

УДК 681.5.011

## УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМ С ХАОСОДИНАМИКОЙ И САМООРГАНИЗАЦИЕЙ

*Ж. Шаршеналиев, А.Б. Бакасова*

Рассмотрены особенности развития кибернетико-синергетических нелинейных систем, основанных на концепции единства процессов самоорганизации и управления (КЕПСУ) и методе АКАР.

*Ключевые слова:* синергетическая теория управления; концепция единства процессов самоорганизации и управления (КЕПСУ); метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР).

---

## CONTROL OF CHAOTIC DYNAMICAL AND SELF-ORGANIZING SYSTEMS

*J. Sharshenaliev, A.B. Bakasova*

This article discusses the development of cybernetic synergistic nonlinear systems based on the concept of the unity of the processes of self-organization and management and the method of ADAR.

*Keywords:* synergetic control theory; concept of the unity of the processes of self-organization and management; method of analytical designing of aggregated regulators (ADAR).

**Открытия, способствовавшие пониманию процессов управления и самоорганизации.** Наука призвана не просто собирать фактический материал, но и стремиться создать целостную картину мира, целостное мировоззрение на основе фундаментальных законов. В истории мировой науки известно много великих ученых, среди них 7 величайших личностей науки, открытия которых способствовали пониманию целостной картины мира с учетом процессов самодвижения и самоорганизации.

Механика *Исаака Ньютона* (1643–1727) во многом связана с теорией управления. Он предложил способ описания движений тел произвольной природы в виде дифференциальных уравнений. Его закон всемирного тяготения даёт нам возможность описать движение планет вокруг Солнца – как систему гравитационного взаимодействия.

Благодаря *Джеймсу Клерку Максвеллу* (1831–1879) известно, что свет представляет собой не что иное, как электромагнитные колебания, аналогичные радиоволнам.

*Альберту Эйнштейну* (1879–1955) удалось связать *тяготение, пространство и время*.

Химик *Дмитрий Иванович Менделеев* (1834–1907) впервые упорядочил многообразие существующих в природе веществ, создав периодическую систему химических элементов.

В биологии, в соответствии с открытыми *Грегором Менделем* (1822–1884) законами, про-

исходит *передача от поколения к поколению наследственных признаков при скрещивании*, к примеру, растений с различной окраской цветка. Уже в наше время были обнаружены химические механизмы такой передачи, происходящей благодаря гигантским молекулам дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК).

*Норберту Винеру* (1894–1964) удалось стать основоположником эпохальной науки – кибернетики. Кибернетика – это наука об управлении, о наиболее общих формах, свойствах, законах в живых и неживых объектах (системах). Он в своих «новых главах кибернетики» (1961) выдвинул важные проблемы создания самоорганизующихся систем путем включения нелинейных обратных связей в динамических системах.

*Герман Хакен* (1927) выдвинул синергетический путь – учение о взаимодействии, вслед за Н. Винером предложил и развил теорию самоорганизации сложных систем с введением новых понятий – аттрактор, бифуркация, динамический хаос.

Следует отметить четыре пути развития кибернетико-синергетических динамических систем управления, которые во многом аналогичны путям развития классической механики Ньютона и термодинамических процессов.

1. Путь, базирующийся на векторных понятиях силы и импульса (*И. Ньютон*).

2. Путь, опирающийся на вариационный принцип, на скалярные понятия кинетической

энергии и силовой функции (*И.Л. Лагранж и В. Гамильтон*).

Классическая теория автоматического управления (КТАУ) основывается на *обратимости динамических траекторий*, что означает сохранение полной энергии в изолированной системе при ее свободном движении. Считается, что изменение кинетической энергии полностью компенсирует изменение потенциальной энергии. Такая концепция была обобщена и формализована Гамильтоном (Гамильтониан  $H$ ). Она представляет полную энергию консервативной системы (принцип максимуса Понтрягина), когда производная  $H$  по координатам системы  $H = 0$ , производные – импульсы являются числом степеней свободы системы – «интегрирующие». Считалось, что в интегрирующих системах путем инвариантного преобразования можно «пренебречь» эффектом взаимодействия между подсистемами. Эта концепция о внутренней *единообразности* систем оказалась *неверной*. Ибо все природные динамические системы – это непрерывно взаимодействующие и эволюционирующие подсистемы, которые никак практически не сводятся к схеме Гамильтоновских консервативных подсистем. Основным свойством консервативных систем является сохранение фазового объема, энергии и отсутствие в фазовом пространстве аттракторов. Их поведение определяется только начальными условиями.

В настоящее время многие ученые предлагают использовать для задач теории управления 3 и 4-й пути – подходы:

3. Путь, опирающийся на понятия инвариантов, асимптотической устойчивости и структуры фазового пространства; А. Андронов – путь, опирающийся на исследования Пуанкаре. И. Пригожин – диссипативные структуры (*А. Пуанкаре и А. Ляпунов*).

4. Наука о взаимодействии, опирающаяся на концепцию единства процессов самоорганизации и управления (КЕПСУ) в форме синергетической теории управления (СТУ), где нашло отражение решение проблемы нелинейного системного синтеза, т. е. генерации совокупности нелинейных обратных связей, способствующих формированию направленной самоорганизации в многомерных динамических системах. КЕПСУ позволила найти эффективное решение в форме СТУ и основанного на ней метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) (*А.А. Колесников*).

#### **Основные законы управления с учетом процессов термодинамики:**

1. Законы сохранения, законы термодинамики и «Н-теорема» Л. Больцмана.

2. Принцип минимума диссипации энергии, принцип устойчивости.

*Первый закон термодинамики* – закон сохранения энергии, присущ консервативным динамическим объектам с обратимыми процессами.

*Второй закон термодинамики* – закон о необратимости процессов внутри системы с производством энтропии. Состояние системы зависит от ее внутренней упорядоченности. В условиях неравновесности энтропия является источником не деградаций, а порядка в системе.

В соответствии с определениями Пригожина и Стенгерса [1] термодинамика имеет три области существования:

1. Равновесная область (энтропии, потоки и силы равны нулю).

2. Слабо неравновесная область (термодинамические силы слабы).

3. Сильно неравновесная или нелинейная область (внутренние потоки являются сложными функциями сил и способны эволюционировать в увеличении энтропии).

#### **Проблемы нелинейной динамики кибернетических и синергетических систем управления:**

*Техносфера и косная материя* и их подсистемы подвержены динамическим взаимодействиям и обмену энергией, веществом, информацией. К тому же они обладают *крупномасштабностью, сложностью структур, открытостью, нелинейностью, многомерностью и многосвязностью, мобильностью компонент и непредсказуемой динамикой*. В этих системах возникают *критические и хаотические режимы с самоорганизацией*.

Трудности исследования этих систем превосходят возможности классических методов ТАУ. Поэтому необходимо использование принципов и механизмов самоорганизации и самоорганизующихся систем. Здесь система не просто взаимодействует – это *взаимодействие* компонентов на получение фокусированного результата.

Как отмечено в работах [2–4] в области теории управления имеет место во многом *необоснованное, чрезмерное абстрактно-математическое формальное представление* при составлении и решении уравнений движения системы. При этом доминируют редуccionистские методы решения уравнений. Некоторые особенности анализа и синтеза кибернетико-синергетических систем

рассматривались в работе [3]. Как отмечает А. Красовский [4], в последнее 30-летие теория автоматического управления была чрезмерно математизирована, и наблюдается отход от *физической сущности* управляемых процессов. Им еще в 1990 г. было предложено решение крупной проблемы синтеза систем оптимального управления, направленное на максимальное использование *естественных природных свойств* объекта.

СТУ обеспечивает направленную самоорганизацию динамических систем со многими степенями свободы, выделение параметров порядка. При осуществлении самоорганизации системы происходит изменение управляемых параметров

непредсказуемым образом. Кибернетика разрабатывает алгоритмы и методы управления системой заранее заданным образом (рисунок 1).

**Хронология развития понятий о самоорганизации и самоорганизующихся системах**

В 1947 г. В. Эшби дал определение самоорганизующихся систем в кибернетике.

В 1959 г. Г. Форстер в неявной форме изложил термодинамическую концепцию самоорганизации.

В 1976 г. И. Пригожин сформулировал самоорганизацию как процесс возникновения диссипативных структур в открытой системе и из хаоса (при наличии энергии извне).



Рисунок 1 – Базовые положения кибернетической и синергетической теории управления

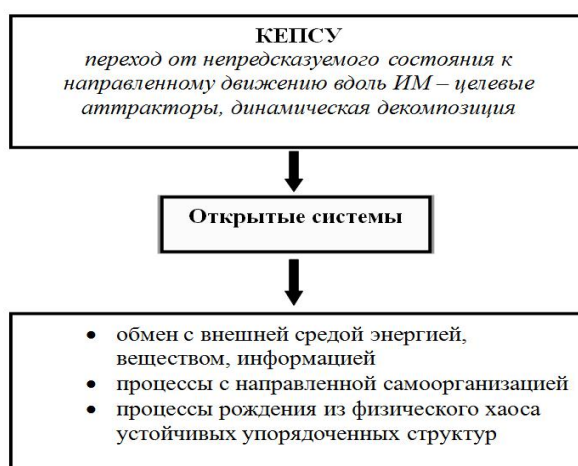


Рисунок 2 – Блок-схема КЕПСУ

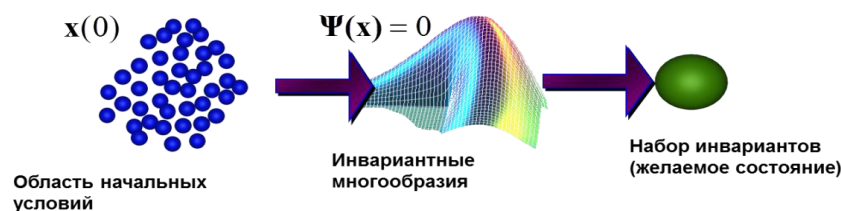


Рисунок 3 – Формирование направленной самоорганизации и инвариантных многообразий (аттракторов) в системах с нелинейным взаимодействием

Г. Хакен создал теорию о взаимодействиях и стихийной самоорганизации (параметры порядка, аттракторы, принцип подчинения), а А.А. Колесников создал концепцию единства процессов самоорганизации и управления (КЕПСУ) (инвариантные многообразия, целевые аттракторы, динамическая декомпозиция, АКАР).

Суть синергетической концепции системного синтеза согласно четвертому пути развития состоит в следующем (рисунок 2):

- целью синтезируемых систем является достижение целевых аттракторов – асимптотических пределов, отражающих желаемые технологические режимы систем;
- целевые аттракторы и инвариантные многообразия (ИМ) отражают физическую сущность процессов, указанные многообразия формируются на основе желаемых технологических (механических, энергетических и др.) инвариантов;
- ИМ позволяют построить механизм аналитической генерации отрицательных и положительных нелинейных обратных связей (ООС и ПОС), которые формируют процессы направленной самоорганизации в синтезируемых системах.

**Алгоритм организации аттракторов вдоль желаемых инвариантных многообразий.** Аттракторы – это притягивающие предельные множества, в которых процесс «расширения-сжатия» фазового пространства и динамическая декомпозиция с механизмом генерации совокупности обратных связей создают устойчивые диссипативные структуры, адекватные физической сущности систем (рисунок 3).

**Способ направленной самоорганизации систем [5]**

*Исходная система:* объект – внешние силы

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, \mathbf{J}, \mathbf{M}). \quad (1)$$

*Расширенная система* (уравнения самоорганизации): объект – закон управления

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}); \\ \dot{\mathbf{w}}(t) &= \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{w}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}(t)$  – вектор переменных состояния;  $\mathbf{u}(x)$  – вектор управлений;  $\mathbf{q}(t)$  – вектор задающих воздействий;  $\mathbf{M}(t)$  – вектор внешних возмущений;  $\mathbf{W}(t)$  – вектор переменных состояния модели возмущений;  $\mathbf{J}(t)$  – вектор параметрических возмущений.

Исключая в исходной системе внешние силы  $[\mathbf{u}(t), \mathbf{q}(t), \mathbf{J}(t), \mathbf{M}(t)]$  в (1), и замыкая прямыми и обратными связями, получаем расширенную систему (2). Внешние силы по отношению к объекту становятся *внутренними силами взаимодействия* открытой расширенной системы с протеканием энергии, вещества или информации от источника синтезируемых управлений. Имеем замкнутую систему с неравновесной ситуацией (2).

Процесс уменьшения числа степеней свободы происходит за счет сил взаимодействия связей от начального состояния к промежуточным последовательно понижающейся размерности ( $\Psi_1 = 0, \dots, \Psi_m = 0$ ), т. е. происходит своего рода «эстафета аттракторов» в зависимости как от внешнего управления, так и от внутренней динамики объекта.

**Метод АКАР – основной метод синергетической теории управления:**

- формирование механизма генерации нелинейных ООС и ПОС;
- формирование и резонансное возбуждение внутренних сил взаимодействия;
- малое изменение начальных условий около границы;
- целевые аттракторы – асимптотическая устойчивость конечного состояния (точка, предельный цикл, тор);
- уменьшение размерности и числа степеней свободы;
- движение к «параметру порядка» и подчинение всех оставшихся координат;

- отображение физической сущности процессов на основе желаемых технологических инвариантов.

Примеры применения метода АКАР для синтеза законов управления нелинейными объектами рассмотрены в работах [6–8]. Синергетический метод АКАР является новым направлением в теории управления, который расширяет понимание сложных процессов управления, так как учитывает общие объективно-энергетические и энтропийно-информационные субстанции в пространстве и времени.

#### *Литература*

1. Пригожин И. Порядок из хаоса / И. Пригожин, И. Стенгерс. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
2. Колесников А.А. Основы и методы синергетической теории системного синтеза / А.А. Колесников. Москва – Таганрог, 2006. 94 с.
3. Шаршеналиев Ж. Об особенностях синтеза кибернетических и синергетических динамических систем / Ж. Шаршеналиев // Известия НАН КР. 2013. № 1. С. 7–20.
4. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления / А.А. Красовский // Автоматика и телемеханика. 1990. № 11. С. 3–28.
5. Колесников А.А. Динамика полета и управление: синергетический подход / А.А. Колесников, В.А. Кобзев. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 198 с.
6. Колесников А.А. Синергетическая теория управления / А.А. Колесников. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
7. Шаршеналиев Ж. О некоторых проблемах синтеза кибернетических и синергетических динамических систем управления / Ж. Шаршеналиев, А.Б. Бакасова // Сб. науч. тр. V межд. науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика». Пятигорск, 2013. Т. 2. С. 120–126.
8. Шаршеналиев Ж. Синтез кибернетических и синергетических динамических систем управления методом АКАР / Ж. Шаршеналиев, А.Б. Бакасова // Докл. НАН КР. 2014. № 1. С. 48–51.