

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА В ЗАДАЧАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрены проблемы реализации в задачах управления адаптивного регулятора. На примере показана эффективность использования синергетического подхода для создания самоорганизующихся регуляторов и их реализации в металлургических, технологических и технических процессах.

Ключевые слова: синтез, адаптивный, управление, самоорганизация, синергетика, инвариантное многообразие, устойчивость.

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем становится создание и существенное увеличение удельного веса искусственных самоорганизующихся регуляторов в разнообразных технических, технологических устройствах и приборах. Основное внимание ученых и практиков все в большей мере концентрируется на фундаментальных проблемах управления, связанных с ресурсосберегающими технологиями, новой организацией социально-экономических систем, экологической и ядерной безопасностью открытого общества. Основным отличием технологической деятельности в настоящий момент, является освоение принципиально новых типов объектов и процессов, которые представлены в виде сложных саморазвивающихся макросистем. Известно, что в открытых макросистемах возникают кооперативные явления, основанные не на силовых, а на информационных взаимодействиях. Результатом действия таких эффектов, является порождение новых структур без каких-либо внешних (силовых) воздействий. Указанного рода принципиально новые кооперативные явления в макросистемах, непременно следует учитывать при разработке новых и совершенствовании существующих технологий. Проблемы управления такого рода динамическими системами являются чрезвычайно сложными и практически недоступными для существующей теории управления. Следовательно, актуальным

является переход на идеи самоорганизации синергетики – создания способов формирования и резонансного возбуждения внутренних сил взаимодействия, способных породить в фазовом пространстве синтезируемых систем желаемые структуры – аттракторы соответствующей системы. Процесс самоорганизации – это процесс рождения из физического (биологического, экономического, социального) хаоса некоторых устойчивых упорядоченных структур с новыми свойствами систем. Причем, это возможно только для открытых систем, обменивающихся с внешней средой энергией, веществом и информацией. Для синергетических систем – это первое фундаментальное свойство, а вторым – непереносимое взаимодействие, т.е. когерентность поведения между компонентами системы. Поэтому перспективным является попытка переноса свойств синергетических процессов на конструируемые системы управления нелинейными объектами. При этом, заметим, что именно синтез такого рода систем является фундаментальной проблемой современной науки об управлении.

Постановка и анализ задач синтеза адаптивного управления

Задачу синтеза адаптивной системы управления можно сформулировать как задачу поиска управляющего вектора в виде функции координат состояния $u = u(x)$, который обеспечивает асимптотический переход управляемого объекта

$$\dot{x}(t) = f(x, a, u), \quad (1)$$

из произвольного начального состояния $x(0)$, принадлежащего некоторой допустимой области пространства состояний Ω , в желаемое конечное $h(x) = 0$ с заданными динамическими характеристиками движения. При этом параметры $a(t)$, а иногда и структура правых частей системы (1) могут неопределенным образом изменяться в некотором ограниченном диапазоне.

Если определена структура регулятора, т.е. задан допустимый класс управляющих воздействий $u(x)$, то сами процедуры отыскания наилучшего управления, т.е. процедуры адаптации, описаны достаточно полно в [1].

На наш взгляд, суть проблемы реализации адаптивных регуляторов нелинейных динамических систем состоит в том, а какова возможность реализации точно таких возмущений самим

регулятором. Этот вопрос является условием разрешимости задач адаптивного управления нелинейными объектами. Данный тезис известен как принцип внутренней модели. Для задач адаптивного управления нелинейными объектами этот тезис выдвигался многими исследователями. Например, в работе [2] показано, что для локального управления по выходу, в нелинейных системах, такая модель необходима. Для линейных систем аналогичные результаты были получены в середине 70-х годов прошлого столетия в работе [3]. А в работе [4], еще раньше этот принцип был обоснован с позиции общей теории систем.

Учитывая, что каждый физический объект с нелинейной динамикой по-своему уникален, решение задачи адаптивного управления тоже является уникальным, в том смысле, что ограничено классом доступных физических моделей исследуемых процессов. Тем самым, подчеркиваем, что она не поддается формальной типизации. Отметим, что и сами модели возмущений не всегда известны даже с точностью до класса нелинейностей.

Далее встает задача о выборе самой структуры адаптивного управления, с одной стороны, удовлетворяющего принципу внутренней модели, а с другой стороны – допускающей достижение целей управления. Учитывая замечательные свойства самоорганизующихся систем различной природы, возникает проблема построения такого адаптивного управления, которое позволяет осуществлять направленные процессы самоорганизации в общей системе.

В последнее время довольно широкое распространение для синтеза управления многосвязными нелинейными многомерными системами получил метод АКАР, основанный на синергетическом подходе [1, 6]. Эффективность такого подхода позволяет положить его в основу синтеза адаптивных регуляторов, которые в полной мере удовлетворяют современным требованиям. В работе [1] рассмотрен подход к синтезу адаптивных регуляторов нелинейными системами, основанный на применении метода АКАР и многослойных нейросетей. Полученные ими результаты показывают, что использование нейросетей для структурной и параметрической адаптации наиболее целесообразно в случае значительной неопределенности моделей управляемых объектов, т.е. когда

затруднено описание процессов на языке динамики. Кроме того, сложность преобразований, происходящих в нейросетях, также затрудняет анализ таких динамических сетей. В результате процедура выбора структуры и обучения нейросети приводит к необходимости использования численно-аналитического метода со всеми известными их недостатками, а успех в достижении результата может существенно зависеть от удачного выбора начальных значений настраиваемых коэффициентов нейронов.

С другой стороны известно, что значительное большинство технических объектов может быть структурно достаточно адекватно представлено в виде динамических систем с точностью до параметров, изменяющихся в определенном диапазоне. Это положение относится к широкому классу электромеханических и энергетических объектов, химическим и тепловым процессам, летательным аппаратам и т.д. Для указанных систем и объектов метод АКАР позволил сформировать адекватное синергетическое управление, которое не требует сложных алгоритмов адаптации.

Отметим, что в объектах, в которых возможны процессы самоорганизации, нет необходимости строго поддерживать внутренние параметры, а важно лишь, чтобы система попадала на заданное инвариантное многообразие. На данном аттракторе обязательно поддерживается желаемое соотношение между координатами объекта. Таким образом, синергетическое управление, несмотря на разного рода внутренние шумы и параметрические возмущения, решает поставленную перед ним задачу. При этом управляемая система неизбежно устремляется к желаемому аттрактору, достигая его через некоторое время. Именно в этом и проявляется свойство самоорганизации, а сам аттрактор связан с «параметрами порядка», которым подчиняются все другие переменные системы. Сама же система всегда асимптотически устойчива в целом относительно выбранного аттрактора. Как известно из теории устойчивости, такая особенность является грубым свойством динамических систем. Следовательно, синергетические системы обладают свойством робастной устойчивости к параметрическим возмущениям. Отмеченное свойство робастности и адаптивности синергетических систем управления является

определяющим фактором применения синергетического подхода к решению самых разнообразных задач.

Синергетический подход к построению адаптивного регулятора

Общая методика синтеза нелинейных адаптивных регуляторов методом АКАР полностью соответствует идеологии синергетической теории управления [1, 6]. Идея построения динамического регулятора состоит в применении синергетического принципа расширения-сжатия пространства состояний управляемой системы, за счет учета динамики внешних возмущений. Пусть имеется динамическая система

$$\dot{x}(t) = f(x, a, u, M), \quad (2)$$

где x – вектор переменных состояния, a – неопределенные постоянные параметры, M – вектор внешних возмущений, u – управление. Указанную динамическую систему (2) заменяем расширенной

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, a^0, u, M^0, z), \\ \dot{z}(t) = h(z, x), \end{cases} \quad (3)$$

здесь a^0, M^0 – номинальные расчетные параметры и возмущения, z – оценки параметрических и внешних возмущений, дополнительные переменные; $h(x, z)$ – в общем случае нелинейная функция, которая обеспечивает генерирование вторым уравнением системы (3) возмущений того же класса, что и действующие на реальный объект. В общем случае, особенно для нелинейных систем, сложно сформировать такую функцию, поэтому можно использовать различные методы ее аппроксимации. Ошибка такой аппроксимации должна в установившемся режиме асимптотически стремиться к нулю.

Поэтому для модели синтеза (3) необходимо найти управляющее воздействие в виде функции координат состояния расширенной системы $u = u(z, x)$, которое бы переводило ее из произвольного начального состояния в заданное конечное состояние, с желаемыми динамическими свойствами на траекториях движения. В этом случае синтезированный регулятор гарантировано обеспечит цель управления для исходной системы (2) с теми возмущениями, которые аппроксимирует модель синтеза (3). Таким образом, адаптивная система будет «поглощать» возмущающие параметрические и внешние воздействия заданного класса.

Построение и анализ работы адаптивного регулятора

Рассмотрим возможности использования синергетического подхода на следующем нелинейном объекте, обладающим свойством параметрической грубости.

Пусть поведение объекта управления описывается следующей системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2 + ax_1^2, \\ \dot{x}_2(t) = x_3, \\ \dot{x}_3(t) = u. \end{cases} \quad (4)$$

Определим параметр $a = a^0 + \Delta a$, где a^0 – номинальное значение, Δa – неизвестная ограниченная кусочно-постоянная величина. Поставим задачу синтеза управления, стабилизирующего переменную состояния x_1 в заданном положении x_1^* . Для решения задачи построим расширенную модель синтеза следующего вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2 + a^0 x_1^2 + x_4, \\ \dot{x}_2(t) = x_3, \\ \dot{x}_3(t) = u, \\ \dot{x}_4(t) = x_1 - x_1^*. \end{cases} \quad (5)$$

Введем инвариантное многообразие

$$\psi_1 = x_2 + a^0 x_1^2 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_4 + \alpha_3 x_1^3. \quad (6)$$

Потребуем, чтобы многообразие ψ_1 (6) удовлетворяло функциональному уравнению

$$\ddot{\psi}_1(t) + T_1 \dot{\psi}_1(t) + T_2 \psi_1 = 0. \quad (7)$$

Здесь и далее полагается, что коэффициенты T_1 и T_2 положительны. Выполним операции дифференцирования соотношения (6), а результат подставим, с учетом уравнений динамики объекта (5), в выражение (7).

Далее легко получить, что управление, согласно методу АКАР, имеет вид:

$$\begin{aligned} u = & - \left[x_3 + 2a^0 x_1 \{x_2 + a^0 x_1^2 + x_4\} + (x_1 - x_1^*) \right] (2a^0 x_1 + \alpha_1 + 3\alpha_3 x_1^2) - \\ & - [2a^0 + 6\alpha_3 x_1]^* (x_2 + a^0 x_1^2 + x_4)^2 - \alpha_2 (x_2 + a^0 x_1^2 + x_4) - T_1 x_3 - \\ & - T_1 (x_2 + a^0 x_1^2 + x_4) (2a^0 x_1 + \alpha_1 + 3\alpha_3 x_1^2) - \\ & - T_1 \alpha_2 (x_1 - x_1^*) - T_2 (x_2 + a^0 x_1^2 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_4 + \alpha_3 x_1^3). \end{aligned} \quad (8)$$

Учитывая требования равенства многообразия $\psi_1=0$, имеем для определения переменной x_2 соотношение

$$x_2 = -a^0 x_1^2 - \alpha_1 x_1 - \alpha_2 x_4 - \alpha_3 x_1^3. \quad (9)$$

Используя его, путем подстановки в искомые уравнения системы, получим уравнения декомпозированной системы

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1\psi}(t) &= \Delta a x_{1\psi}^2 - \alpha_1 x_{1\psi} - \alpha_2 x_{4\psi} - \alpha_3 x_{1\psi}^3, \\ \dot{x}_{4\psi}(t) &= x_{1\psi} - x_1^*. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассмотрим вопрос устойчивости полученной системы (10), для чего введем в рассмотрение квадратичную функцию

$$V = x_1^2 + \alpha_2 x_4^2,$$

и вычислим ее полную производную с учетом уравнений состояния системы (10)

$$\dot{V} = -2x_{1\psi}^2 (\alpha_1 + \alpha_3 x_{1\psi}^2 - \Delta a x_{1\psi}). \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что при выполнении условий

$$\alpha_1 > \Delta a, \quad \alpha_3 > \Delta a$$

следует отрицательная определенность функции (11). При этом, из того что $x_1 \rightarrow 0$ следует, что $x_4 \rightarrow 0$, поэтому функция V , является функцией Ляпунова для декомпозированной системы (10), а значит и вся замкнутая система (4), (8) является асимптотически устойчивой.

Рассмотрим результаты численного моделирования замкнутой системы (4), (8). Представленные результаты были получены при следующих значениях параметров: $a^0 = 5$, $x_{10} = 10$, $T_1 = 10^2$, $T_2 = 2,5 \cdot 10^3$, $\alpha_1 = 100$, $\alpha_2 = 10^4$, $\alpha_3 = 20$. Реальный параметр системы $a(t)$ изменялся по закону $a = 5 + 3\text{sign}(\sin 2t)$. Как видно из рис.1 – 2, проведенное моделирование подтверждает асимптотическую устойчивость и параметрическую грубость синтезированной системы. Таким образом, использование синергетического подхода на основе метода АКАР, позволяет строить регуляторы нового типа для разнообразных технических, технологических и других процессов в металлургии и машиностроении.

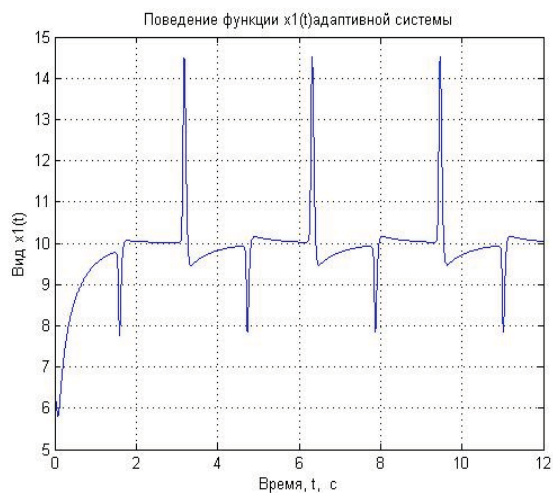


Рис. 1

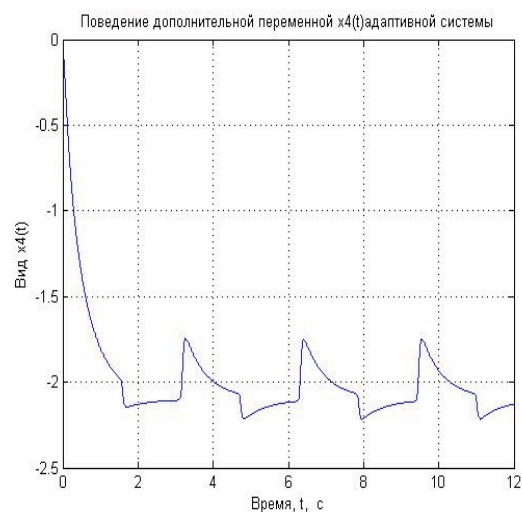


Рис. 2

ЛИТЕРАТУРА

1. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления /Под ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002.
2. Structurally stable output regulation of nonlinear systems /C.I.Byrnes, F.D. Priscoli, A. Isidori, W.Kang // Automatica. – 1997. – Vol. 33. – Pp. 369-385.
3. Francis B.A., Wonham W.M. The internal model principle of control theory // Automatica. – 1976. – Vol. 12. – Pp. 457-465.
4. Conant R.C., Ashby W.R. Every good regulator of a system must be a model of that system // Int. J. Syst. Sci. – 1970. – Vol. 1. – Pp. 89- 98.
5. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. / С-Питер. – 2006. – С. 378.
6. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч.II.