

УПРАВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК: 519.3:62–50

Ж. Шаршеналиев – академик НАН КР

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ «ПАРАМЕТРОМ ПОРЯДКА» ПОВЕДЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ И РАЗНОТЕМПОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Отмечены особенности методов АКОР и АКАР в исследовании консервативных и диссипативных систем оптимального управления, проанализировано действие «параметра порядка» в нелинейных системах со многими степенями свободы и в системах с разнотемповыми движениями.

Ключевые слова: Параметр порядка, диссипативные, консервативные и разнотемповые системы управления.

Отметим, что окружающая нас среда (природная, технологическая, социально-экономическая), комплексы различных суперсистем подвержены динамическим взаимодействиям и обмену энергией, веществом и информацией. Они нелинейны, многомерны и многосвязны, в них возникают критические и хаотические режимы. Из синергетической теории управления [1, 2, 3], известно, что в нелинейных сложных ММО объектах и системах, имеющих много степеней свободы, возникают парадоксальные режимы. Это связано с внутренним взаимодействием фазовых координат состояния и возникновением режима самоорганизации (самопроизвольное возникновение хаоса, способствующего образованию регулярной структуры). При самоорганизации в диссипативных системах выделяются несколько степеней свободы – **параметры порядка**, к которым «подстраиваются» все другие степени свободы. Параметры порядка имеют место и в разнотемповых системах управления.

Для раскрытия сути излагаемых проблем рассмотрим некоторые особенности методов АКОР и АКАР, используемых в теории оптимального управления. Обычно в системах автоматического управления движение динамических систем описывается дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_1(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m), \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где u – управление, x – фазовые координаты.

Если задача состоит в переходе из некоторого начального положения $x(t_0) = x_0$ в заданное конечное состояние $x(t_1) = x_1$ с минимизацией функционала

$$I[u, t] = \varphi(x, t_1), \quad (2)$$

то она представляет задачу Майера. Считается, что решение этой задачи в методе АКОР существует тогда, когда оно удовлетворяет необходимым условиям оптимальности при любых допустимых управляемых $u, t \in U$.

В случае использования принципа максимума Понтрягина (ПМ), если решение задачи на $\min I[u], t$ существует, то считается, что и существует нетривиальное решение присоединенной системы дифференциальных уравнений

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}, \quad H = \psi_1 f_1 + \dots + \psi_n f_n. \quad (3)$$

Тогда оптимальное управление u, t для каждого момента времени определяется из условия

$$u, t = \arg \max H[x, t, \psi, t, u]. \quad (4)$$

Здесь есть трудности при решение системы $2n$ дифференциальных уравнений (1), (3) с учетом выполнения условия (4) выбора управления. Определение постоянных интегрирования системы уравнений (1), (3) зависит от начальных и конечных условий и также условий трансверсальности. Принцип Понтрягина в методе АКОР зиждется на всеобщем характере закона сохранения энергии (первого начала термодинамики) и никак не учитывает возрастания энтропии, которая определяет направленность всех происходящих процессов взаимодействия. Движение системы и термодинамические процессы способствуют появлению ряда новых форм. В АКОР распространенный математический квадратичный критерий качества является твердо **постулированным**, не учитывающим специфику и природу управляемых процессов. Особенностью принципа Понтрягина является обратимость динамических траекторий, что касается только консервативных, но никак не диссипативных динамических систем, где действует **второе начало термодинамики с необратимыми процессами**.

Для консервативных систем понятие Гамильтониан представляет полную энергию. Как известно, принцип максимума в общем случае является необходимым условием оптимального управления. Однако в ряде случаев для линейных систем ПМ может доставлять необходимые и достаточные условия оптимальности. Оптимальное управление в этом случае формируется как функция времени t , т.е. без обратной связи по состоянию управляемого объекта $x \in X$. Здесь в условиях неопределенности параметров управляемого объекта и действия шумов проявляется неустойчивость системы.

1. Использование квадратичных функционалов жестко ограничивает применение АКОР. Для оценки отклонения по величине от программной траектории (а не по знаку или направлению) функционал выбирается в виде квадратичной функции фазовых переменных и управлений.

2. При оптимизации следящих систем приходится иметь дело с проблемой принятия решений в условиях неопределенности.
3. Здесь также возникает проблема выявления коэффициентов квадратичных форм в функционале

$$I_n = \int_0^t [x^0(t) P x(t) + u^0(t) Q u(t)] dt.$$

Выбор элементов матриц P и Q осуществляется при положительной определенности $u^0 Q u \geq 0, x \neq 0$. но они во многом произвольны и зависят от интуиции исследователя.

4. Решение задачи АКОР сводится к необходимости интегрирования матричного уравнения Риккати, которое в общем случае не интегрируется даже с помощью конечного числа элементарных операций. В этом случае имеет место неразрешимость задачи синтеза оптимальных управлений в аналитическом виде, а требуется использование численных методов для каждого вида параметров объекта управления и критерия качества. Здесь уместно напомнить об особенностях систем с необратимыми процессами.

Термодинамика необратимых процессов действует в системах, находящихся далеко от теплового равновесия и, по определению И. Пригожина, бывает 3-х видов:

- равновесная область, где производство энтропии, разные потоки и силы равны нулю;
- слабо равновесная или линейная область, где термодинамические силы слабы, потоки линейно зависят от силы;
- сильно неравновесная и нелинейная область, где потоки являются сложными функциями сил.

При этом И. Пригожин сделал важный вывод: источник порядка на всех уровнях движения – это неравновесность, которая способствует порождению порядка из хаоса. В необратимых термодинамических процессах, происходит образование упорядоченных структур с новыми свойствами. Это характеризует появление нового явления – самоорганизации систем. По определению основателя науки синергетики Г. Хакена «самоорганизация – процесс в нелинейных динамических системах, приводящий к возникновению внутренних пространственных и пространственно-временных структур». При этом некоторые из возникающих структур являются диссипативными, т.е. где происходит рассеивание (диссипация) энергии, что делает структуры наблюдаемыми на определенном временном интервале. Когда производная функция H по координатам равна нулю, то соответствующие производные и есть интегралы движения, т.е. являются инвариантами системами. Синергетическая теория управления (СТУ) – это новое направление в общей теории управления, базирующееся на принципах направленной самоорганизации и динамической декомпозиции синтезируемых нелинейных систем на притягивающих инвариантных многообразиях (ИМ). Она отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т.е. представляет собой своего рода симбиоз кибернетики и синергетики [2].

В развитие кибернетики и синергетики профессор А. Колесников разработал КЕПСУ – концепцию единства процессов самоорганизации и управления. КЕПСУ – решает трудные задачи, не решаемые в классической теории управления из-за барьера «нелинейности–многомерности–многосвязности». В соответствии с этой концепции осуществляется процесс нелинейного взаимодействия или взаимодействия. На основе КЕПСУ сформулирован принцип «**расширения–сжатия**» фазового пространства: генерация совокупности нелинейных отрицательных и положительных обратимых связей, обеспечивает формирование направленной самоорганизации движения. На принципах КЕПСУ основан метод АКАР – Аналитического Конструирования Агрегированных Регуляторов, преодолевший «проклятие размерности» Р. Беллмана. Фактически здесь происходит нелинейный системный синтез. Для осуществления такого синтеза необходим обязательный обмен с внешней средой энергией, веществом и информацией и непереносное взаимодействие, т.е. когерентность поведения между компонентами системы. Методологическим ядром СТУ является метод АКАР, позволяющий осуществить синтез законов управления для как нелинейных и многомерных, так и многосвязных объектов. Основная идея СТУ: организованное управление динамической системой в ее пространстве состояний образует притягивающее **предельное множество – аттракторы** и обеспечивает желаемое ее поведение. При этом организуется кооперативное поведение множество переменных и выделение малого числа **параметров порядка**, к которым подстраиваются все остальные переменные. «Параметр порядка» – это агрегированные макропеременные, т.е. переменные ψx , которые не ищутся, а задаются.

Многообразия, которые обладают свойством притягивать траектории, начинающиеся в некоторой его окрестности, называются притягивающими. При этом эти многообразия остаются неизменными во время эволюционного движения динамической системы и являются инвариантными. В СТУ цели представляются в виде набора инвариантов, отражающих основные требования, предъявляемые разработчикам систем. Как указано в [2], «в отличие от немного примитивных первичных показателей качества (время регулирования, не регулирование, колебательность и т.п.) и достаточно абстрактных постулированных оптимизирующих функционалов, инварианты имеют определенное физическое, химическое, техническое и др. содержание...».

АКАР решает многие проблемы, не разрешаемые в АКОР. В АКАР оптимизирующий критерий не строго постулируется заранее, а конструируется путем выбора соответствующих функций $\psi x_1, \dots, x_n$ с учетом уравнения $\dot{x}_n t = f_n x_1, \dots, x_n + u$ и по заданным инвариантным многообразиям. В АКАР считается, что исходная задача описывается дифференциальными уравнениями объекта [1, 2]

$$\dot{x} t = F x, u, q, I, M, \quad (5)$$

где $x(t)$ – координаты состояния, $u t$ – управления, $q t$ – задающие, внешние, $I(t)$ – параметрические воздействия. В формировании уравнений самоорганизации

указанные силы соответствующим образом необходимо исключить, расширив исходные системы «объект – внешние силы» таким образом, чтобы внешние силы оказались в уравнении системы для нее **внутренними**. В этом случае мы уже имеем уравнение самоорганизации, которые в результате замыкания прямыми и обратными отрицательными и положительными связями представляет собой **расширенную модель синтеза системы размерности** $\dim \Sigma = n+r$. Задача состоит в синтезе соответствующих законов управления и $x_1, \dots, x_n, z_1, \dots, z_r$ в функции координат состояния расширенной системы. Здесь z_1, \dots, z_r – координаты информационных моделей задающих, внешних параметрических возмущающих воздействий, имеющих вид

$$\dot{Z}(t) = \varphi(x, z), \quad (6)$$

здесь z – оценки соответствующих возмущающих воздействий.

Тогда уравнения (1) и (2) вместе и есть **модель синергетического синтеза систем управления**. В результате система становится открытой, следовательно, через систему будут протекать энергия, вещество и информация. При этом создается неравновесная ситуация, что необходимо для возникновения направленной самоорганизации. В системе должна происходить асимптотическая декомпозиция и редукция на ИМ при векторном управлении нелинейными сложными объектами. Тогда динамическая декомпозиция выражается [2, 3].

$$\dim \Sigma = n+r - \lambda m,$$

где $(n+r)$ – размерность исходной расширенной системы, m – размерность вектора управления, λ – число вводимых ИМ. Можно сказать, что управление в СТУ – это преодоление избыточных степеней свободы системы.

Различие между консервативными и диссипативными системами ярко проявляется при макроскопическом их развитии. Диссипативная система может приобрести свойство самодвижения, самоконструирования, что принципиально невозможно в консервативных системах. В диссипативных системах при протекании через них вещества и энергии возникают коллективные переменные – **параметры порядка**.

Параметры порядка, бифуркация, диссипативные структуры, принцип подчинения, аттракторы – новые идеи ранее неизвестные классической науке об управлении. В таких системах происходит «забывание» начальных условий и формирование неравновесных структур, а это может служить причиной упорядоченности. Параметр порядка управляет поведением каждого компонента системы. Управляемые параметры порядка получаются в результате асимптотически точной динамической декомпозиции.

О «Параметре порядка» в разнотемповых системах, имеющих два переменных масштаба движения.

В задачах аэродинамики, в самоорганизующихся разнотемповых системах, релаксационных процессах наблюдаем разделение исходной системы на медленные и быстрые подсистемы, где также возникает «параметр порядка». Рассмотрим одну из таких систем. Пусть динамическая разнотемповая система имеет вид:

$$\begin{aligned}
 F \frac{dz}{dt} &= F(z, y, t), \\
 \frac{dy}{dt} &= f(z, y, t), \\
 z(0) &= z^0, \quad y(0) = y^0, \\
 z &\in \mathbb{R}^m, \quad y \in \mathbb{R}^n.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

При $E=0$ имеем систему алгебраических и дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 E z, y, t &= 0, \\
 \frac{dy}{dt} &= f(\bar{z}, \bar{y}, t).
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Уравнения (7) и (8) имеют различные фазовые пространства, где система (7) есть возмущенная по отношению к системе (8), а система (8) по отношению к (7) – вырожденная, или редуцированная. Для решения возмущенной системы необходимо знать большее число дополнительных условий. В литературе такие системы называются сингулярными, способствующими появлению параметрической неустойчивости. В синергетике компоненты $y(t)$, называются параметрами порядка и долгоживущими модами (Г. Хакен). Параметрическая неустойчивость наблюдается во многих электрических, электромеханических системах – это колебание регуляторов турбомашин, колебания плазмы, процессы в трубопроводах с протекающим газом или жидкостью и т.п. Системы с таким поведением принято называть **жесткими** [4]. В этом случае участок быстрого начального изменения фазовой координаты имеет название **пограничного слоя**. При исследовании таких систем возникают значительные вычислительные трудности из-за большого времени счета и накопления вычислительных ошибок.

Литература

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. Москва – Таганрог, Энергоиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников А.А., Медведев М.Ю. Современные методы синтеза систем управления. Таганрог, изд-во ТрГУ, 2003. – 127 с.
3. Колесников А.А. Когнитивные возможности синергетики // Вестник РАН, 2003, т. 73, № 8. – С. 727–734.
4. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноурецкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М.: Наука, 1979. – 208 с.