелательное хаотическое поведение объектов часто возникает в критических режимах их движения, например в летательных аппаратах, энергосистемах и т.д.

В связи с этим возникает принципиально новая проблема управления хаосом, которой уделяется нарастающее внимание в научно-технической литературе [1–3]. В большинстве работ для управления хаосом используются три основных направления: программное управление, периодически возмущающее систему; метод линеаризации отображения Пуанкаре и метод запаздывающей обратной связи [4]. В качестве базовых моделей, в которых возникает хаотическая динамика, обычно выступают модели Лоренца и Рёсслера и некоторые подобные им модели нелинейных объектов.

Проблема управления хаосом еще ждет своего решения и требует развития новых направлений в науке управления. В связи с этим рассмотрим применение метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [5] для решения сложной задачи управления нелинейными объектами с хаотической динамикой на примере модели Лоренца, в которой при отсутствии управления возникают хаотические режимы движения.

1. Модель Лоренца: системный анализ. В синергетике и нелинейной динамике широко распространена модель Лоренца

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sigma y - \sigma x; \\ \dot{y}(t) &= -y + rx - xz; \\ \dot{z}(t) &= -bz + xy,\end{aligned}\tag{1}$$

описывающая в зависимости от значений управляющего параметра r как устойчивые, так и хаотические процессы в различных физических системах.

Модель Лоренца (1) сыграла выдающуюся роль в возникновении новых направлений науки – теории «странных» аттракторов, фрактальной теории и вообще в развитии теории хаоса. Более 40 лет она царствует и правит в мире нелинейной динамики, ей посвящены многие монографии и сотни статей. Флагманская роль модели Лоренца в современной нелинейной науке объясняется чрезвычайной сложностью ее динамики и необычностью поведения при малейшем изменении параметра r . Известный американский математик С. Смейл [6] отнес проблему изучения структуры модели Лоренца даже к одной из главных проблем математики XXI века. В России решению этой проблемы в последнее время посвятили свои работы Н.А. Магницкий и С.В. Сидоров [7], Г.А. Леонов [8], И.В. Зубов [9], Ю.И. Неймарк и П.С. Ланда [10] и др. Указанная проблема трудно разрешима и требует привлечения новых подходов. В связи с этим рассмотрим структуру модели Лоренца с точки зрения системного анализа на основе идеологии метода АКАР.

Запишем модель (1) в виде

$$\begin{aligned}\ddot{x}(t) + (1 + \sigma)\dot{x}(t) + \sigma(1 - r + z)x &= 0, \\ \dot{z}(t) &= -bz + \frac{1}{\sigma}x\dot{x}(t) + x^2.\end{aligned}\tag{2}$$

Добавив и вычтя x^2 в правой части второго уравнения системы (2), перепишем его в виде

$$\dot{z}(t) + bz - x^2 + \left(1 - \frac{b}{2\sigma}\right)x^2 - \frac{1}{\sigma}x\dot{x}(t) = 0.\tag{3}$$

Теперь, введя макропеременную

$$\psi_1 = z - \frac{1}{2\sigma}x^2,\tag{4}$$

на основе (3) и первого уравнения системы (2) запишем модель Лоренца в следующей новой форме:

$$\begin{aligned}\ddot{x}(t) + (1 + \sigma)\dot{x}(t) + \sigma\left(1 - r + \frac{1}{2\sigma}x^2 + \psi_1\right)x &= 0, \\ \dot{\psi}_1(t) + b\psi_1 - \left(1 - \frac{b}{2\sigma}\right)x^2 &= 0.\end{aligned}\tag{5}$$

Полученная форма модели Лоренца (5) позволяет выявить некоторые дополнительные ее особенности. Так, например, если положить

$$b = 2\sigma,\tag{6}$$

то тогда модель Лоренца (5) будет приведена к стандартной форме метода АКАР. В этом случае модель Лоренца, стартуя из любых начальных условий x_0, \dot{x}_0, z_0 при любых значениях «управляющего параметра» r , через время $t = \frac{3+4}{\sigma}$ неизбежно выходит на двумерно-инвариантное многообразие $\psi_1 = 0$ (4), движение вдоль которого описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\ddot{x}_\psi(t) + (1 + \sigma)\dot{x}_\psi(t) + \sigma\left(1 - r + \frac{1}{2\sigma}x_\psi^2\right)x_\psi = 0. \quad (7)$$

Итак, при выполнении параметрического условия (6) модель Лоренца (5) будет представлять собой систему нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка, обладающую двумерным притягивающим многообразием, описываемым уравнением (7). Если в (5) параметр $r \leq 1$, то, согласно (7), система Лоренца (5) обладает асимптотически устойчивым состоянием равновесия: $x_s = \dot{x}_s = z_s = 0$. При $r > 1$ модель Лоренца при условии (6) выходит на аттрактор с бифуркацией типа «вилки»: $x_s = \pm\sqrt{2\sigma(r-1)}$, $z_s = r-1$.

В связи с выявленным здесь важным фактом о существовании при выполнении условия (6) в структуре модели Лоренца двумерного притягивающего многообразия (7) возникает интересный вопрос о реальной размерности так называемого «странного» аттрактора в этой модели. Из-за «странности» поведения модели Лоренца при определенных значениях параметров r, b, σ в литературе рассматриваются разные типы размерности этой модели – фрактальная ($\dim F$), хаусдорфова ($\dim H$), ляпуновская ($\dim L$) и топологическая ($\dim T$) [8]. Между этими размерностями существует соотношение

$$\dim T \leq \dim H \leq \dim F \leq \dim L.$$

В многочисленной литературе доказывается, что фрактальная (нецелочисленная) и хаусдорфова размерности модели Лоренца примерно равны 2,05, а ляпуновская, согласно [8], определяется по формуле

$$\dim L = 3 - \frac{2(\sigma + b + 1)}{\sigma + 1 + \sqrt{(\sigma - 1)^2 + 4r\sigma}}$$

при условии, что выполняются следующие неравенства:

$$\sigma + 1 \geq b \geq 2$$

и

$$r\sigma^2(4-b) + 2\sigma(b-1)(2\sigma-3b) > b(r-1)^2.$$

Это означает, что фрактальная, хаусдорфова и ляпуновская размерности зависят от параметров r, σ и b модели Лоренца. Такое утверждение вызывает некоторое удивление. Дело в том, что обычная топологическая размерность, как известно, от постоянных параметров системы не зависит, а определяется только размерностью дифференциальных уравнений, описывающих поведение соответствующей системы. В самом деле, возникает вопрос: почему в модели Лоренца, именно при выполнении условия (6) никакого хаотического режима не возникает? Ответ на этот вопрос, на наш взгляд, более важен с точки зрения изучения структуры этой модели, чем выявление разного рода ее особенностей при сверхточном задании параметра r , чему посвящены многочисленные публикации в отечественной и зарубежной научной литературе.

В связи с этим процитируем авторов известной монографии [7], в которой наиболее тщательно аналитически и численно исследована модель Лоренца: «Обнаруженное в непрерывных динамических системах нерегулярное, хаотическое

поведение траекторий стали связывать с наличием в системе странного аттрактора. Однако доказательство этого факта непосредственно для знаменитой системы Лоренца, в которой впервые было обнаружено нерегулярное поведение траекторий, столкнулось со значительными трудностями... Многочисленные попытки в течение длительного времени обосновать методами геометрической теории динамических систем наличие странного аттрактора в окрестностях петель сепаратрис «седло – узла» и «седло – фокуса» в системе Лоренца закончились неудачей. Более того, задача показать, совпадает ли поведение решений системы Лоренца с динамикой геометрического аттрактора Лоренца была сформулирована С. Смейлом как одна из 18 наиболее значительных математических проблем XXI века... В системе Лоренца на самом деле нет ни перемежаемости, ни перехода к хаосу через перемежаемость, а всего лишь вследствие погрешностей в вычислениях имеет место перескок траектории с одного фрагмента устойчивого цикла на другой его фрагмент, близко расположенный к нему в фазовом пространстве... За прошедшие сорок лет исследование системы Лоренца было выполнено многими авторами, результаты опубликованы в многочисленных статьях и монографиях, вошли в учебные пособия и университетские курсы, однако полной ясности в том, что из себя представляет аттрактор Лоренца, так и не наступило» [7].

Итак, авторы монографии [7], проведя тщательные аналитические и численные исследования свойств модели Лоренца, фактически утверждают, что весь этот многолетний научный шум в отношении «странности» аттрактора Лоренца, его фрактальной размерности и т.п. может неожиданно оказаться лишь плодом вычислительной погрешности, продуктом информатики! Неужели нелинейная наука и в самом деле стала очередной жертвой компьютерной сенсации? Возможно, что здесь наука натолкнулась на аналог «квантового предела», который она пока не в состоянии понять...

3. Модель Лоренца: системный синтез. Вернемся к модели Лоренца (1) и рассмотрим ее теперь с точки зрения синергетической теории системного синтеза.

Параметрическое управление. Сначала синтезируем генератор «управляющего параметра» $r(t)$. Для этого расширим модель (2), записав ее в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) + (1 + \sigma)\dot{x}(t) + \sigma(1 - r + z)x &= 0, \\ \dot{z}(t) &= -bz + \frac{1}{\sigma}x\dot{x}(t) + x^2, \\ \dot{r}(t) &= u(x, \dot{x}, z) = F(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где $u(x, \dot{x}, z) = F(t)$ – генератор желаемых изменений «управляющего параметра» $r(t)$ с целью формирования соответствующих структур – аттракторов в модели Лоренца.

Итак, ставится задача: синтезировать обратную связь $u(x, \dot{x}, z)$, обеспечивающую при произвольных начальных условиях x_0, \dot{x}_0, z_0, r_0 формирование в структуре модели Лоренца (8) желаемых аттракторов с соответствующими бифуркациями, например, типа «вилки». Для решения этой задачи введем, согласно методу АКАР, следующую макропеременную:

$$\psi_2 = z - r + \mu - \alpha x^2. \quad (9)$$

Тогда, подставляя ψ_2 (9) в инвариантное соотношение

$$T_2\dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0,$$

на основе второго и третьего уравнений системы (8) получим

$$u = \dot{r}(t) = -bz + x^2 + \left(\frac{1}{\sigma} - 2\alpha\right)x\dot{x}(t) + \frac{1}{T_2}\psi_2. \quad (10)$$

Очевидно, что система (8), (10), стартуя из произвольных начальных условий x_0, \dot{x}_0, z_0, r_0 через время $t = (3 \div 4)T_2$ неизбежно выходит на многообразие $\psi_2 = 0$ (9), движение вдоль которого описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{x}_\psi(t) = (1 + \sigma)\dot{x}_\psi(t) + \sigma(\alpha x_\psi^2 - \mu + 1 + \delta)x_\psi = 0, \quad (11)$$

где δ – некоторая малая постоянная интегрирования.

Уравнение (11) при $\alpha > 0, \mu \leq 1$ асимптотически устойчиво относительно

$x_s = 0$, а при $\alpha > 0, \mu > 1$ имеет два устойчивых состояния $x_s \cong \pm \sqrt{\frac{\mu - 1 - \delta}{\alpha}}$, оп-

ределяемые соответствующими начальными условиями. Из сравнения уравнений (7) и (11) следует, что хотя они структурно идентичны, между ними имеется и существенное отличие. Дело в том, что в (7) присутствует задаваемый постоянный параметр r , в то время как в системе (8) этот параметр является динамическим и в уравнении (11) отсутствует. Это означает, что в системе (8), (10) параметр $r(t)$ является «управляющим» по существу пониманию этого термина в науке управления.

На рис. 1–5 приведены результаты моделирования системы (8), (10) для параметров: $\sigma = 10; b = 8/3; r_0 = 28; \mu = -2; \alpha = 2; T = 0,2$. Как следует из этих результатов, система устойчиво устремляется к состоянию равновесия $x_s = \dot{x}_s(t) = z_s = 0$, что полностью согласуется со свойствами уравнения (11). Аналогично на рис. 6–10 приведены результаты моделирования этой системы с параметрами: $\sigma = 10; b = 8/3; r_0 = 28; \mu = 2; \alpha = 2; T = 0,2$. В этом случае, согласно структуре уравнения (11), система (8), (10) на финишном этапе своего движения выходит на аттрактор с бифуркацией типа «вилки», параметры которой зависят от знака начальных условий по координате $\pm x_0$ (рис. 6). Из рис. 6–10 следует, что в системе (8), (10) *не возникает* каких-либо хаотических режимов движения, хотя, как известно, в модели Лоренца (1) с параметрами $\sigma = 10; b = 8/3; r_0 = 28$ такие режимы всегда существуют.

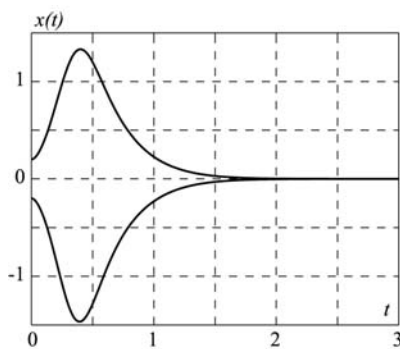


Рис. 1. Изменение $x(t)$

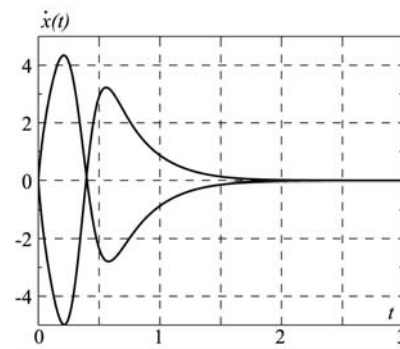


Рис. 2. Изменение $\dot{x}(t)$

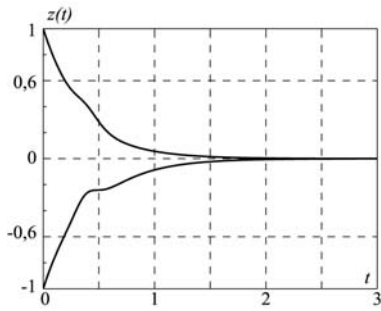


Рис. 3. Изменение $z(t)$

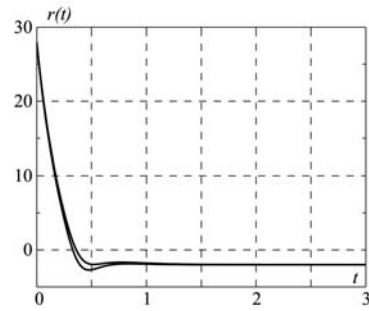


Рис. 4. Изменение $r(t)$

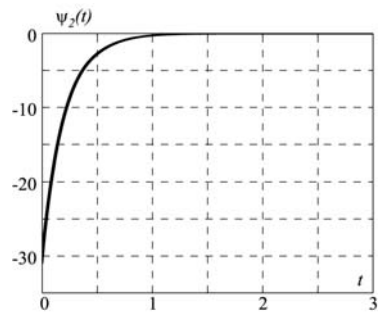


Рис. 5. Изменение $\psi_2(t)$

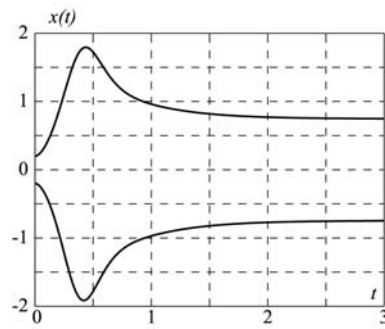


Рис. 6. Изменение $x(t)$

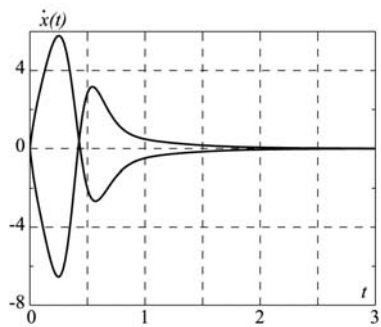


Рис. 7. Изменение $\dot{x}(t)$

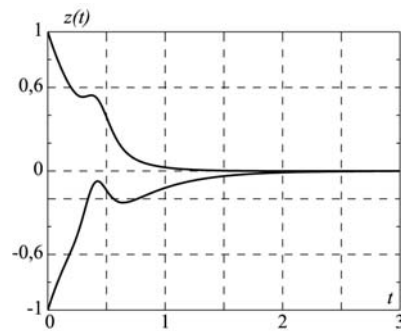


Рис. 8. Изменение $z(t)$

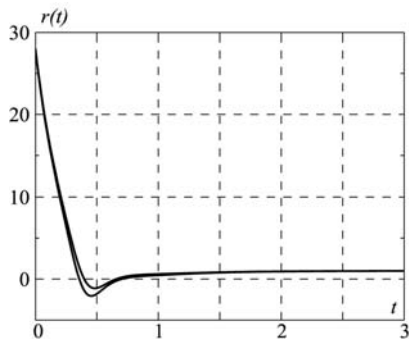


Рис. 9. Изменение $r(t)$

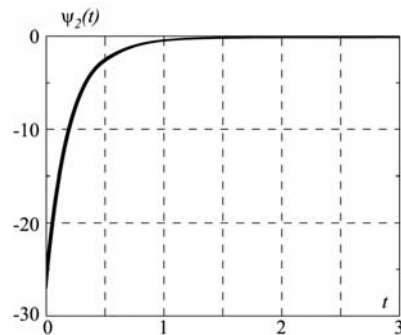


Рис. 10. Изменение $\psi_2(t)$

Итак, в статье показано, что если синтезировать генератор «управляющего параметра» $r(t)$, например, вида (10), то тогда модель Лоренца становится обычной системой дифференциальных уравнений, в которой отсутствуют «странный» аттрактор, фрактальная размерность и хаос. Это достаточно неожиданное обстоятельство требует, на наш взгляд, внесения изменений в понимание истинной сущности модели Лоренца – одной из базовых моделей теории динамического хаоса и синергетики.

Структурно-силовое управление. Синтезируем теперь управления в виде дополнительных обратных связей, формирующих в системе Лоренца возникновение желаемых структур – аттракторов – при произвольных значениях «управляющего параметра» $r(t)$. Для этого предположим, что в модель Лоренца можно ввести некоторое воздействие u_1 , например в первое уравнение системы (1), т.е.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sigma y - \sigma x + u_1; \\ \dot{y}(t) &= -y + rx - xz; \\ \dot{z}(t) &= -bz + xy.\end{aligned}\tag{12}$$

В общем случае u_1 может быть некоторым внешним воздействием. Однако более перспективным является представление $u_1(x, y, z)$ как некоторой внутренней обратной связи, которую можно дополнительно ввести с целью формирования некоторых желаемых процессов. Итак, ставится задача синтезировать такую функцию $u_1(x, y, z)$, которая позволяет придать новые свойства модели (12), например обеспечить асимптотическую устойчивость стационарных состояний или наделить эту модель новыми типами аттракторов и т.д.

Поставим сначала задачу синтеза такой функции $u_1(x, y, z)$, которая обеспечивает асимптотическую устойчивость стационарных состояний системы (12) для любых значений положительных параметров r , σ , b . Для решения этой задачи используем метод АКАР, основанный на введении некоторой макропеременной $\psi_1(x, y, z)$ и обеспечении свойства асимптотической устойчивости управляемой модели (12) относительно многообразия $\psi_1 = 0$. Это свойство можно обеспечить путем использования, например, дифференциального уравнения вида

$$T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0,\tag{13}$$

где $T_1 > 0$ – задаваемый параметр. Из (13) следует, что его решение $\psi_1(t) = \psi_0 e^{-t/T_1}$ является асимптотически ($t \rightarrow \infty$) устойчивым относительно многообразия $\psi_1 = 0$, которое достигается через время $(4 \div 5)T_1$ при старте из любых начальных условий $\psi_0(x_0, y_0, z_0)$. Введем сначала следующую макропеременную:

$$\psi_1 = x + \beta y.\tag{14}$$

Тогда, дифференцируя функцию ψ_1 (14) и подставляя производную в уравнение (12), находим управление

$$u_1 = -(\beta r - \sigma)x - (\sigma - \beta)y + \beta xz - \frac{1}{T_1}\psi_1,\tag{15}$$

которое обеспечивает перевод изображающей точки системы (12), замкнутой обратной связью (15), на многообразие $\psi_1 = 0$. Движение по этому многообразию описывается дифференциальными уравнениями, которые можно найти, подставив переменную $x = -\beta y$ (14) во второе и третье уравнения системы (12). Тогда получим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{y}_\psi(t) &= -y_\psi - r\beta y_\psi + \beta y_\psi z_\psi; \\ \dot{z}_\psi(t) &= -bz_\psi - \beta y_\psi^2, \end{aligned} \quad (16)$$

описывающих поведение системы (12), (15) на многообразии $\psi_1 = 0$. Исследуем устойчивость системы (16) относительно состояния $y_s = z_s = 0$. Для этого введем следующую определенно-положительную функцию Ляпунова:

$$V_\psi = 0,5y_\psi^2 + 0,5z_\psi^2 > 0. \quad (17)$$

Производная по времени функции (17) в силу уравнений (16) равна

$$\dot{V}_\psi(t) = -(1+r\beta)y^2 - bz^2 < 0. \quad (18)$$

Согласно теореме Ляпунова, если производная $\dot{V}_\psi(t)$ всегда отрицательна, то это означает асимптотическую устойчивость системы (16) относительно стационарного состояния $y_s = z_s = 0$ при движении системы из любых начальных условий. Условие $\dot{V}_\psi(t) < 0$ (18) обеспечивается при

$$r > 0; \quad b > 0; \quad \beta > 0. \quad (19)$$

Учитывая, что на многообразии $\psi_1 = 0$ переменная $x = -\beta y$, то и состояние $x_s = 0$.

Итак, при введении обратной связи u_1 (15) условия (19) и $T_1 > 0$ гарантируют асимптотическую устойчивость стационарного состояния $x_s = y_s = z_s = 0$ в начале координат при любых положительных значениях параметров r , σ , и b системы.

На рис. 11 приведены результаты моделирования системы (12), (15) при $\sigma = 10$; $b = 8/3$; $r = 24$; $\beta = 2$, подтверждающие теоретические положения метода АКАР.

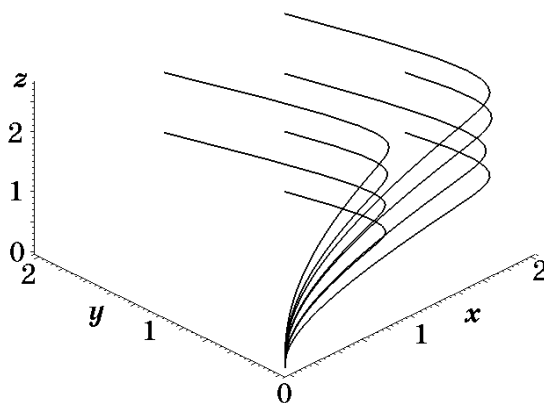


Рис. 11. Фазовый портрет системы при $\beta = 2$

Теперь предположим, что коэффициент β имеет отрицательный знак. Положив $\beta = -\beta_0$, запишем уравнение (16) в виде

$$\begin{aligned} \dot{y}_\psi(t) &= -(\beta_0 r - 1)y_\psi - \beta_0 y_\psi z_\psi; \\ \dot{z}_\psi(t) &= -bz_\psi - \beta_0 y_\psi^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Оказывается, что структура уравнений (20) точно совпадает со структурой базовых эволюционных уравнений синергетики. Это еще раз указывает на отмечавшееся ранее удивительное единство и нетривиальную внутреннюю связь между собой универсальных эволюционных уравнений синергетики и нелинейной теории самоорганизации.

В уравнениях (20) управляющим параметром является $\lambda = \beta_0 r - 1$, который при $\beta_0 = 1$ определяет величину «надкритичности» в исходной модели Лоренца. Очевидно, что при малом r , когда $\beta_0 r < 1$ и $\lambda < 0$, система (20) асимптотически устойчива относительно стационарного состояния $y_s = z_s = 0$. При $\beta_0 r > 1$ и, следовательно, $\lambda > 0$ в системе (20) может возникнуть коллективное движение, определяемое уравнением для параметра порядка:

$$\dot{y}_\psi(t) \cong \lambda y_\psi - \frac{\beta_0^2}{b} y_\psi^3 z_\psi; \quad \dot{z}_\psi(t) \approx 0. \quad (21)$$

Уравнение (21) имеет бифуркацию типа «вилка», которая происходит в точке $\lambda = 0$. После прохождения точки бифуркации ($\lambda = 0$) система (21) может равновероятно устремиться к одному из двух асимптотически устойчивых состояний

$$y_s = \pm \frac{1}{\beta_0} \sqrt{b\lambda} = \pm \frac{1}{\beta_0} \sqrt{b(\beta_0 r - 1)} \quad (22)$$

и, следовательно,

$$x_s = \pm \sqrt{b(\beta_0 r - 1)}; \quad z_s = \frac{\beta_0 r - 1}{\beta_0}. \quad (23)$$

На рис. 12 приведены результаты моделирования системы (12), (15) при $\sigma = 10$; $b = 8/3$; $r = 24$; $\beta = -2$, подтверждающие основные положения метода АКАР.

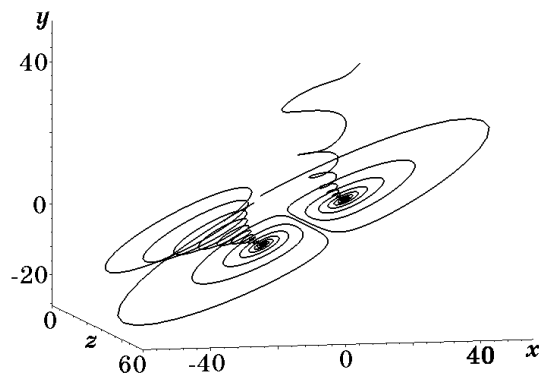


Рис. 12. Фазовый портрет системы при $\beta = -2$

Таким образом, введение обратной связи (15) позволяет гарантировать при произвольном $r > 1$ асимптотическую устойчивость в целом, т.е. во всем фазовом пространстве, относительно желаемых стационарных состояний при $\beta > 0$ или $\beta < 0$ соответственно. При $\beta < 0$ в системе (12), (15) на многообразии $\psi_1 = 0$ (14) возникают кооперативные явления с бифуркацией типа «вилка». Это означает, что обратная связь (15), введенная в модель Лоренца (12), естественным образом отражает идеологию синергетики и теории самоорганизации.

Итак, метод АКАР позволяет эффективно решить современную сложную задачу управления хаосом и синтезировать объективные законы управления нелинейными объектами с динамическим хаосом, описываемые известными моделями Лоренца и Рёсслера, наиболее распространенными в синергетике и теории самоорганизации. Такие законы являются антихаотическими, т.е. упорядочивающими хаос в нелинейных динамических системах. Они формируют на инвариантных многообразиях типичные уравнения синергетики с распространенными видами бифуркаций. Это свидетельствует о естественности указанных законов, позволяющих выявить глубокую внутреннюю связь между кооперативными процессами, возникающими в нелинейных самоорганизующихся системах произвольной природы.

Проблема управления нелинейными объектами и процессами с хаотической динамикой имеет важное прикладное значение. Дело не только в борьбе с хаосом, обычно ухудшающим или даже разрушающим сложные системы. В соответствии с доктриной современной нелинейной науки хаос может играть существенную конструктивную роль и служить источником порядка. Для реализации в управляемых сложных системах идеи «порядок из хаоса» целесообразно использовать методы теории АКАР для синтеза упорядочивающих объективных законов управления соответствующими технологическими процессами, в которых возникновение хаотических режимов на определенном интервале времени приводит к значительному улучшению их показателей качества. Очевидным примером являются распространенные технологические процессы, основанные на адсорбции газообразных веществ в жидкой фазе с возникновением хаотических движений, описываемых несимметричной моделью Лоренца. Для такого рода процессов появление хаотических режимов приводит к появлению конвенции, что существенно ускоряет процесс адсорбции [11].

Предложенные выше способы параметрического и внешнего управления моделью Лоренца можно следующим образом объединить. Вначале внешнее управление в модели u_1 (12) отключено и выбираются такие значения управляющего параметра r , чтобы возникали требуемые хаотические режимы. По истечении определенного времени включается соответствующее управление (u_1), что позволяет стабилизировать хаотический объект или технологический процесс относительно заданного устойчивого состояния. В зависимости от выбранной комбинации между внутренним управляющим параметром r и внешним управлением u_1 можно сформировать желаемое протекание технологического процесса с высокими показателями качества. Разумеется, что аналогично можно построить алгоритмы упорядочивающего управления нелинейными объектами с моделью Рёсслера и другими моделями современной нелинейной науки.

Синтезируемые методом АКАР антихаотические законы управления позволяют по-новому решить современную трудную проблему управления широким классом нелинейных объектов и процессов, модели которых содержат в своем фазовом пространстве различные «странные» аттракторы и, следовательно, обладают хаотической динамикой. Причиной хаотизации движений в таких объектах является потеря ими устойчивости и экспоненциальное разбегание траекторий в сочетании со свойством сжатия их фазового объема. Такие объекты и процессы распространены в термодинамике, тепло- и электроэнергетике, химической кинетике, электромеханике, радиоэлектронике, биотехнологии, экономике [1–3, 10–16].

Итак, метод АКАР показал свои достоинства и в задачах управления хаосом, неожиданно выявив глубокую внутреннюю связь между многообразиями, возникающими на «странных» аттракторах под действием синтезированных объективных законов управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pecora L.M., Carroll T.L., Jonnson G.A., Mar D.J., Heagy J.F. Fundamentals of synchronization in chaotic systems. Concepts and applications // *Caos*. – 1997. – Vol. 7, № 4. – P. 520-543.
2. Peng J.H., Ding E.J., Ding M., Yang W. Synchronizing hiperchaos with a scalar transmitted signal // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol. 76, № 6. – P. 904-907.
3. Taanaka K., Jkeda T., Wang H.O. Unified Approach to Controlling Chaos via an LMI-Based Fuzzy Control Systems Desing // *IEEE Trans. Circuits Syst. J.* – 1998. – Vol. 45, № 10. – P. 1021-1040.
4. Андриевский В.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: методы и приложения. I. Методы // *Автоматика и телемеханика*. – 2003. – № 5.
5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
6. Смейл С. Современные проблемы хаоса и нелинейности. – Ижевск: ИКИ, 2002.
7. Магницкий Н.А., Сидоров С.В. Новые методы хаотической динамики. – М.: Едиториал УРСС, 2004.
8. Леонов Г.А. Странные аттракторы и классическая теория устойчивости движения. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004.
9. Зубов И.В. Методы анализа динамики управляемых систем. – М.: Физматлит, 2003.
10. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука, 1987.
11. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. – М.: Наука, 1992.
12. Накен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.: Мир, 1991.
13. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. – М.: Мир, 1990.
14. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. – М.: Мир, 1991.
15. Дмитриев А.С., Кислов В.Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. – М.: Наука, 1989.
16. Странные аттракторы / Под ред. Я.Г. Синая и Л.П. Шильникова. – М.: Мир, 1981.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

Колесников Анатолий Аркадьевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; заведующий кафедрой; д.т.н.; профессор.

Kolesnikov Anatoliy Arkad'evich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; the department of synergetics and control; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.51

А.Н. Попов

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ГЕНЕРАЦИИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Колебательные процессы необычайно широко распространены как в неорганическом мире, так и в живых организмах, а следовательно, могут рассматриваться как архетип зависящего от времени режима поведения динамических систем различной природы. В промышленную эпоху осцилляторы находят многочисленное приложение в механике, электротехнике, акустике и становятся одним из основных компонентов многих создан-