

УДК 62-50:681.5
ББК Ж 30

МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОТКРЫТЫМИ СИСТЕМАМИ: КОНЦЕПЦИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Подвальный С. Л.¹, Васильев Е. М.²
(Воронежский государственный технический
университет, Воронеж)

Рассматриваются предпосылки, состояние и перспективы развития концепции многоальтернативности в задачах автоматического управления динамическими системами. Показано, что эта концепция, отвечая известному информационному принципу необходимого разнообразия У. Эшби, объединяет собою эволюционные механизмы открытых биологических систем, обеспечивая последним высокую степень приспособительного, адаптивного взаимодействия с внешней средой. Приведены различные примеры реализации технических систем многоальтернативного управления, подтверждающие ожидаемое из биологических аналогий возникновение в них свойств робастности и целевую эффективность. Сформирована общая функциональная схема многоальтернативных систем управления, построена соответствующая математическая модель и проанализированы перспективы их совершенствования в классе интеллектуальных управляющих систем.

Ключевые слова: многоальтернативные системы, интеллектуальное управление, адаптивное поведение.

¹ Семён Леонидович Подвальный, доктор технических наук, профессор (spodvalny@yandex.ru).

² Евгений Михайлович Васильев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (vgtu-aits@yandex.ru).

На основе принципов эволюции и функционирования биологических открытых систем, их близости к идеям кибернетики и системного анализа в 1977–1980 годах в работах [61, 62, 64] впервые была сформулирована концепция многоальтернативности структур технических и социально-экономических информационно-управляющих систем широкого назначения.

В обзоре [67] подведены итоги развития этой концепции за прошедшие три с половиной десятилетия и дана классификация сложившегося к настоящему времени многообразия таких систем на разных уровнях их обеспечения – аппаратном, программном и алгоритмическом – применительно к задачам моделирования и управления; обработки информации; принятия решений; проектирования, тестирования и разработки программного обеспечения. Однако уровень аппаратной реализации, включающий крупный класс систем автоматического управления, из-за его большого объема был рассмотрен очень кратко. Согласно [67], под многоальтернативными системами управления понимаются такие информационно-управляющие системы, в которых наиболее важные функции сбора, обработки и выдачи информации реализуются несколькими альтернативными способами. Настоящая работа содержит более подробное изложение возможностей применения идеи многоальтернативности в задачах автоматического управления открытыми динамическими системами.

1. Введение в проблему

Открытые системы любой природы, необходимым условием функционирования которых является активное взаимодействие с внешней средой [10], характеризуются, как объекты управления, рядом достаточно очевидных свойств:

- высокая и чаще всего неизвестная размерность пространства внутренних состояний, включая неопределённое количество иерархических уровней, подсистем и связей между ними;
- нестационарность структуры и параметров;
- нелинейность процессов;

– разнообразный вид и диапазоны изменения внешних воздействий.

Изменчивость и разнообразие режимов и условий работы открытых систем приводят к структурным, параметрическим и сигнальным неопределённостям их формального описания. В связи с этим теория автоматического управления такими системами развивалась по пути создания адаптивных и робастных методов, обеспечивающих низкую чувствительность, или грубость замкнутых систем к указанным изменениям [8, 19, 30, 48, 49, 58, 60, 70, 71, 89, 91, 100].

В наиболее общем виде для объекта [55]

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)[w(x,t)^T \theta + u] + \delta(t), \\ y &= h(x); \end{aligned}$$

где x , u , y – векторы состояния, управления и регулируемого выхода; $f(x)$ – характеристическая матрица; $g(x)$, $h(x)$ – матрицы управления и выхода; θ – вектор неизвестных факторов объекта; $w(x, t)$ – некоторая известная матричная функция; $\delta(t)$ – неизменяемые внешние воздействия, простейший алгоритм параметрической ($\theta = \text{const}$) адаптивной стабилизации по состоянию при отсутствии внешних воздействий ($\delta(t) = 0$) может быть записан в виде:

$$(2) \quad \begin{aligned} u &= u_0(x) - w(x,t)^T \hat{\theta}, \\ \dot{\hat{\theta}} &= \gamma w(x,t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x); \end{aligned}$$

в котором $V(x)$ – выбранная определённым образом функция Ляпунова; γ – постоянный коэффициент; $u_0(x)$ – обратная связь по состоянию. Подстановка управления u из (2) в (1) обеспечивает прямую компенсацию влияния вектора неопределённостей θ на систему.

Этот алгоритм обеспечивает нулевую установившуюся ошибку, но при наличии возмущений ($\delta(t) \neq 0$) интегральный закон адаптации (2) приводит к неограниченному параметрическому дрейфу управления u , и тогда переходят к адаптивной робастной стабилизации (σ -модификации алгоритма (2)) [89, 105, 106]:

$$(3) \quad \dot{\hat{\theta}} = \gamma w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) - \sigma \hat{\theta},$$

($\sigma = \text{const}$) обеспечивающей работоспособность системы при наличии внешних воздействий ($\delta(t) \neq 0$) и параметрической нестационарности ($\theta = \theta(t)$), однако с ненулевой установившейся ошибкой.

В тех случаях, когда имеет место функциональная неопределённость (вектор $\theta = \theta(x, u, t)$ является неизвестной функцией x и u) и присутствуют внешние воздействия ($\delta(t) \neq 0$), задача адаптации решается статической обратной связью [59, 109]:

$$(4) \quad \hat{\theta} = \gamma w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x),$$

или [27]:

$$(5) \quad \hat{\theta} = \gamma |w(x, t)|^2 \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x),$$

при этом ненулевая установившаяся ошибка по-прежнему не устраняется.

Поскольку ни один из алгоритмов (2)–(5) в полной мере не отвечает реальным задачам управления, то для обеспечения нулевой установившейся ошибки при наличии неконтролируемых внешних возмущений ($\delta(t) \neq 0$) и функциональной неопределённости ($\theta = \theta(x, u, t)$) используются так называемые робастно-адаптивные алгоритмы с переключающей функцией $\sigma(\hat{\theta}_2)$ [55, 116]:

$$\hat{\theta}_1 = \gamma_1 w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x),$$

$$(6) \quad \dot{\hat{\theta}}_2 = \gamma_2 w(x, t) \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) - \sigma(\hat{\theta}_2) \cdot \hat{\theta}_2,$$

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2;$$

представляющие собою модифицированную комбинацию алгоритмов (2)–(4).

Если рассмотреть группу методов адаптации не по координатам состояния x объекта, а по вектору выхода y , то хронологически можно аналогично проследить:

– последовательное их усложнение от задач простейшей параметрической стабилизации (2) к алгоритмам робастно-адаптивного типа (6);

– преодоление проблемы высокой относительной степени $p > 1$ (p – разность порядка знаменателя n и порядка числителя m передаточной функции объекта: $p = n - m$);

– привлечение процедур параметризации модели объекта [55, 59, 110] (представление модели объекта в виде слагаемых, линейных по настраиваемым параметрам регулятора, даёт возможность вычисления градиента функционала качества по этим параметрам и воспользоваться, например, настройкой по скоростному градиенту).

В результате были созданы методы адаптации высокого порядка, а также более совершенные итеративные методы обхода интегратора. Динамический порядок регуляторов, реализующих эти методы, составляет $2n(2p - 1) - 2$ и $3n + m + 2$ соответственно [55] и в несколько раз превышает исходный порядок объекта. За исключением простейших случаев [23], указанные алгоритмы требуют значительных вычислительных ресурсов и неприемлемы для промышленной реализации [55]. В работах [9, 35] констатируется, что в теории адаптивных систем «в практику внедряется лишь ничтожная доля теоретических достижений», и указывается на «плохую реализацию на практике имеющихся схем адаптивного управления» из-за их громоздкости и сложности.

В связи с этим в настоящее время исследования в области адаптивного управления направлены:

– на получение более простых универсальных алгоритмов, в том числе и чисто робастных – не содержащих процедур адаптации и идентификации [9, 35, 55, 59];

– создание комбинированных методов по аналогии с (6), сочетающих в себе различные алгоритмы [12, 24, 80];

– разделение сложной задачи адаптации на иерархически организованную совокупность простых подзадач, решаемых последовательно для каждой координаты состояния объекта [20, 45].

Принципиально нерешённой остаётся проблема структурной неопределённости объекта, чаще называемая немоделируе-

мой, или паразитной динамикой: необходимым условием для построения алгоритмов адаптивного и робастного управления является априорная известность порядка объекта n и его относительной степени p . Об информационных и энергетических ограничениях, возникающих при реализации этих алгоритмов на практике, отмечается также в [42].

Сложившееся противоречие между теорией и практикой робастно-адаптивного управления объясняется тем, что его развитие направлено на расширение границ неопределённости нашего представления об управляемой системе. Такой подход, безусловно, нашёл своё применение на практике. В то же время общая методология теории управления придерживается другого пути, в рассматриваемом смысле противоположного указанному: разработка способов управления объектами должна опираться на глубокое изучение протекающих в них процессов и условий функционирования [46, 54]. Эта методология оформилась в настоящее время в синергетический подход к задачам управления: в открытых системах, обменивающихся с внешней средой информацией, веществом и энергией, доминирующую роль играют процессы взаимодействия элементов системы, и синтез управления такими системами сводится к организации этого взаимодействия с максимальным учётом естественных свойств объекта [43]. С ростом сложности объектов значимость синергетических методов управления возрастает, поскольку такие объекты приобретают качественно новые – общесистемные свойства, отсутствующие у простой совокупности отдельных элементов. В частности, неопределённость, как мера нашего незнания, является всего лишь отражением общесистемной способности многовариантного функционирования сложного объекта в условиях его открытого взаимодействия с внешней средой.

Иными словами, параметрическую или структурную нестационарность системы и изменчивость её динамического порядка следует рассматривать как качественные изменения способа её функционирования в соответствии с изменившимися внешними условиями.

Отсюда вытекает возможность расширения концептуального подхода к построению законов управления открытыми си-

стемами: от создания сложных универсальных алгоритмов, охватывающих несколько видов неопределённостей и обеспечивающих вследствие этого достижение цели управления при изменчивости свойств объекта, перейти к концепции многоальтернативного управления (от лат. *alternare* – чередовать), имеющего в своём распоряжении множество специализированных алгоритмов (в том числе робастно-адаптивных), применяемых в разных состояниях системы.

Обсуждению этой концепции посвящён предлагаемый обзор.

2. Биологические аналогии

Обращение к биологическим аналогиям задач управления является приёмом, восходящим к основополагающей идее кибернетики, сформулированной Н. Винером в виде тезиса о подобии процессов управления и связи в машинах, живых организмах и обществах [26].

Антропогенные (создаваемые человеком) системы управления в той или иной степени копируют живую природу, стремясь найти некоторые фундаментальные принципы, использование которых позволит реализовать в этих системах обсуждаемые здесь механизмы их активного взаимодействия с внешней средой.

2.1. ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ

Важнейшей предпосылкой существования и эволюции биологических систем в условиях влияния внешней среды является достаточное и даже избыточное разнообразие её таксонов, благодаря которому в ситуациях, когда изменение среды обитания становится неблагоприятным для существования какого-либо элемента системы, его место занимают одна или несколько других биологических групп, способных восстановить нарушившееся равновесие в системе, например – непрерывность пищевой цепочки [1, 28, 29, 95]. Более того, в работе [102] отмечалось, что при наступлении экологического кризиса, когда под угрозой исчезновения находится вся достаточно крупная

биологическая система, в последней наблюдается усиленный рост числа новых таксонов и поиск среди них приемлемого варианта для восстановления равновесия в биосфере.

Мерой разнообразия внутри одного таксона может являться информационная энтропия по Шеннону [64, 94]:

$$(7) \quad H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i; \quad p_i = \frac{N_i}{N}; \quad N = \sum_{i=1}^n N_i;$$

где n – количество элементов в таксоне, например, видов; N_i – мощность элемента i таксона (численность вида i), $i = 1, \dots, n$. Предложена также более удобная для сравнительных оценок мера вариабельности – коэффициент многоальтернативности μ , отражающий, в отличие от (7), не абсолютную, а относительную возможность выбора [67]:

$$(8) \quad \mu = \frac{H}{H_{max}} = \frac{-\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i}{\log_2 N}.$$

Если рассматривать последствия межэлементного взаимодействия биологической системы, то конкуренция и естественный отбор, приводящие, например, к сокращению внутривидового разнообразия, одновременно сопровождаются компенсационным ростом разнообразия родов, т.е. разнообразия более высокого иерархического уровня биосистемы.

Эмпирически установлено, что в типичном биологическом семействе имеется много родов с немногими видами в каждом роде и немного родов с большим количеством видов [29], например [6]: в 13-ти семействах отряда Gruiformes журавлеобразных 51 род содержит 1...3 вида, 10 родов – 4...10 видов и только 5 родов включает более 10 видов птиц (таксономические уровни в биологии: вид, род, семейство, отряд, класс, тип).

2.2. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПРИСПОСОБИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Переходя к приспособительным механизмам отдельных уровней системы, выделим механизм специализации и разделения функций, обеспечивающий устойчивое существование таксона в разнообразных экологических нишах.

В [29] приводится пример отряда жуков Coleoptera, видовое разнообразие которых составляет пятую часть всех видов живых организмов на Земле, обладающих уникальным примером разделения функций между парами крыльев: передние жёсткие надкрылья придают телу жука прочность и компактность, целесообразные для передвижения в воде, почве или древесине, а мягкие задние крылья – способность к полёту.

Подобное разделение функций было обнаружено у рыб, для которых характерны миграции море–река–море, в ходе которых они сталкиваются с существенным изменением солёности воды и необходимостью перестройки способа поддержания своего водно-солевого баланса.

В работах [81, 82] на примере сравнения нескольких видов таких рыб показано, что наилучшая приспособленность к изменению солёности наблюдается у видов с активной стратегией адаптации, при которой происходит полная смена типа осморегуляции. Такая осмоконформность оказалась возможной благодаря постоянному наличию в жаберном эпителии рыб ионофильтрующих клеток (ионоцитов) как морского, так и пресноводного типов. В зависимости от солёности окружающей среды активизируется соответствующий тип клеток.

Аналогичным примером является эволюция зрения животных, перешедших от ночного образа жизни к дневному. Этот переход привёл к появлению у приматов двух типов светочувствительных клеток: высокочувствительных палочек, обеспечивающих сумеречное нецветовое зрение, и менее чувствительных, но приспособленных к различению цветов – колбочек [107]. Такое разделение функций зрительных рецепторов позволило существенно расширить экологическую нишу высших млекопитающих.

2.3. БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУР

Говоря о роли разделения функций в механизмах эволюции, следует отметить, что этот механизм проявляется уже на молекулярном уровне простейших систем в виде блочного принципа формирования новых структур из уже «опробован-

ных», т.е. жизнеспособных биологических блоков, имеющих специализированные функции [44, 74, 75].

Блочный принцип формирования биологических систем хорошо согласуется с гипотезой М. Эйгена о решающем значении матричной репликации в процессе появления жизни [96, 97]. С точки зрения эволюции на основе матричной репликации для успешного продолжения довидовой самоорганизации важна не степень приспособленности системы, а её самоинструктирующая способность к дальнейшему безошибочному репликационному росту – селективная ценность.

В биологических, а также в химических системах такая селективная ценность системы может определяться как разность энергии взаимодействия комплементарных и некомплементарных пар элементов – блоков системы. Эта гипотеза находит своё подтверждение в законе гомологических рядов Н.И. Вавилова [11], обнаруженным им на уровне уже видового разнообразия биологических систем: у близких видов в процессе эволюции возникают одни и те же варианты признаков, причем параллелизм изменчивости проявляется в самых разных условиях существования видов. Следовательно, генетическая система направляет комбинаторные перестройки в хромосомах помимо влияния внешней среды. По мнению С.В. Мейена [52], источником параллелизма является структурная организация и взаимодействие элементов, т.е. их системность.

Примечательно, что взаимосвязанную специализацию и блочность биологических структур Л. Берталанфи относит к характерным внутренним свойствам открытых систем [7]: «Самодифференцирующиеся системы, развивающиеся в направлении все более высокой сложности (путем уменьшения энтропии), возможны – по термодинамическим соображениям – только как открытые системы. Дифференциация внутри развивающегося эмбриона или организма происходит согласно внутренним законам их организации. ... Закрытые системы развиваются в направлении гомогенности».

Обсуждая механизмы построения сложных открытых систем, Э.М. Галимов [28] отмечает, что «наиболее экономный способ производства низкоэнтропийного продукта состоит в

комбинировании уже имеющихся низкоэнтропийных структур, эволюция в нашем понимании должна происходить не только и даже не столько путем малых изменений, сколько скачками, обусловленными новыми сочетаниями старых структур», и, возражая сторонникам креационизма, противопоставляет постулату изначально «неупрощаемой сложности» [101] биосистем понятие «неусложняемой простоты», подчёркивая, тем самым, комбинаторную природу эволюции.

2.4. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Принцип блочно-модульной эволюции был распространён непосредственно на системы управления биологическим организмом [76]. В частности, в работе [86] рассматривается теория эволюционного усложнения биологических систем управления на основе последовательных метасистемных переходов: существующие подсистемы объединяются общим механизмом управления, в результате чего формируется система качественно нового иерархического уровня, которая, в свою очередь, является подсистемой более высокого уровня управления.

Широко известным примером иерархической организации приспособительных механизмов в биологических системах является процесс гомеостаза [98], который осуществляется в общем плане за счёт системы управления с двумя и более иерархическими уровнями, одни из которых непрерывно поддерживают заданное состояние организма при небольших изменениях в окружающей среде, а другие реагирует только на критические отклонения этого состояния и запускают, при появлении таких отклонений, механизмы существенной перестройки организма, которые носят качественно новый характер, в частности, могут быть прерывистыми, ступенчатыми, порождающими альтернативные структуры управления (У. Эшби в [98] приводит пять (!) независимых механизмов стабилизации содержания глюкозы в крови человека).

Такая иерархия управления в результате накопления, наращивания фонда приспособлений образует многослойный защитный «пояс», предохраняющий от непредвиденных изменений окружающей среды [44]. При этом подразумевается

существование у организма развитой системы информационного обеспечения сведениями об условиях функционирования.

Рассматриваемый многоальтернативный подход к управлению в открытых системах сформулирован У. Эшби в виде информационного принципа необходимого разнообразия [99]: «Только многообразие может уничтожить многообразие», – согласно которому дискретное разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия управляемого объекта. Непревзойдённым примером многообразия состояний системы управления является нервная система человека, информационная ёмкость которой составляет около 10^{13} битов [95, 112] и на несколько порядков превосходит многообразие его генов, рис. 1.

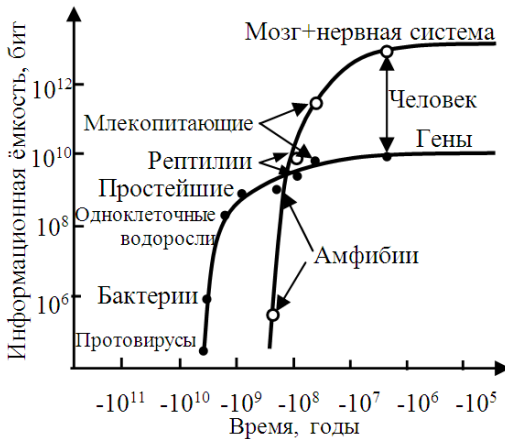


Рис. 1. Развитие генетической и нейронной информационной ёмкости в ходе биологической эволюции [112]

Последнее обстоятельство в контексте нашего анализа иерархической организации биологических систем позволяет отнести нервную систему к оперативному управлению ассоциативного типа на уровне конкретной биологической особи, а механизм генной адаптации – к механизму управления селективной ценностью и естественным отбором на более высоком, но обладающем меньшим разнообразием видовом уровне.

Представленный анализ биологических аналогий многоальтернативного управления является далеко не полным (в энциклопедии [4] можно найти несколько сот подобных примеров), но позволяет аргументированно заключить, что открытые биологические системы достигли высокой степени приспособительного, адаптивного взаимодействия с внешней средой путём селективной специализации этого взаимодействия на основе набора достаточно простых механизмов разделения функций, модульности и иерархичности структуры, и не испытывают ограничений, связанных с растущей функциональной сложностью организмов. Эти приспособительные механизмы объединяются единой концепцией многоальтернативности и, следуя [69], составляют принцип 3М: «модульность – многоуровневость – многоальтернативность».

Использование этой концепции в задачах управления открытыми техническими системами принципиально снимает противоречие между сложностью функционирования всей системы управления в целом и её отдельных элементов в силу «неусложняемой простоты» реализации последних и возможности их выбора из необходимого множества альтернатив.

3. Техническая реализация

С целью наглядного сопоставления примеров технической реализации систем многоальтернативного управления с их биологическими прототипами сгруппируем эти системы по способу выбора альтернатив:

- детерминированный выбор варианта управления из конечного множества альтернатив одного уровня иерархии, соответствующий наименее гибкому, но в то же время высшему уровню адаптивной специализации открытых систем;

- случайный выбор с последующим кратковременным сохранением (запоминанием) из конечного или бесконечного множества альтернатив нескольких уровней иерархии – соответствует гомеостазису с адаптацией;

- существенно неопределённая стратегия выбора управления из бесконечного множества иерархически организованных

альтернатив, соответствующая ассоциативным формам адаптации с запоминанием (предвидением), свойственным организмам с развитой нервной системой.

3.1. СИСТЕМЫ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ ВЫБОРОМ УПРАВЛЕНИЯ

Эффективность многовариантного управления даже в простейших его видах осознана достаточно давно. В работах [67, 88] отмечалось, что ещё в 1957 г. А.М. Лётовым [50] было предложено изменять знак обратной связи в регуляторе, т.е. изменять его структуру, выбирая одну из двух альтернатив в зависимости от текущего значения регулируемой величины. Развитие работ в этом направлении привело к созданию теории систем с переменной структурой [36, 87], в рамках которой остановимся на классическом примере, иллюстрирующем робастно-адаптивные свойства этих систем.

В [36] рассматривается структурно неустойчивая система (9) $\ddot{\varphi}(t) + kb\varphi(t) = kbg(t)$,

в которой φ – регулируемая координата; g – задающее воздействие; k, b – параметры системы, причём b может быть нестационарным (к подобным системам можно отнести, например, систему ориентирования углового положения космического корабля). В зависимости от значения произведения kb фазовые траектории её движения имеют вид, представленный на рис. 2 (штриховые линии), и при любых значениях kb соответствуют незатухающим гармоническим колебаниям с частотой $\omega = \sqrt{kb}$.

Анализ рис. 2 показывает, что выбрав некоторые значения k_1 и k_2 так, чтобы $k_1b > 1$, а $k_2b < 1$, и принимая в нечётных квадрантах $k = k_1$, а в чётных $k = k_2$, получим асимптотически сходящуюся траекторию движения. Иными словами, стабилизация системы достигается путём детерминированного переключения вариантов её структуры в зависимости от текущего состояния. Переключающая функция $S = \varphi \cdot \dot{\varphi}$ представляет собою поверхность $S = 0$:

$$(10) \begin{cases} \ddot{\varphi}(t) + k_1b\varphi(t) = k_1bg(t) & \text{при } S > 0, \\ \ddot{\varphi}(t) + k_2b\varphi(t) = k_2bg(t) & \text{при } S \leq 0. \end{cases}$$

Устойчивость системы (10) сохраняется в диапазоне изменения нестационарного параметра b , не нарушающем условий $k_1 b > 1$ и $k_2 b < 1$, и если этот диапазон известен, она всегда может быть обеспечена соответствующим выбором k_1 и k_2 .

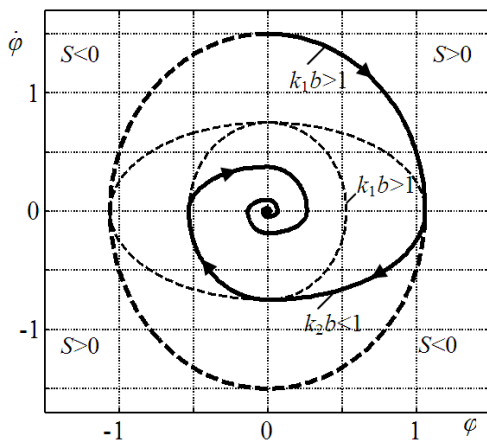


Рис. 2. Фазовые траектории системы с робастной устойчивостью в заданном диапазоне b

Изменяя в системе (10) набор вариантов структуры и вид поверхности S , можно создать устойчивое скользящее движение по этой поверхности, не зависящее от параметров системы, т.е. обеспечить не только стабилизацию, но и частичную робастность траекторий системы [87], например:

$$(11) \begin{cases} \ddot{\varphi}(t) + kb\varphi(t) = kbg(t) & \text{при } S > 0, \\ \ddot{\varphi}(t) - kb\varphi(t) = kbg(t) & \text{при } S < 0; \end{cases}$$

где варианты структуры отличаются знаком обратной связи, а переключающая функция имеет вид:

$$(12) S = c\dot{\varphi} + \varphi,$$

в котором константа c не зависит от параметров системы. На рис. 3 уравнение $S = 0$ представляет собою прямую, содержащую отрезок скольжения fd , при попадании на который траектория движения системы определяется только видом S , и в данном случае приобретает монотонный характер.

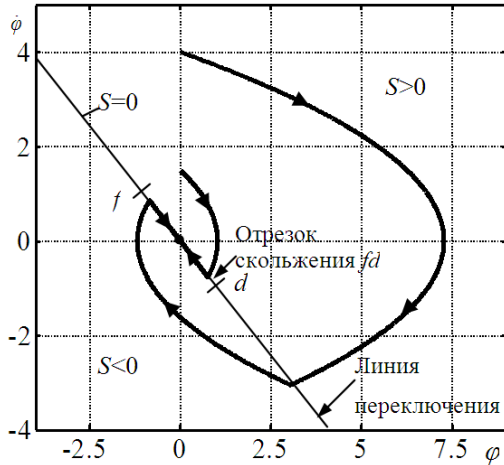


Рис. 3. Фазовые траектории системы, робастной на участке скольжения fd

Следует отметить, что демонстрируемые в указанных примерах свойства робастности систем реализуются в полной мере только при возможности контроля или наблюдения полного вектора координат её состояния.

В качестве системы с переменной структурой можно привести также пример нелинейного фильтра, структурная схема которого показана на рис. 4 [53, 57]:

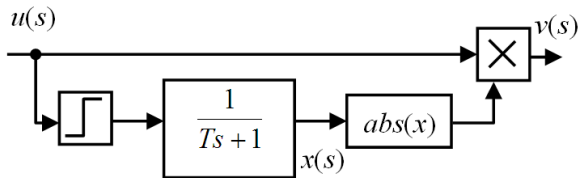


Рис. 4. Структурная схема нелинейного корректирующего фильтра

Для этого фильтра

$$v(t) = u(t) \cdot |x(t)|,$$

$x(t)$ является решением уравнения:

$$T\dot{x}(t) + x(t) = \text{sign}[u(t)],$$

T – постоянный параметр.

Для первой гармоники входного сигнала $u(t) = A \sin(\omega t)$ комплексный коэффициент передачи $\tilde{W}(A, \omega)$ рассматриваемого фильтра имеет вид

$$\tilde{W}(A, \omega) = \tilde{P}(A, \omega) + j\tilde{Q}(A, \omega),$$

где $\tilde{P}(A, \omega)$ и $\tilde{Q}(A, \omega)$ – коэффициенты гармонической линеаризации [57]:

$$\tilde{P}(\omega) = \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left(1 + \frac{1}{3} \cos 2\theta \right);$$

$$(13) \quad \tilde{Q}(\omega) = \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left(\frac{1}{3} \sin 2\theta \right);$$

$$\theta(\omega) = \text{arctg}(-\omega T),$$

которые зависят только от частоты ω входного сигнала и не зависят от его амплитуды A .

Сопоставление частотных характеристик линейного $L_n(\omega)$, $\varphi_n(\omega)$ и нелинейного $L_h(\omega)$, $\varphi_h(\omega)$ корректирующих устройств:

$$(14) \quad W_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad L_n(\omega) = 20 \lg W_n(\omega);$$

$$L_h(\omega) = 20 \lg \sqrt{\tilde{P}^2(\omega) + \tilde{Q}^2(\omega)}; \quad \varphi_h(\omega) = \arctg \frac{\tilde{Q}(\omega)}{\tilde{P}(\omega)},$$

с наиболее близкими функциями $L_n(\omega)$ и $L_h(\omega)$ дано на рис. 5 [18], из которого следует, что подавление высокочастотного диапазона спектра входного сигнала $u(t)$ нелинейным фильтром выполняется эффективнее, чем в линейном, при вносимом запаздывании по фазе, не превышающем (-20) град.

Таким образом, использование переменной структуры позволяет реализовать корректирующие устройства, сочетающие в себе полезные свойства линейных систем – независимость характеристик от амплитуды сигналов с нелинейным свойством независимости фазовой и частотной характеристик. Расширяя

понятие независимости можно сказать о появлении у таких фильтров робастных свойств.

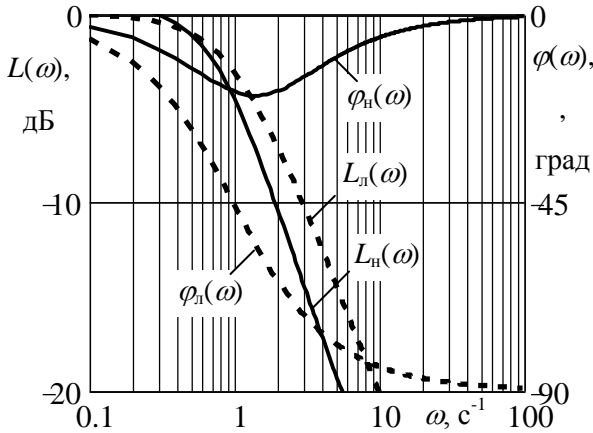


Рис. 5. Амплитудные и фазовые частотные характеристики линейного $L_{л}(\omega)$, $\varphi_{л}(\omega)$ и нелинейного $L_{н}(\omega)$, $\varphi_{н}(\omega)$ фильтров

Детерминированный выбор из небольшого числа альтернатив широко используется для программного управления различными объектами [13, 66, 67].

В качестве наиболее очевидного примера эффективности такого многоальтернативного программного режима можно привести алгоритм управления процессом тепловлажностной обработки бетонных изделий [25]. Этапы этой обработки (нагревание, выдерживание и остывание) характеризуются существенной нестационарностью процесса затвердевания бетона: неравномерное испарение воды затворения, изменение скорости конденсации пара, проявление экзотермического эффекта [5]. По этой причине традиционное одноканальное управления полной тепловой мощностью, подводимой к пропарочной камере, не обеспечивает точное соблюдение температурно-временного графика и требует большого количества переключений прецизионных паровых клапанов, существенно снижая, тем самым, срок их эксплуатации.

Разделение функций управления между тремя каналами – нерегулируемый канал подачи тепла (30% мощности) и два регулируемых канала: канал малой мощности W_m , работающий при небольших отклонениях фактической температуры T_ϕ в камере от заданного значения T_3 , и канал большой мощности W_6 , подключаемый при больших ошибках, позволило повысить точность регулирования и вдвое снизить суммарное число переключений паровых клапанов во всех трёх каналах регулирования по сравнению с одноканальной системой. Процесс регулирования показан на рис. 6.

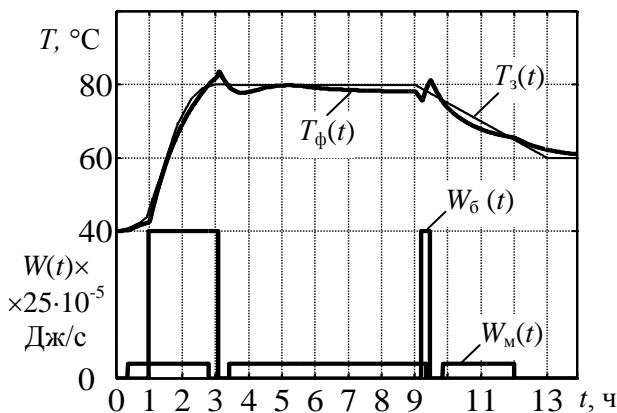


Рис. 6. Процесс регулирования в системе с тремя каналами подачи тепловой мощности

В задачах взаимосвязанного регулирования многомерными системами переход к альтернативным вариантам управления можно осуществлять по условию попадания некоторой обобщённой характеристики системы в различные, в общем случае пересекающиеся области ξ_0, ξ_1, \dots пространства регулируемых координат $y = [y_1 y_2 \dots y_m]^T$. В качестве такой характеристики обычно используют нормы [65, 66]:

$$N_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^m \alpha_i (y_i - y_{i0})^2},$$

$$N_2 = \sum_{i=1}^m \alpha_i |y_i - y_{i0}|,$$

$$N_3 = \max_i |y_i - y_{i0}|,$$

в которых y_{i0} – номинальные (требуемые) значения регулируемых величин; α_i – весовые коэффициенты, определяющие вклад y_i в цель управления. Алгоритмы многоальтернативного взаимосвязанного управления многомерными процессами полимеризации приведены в работах [3, 33, 34, 63, 66].

В нелинейных динамических системах, характеризующихся множеством стационарных состояний: каталитические и химико-технологические системы [84], системы с широтно-импульсной модуляцией [37], термогидродинамические системы [56], многовариантность управления позволяет устанавливать и поддерживать в них качественно отличающиеся режимы функционирования. В работе [14] приводятся результаты исследования модели химической динамики, предложенной О.Е. Рёсслером [111]:

$$\dot{x}(t) = -y(t) - z(t),$$

$$(15) \quad \dot{y}(t) = x(t) + a \cdot y(t),$$

$$\dot{z}(t) = b \cdot x(t) - u(t)z(t) + x(t)z(t);$$

где $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – координаты пространства состояний; $a = 0,38$; $b = 0,3$ – параметры системы; $u(t)$ – управляющее воздействие.

На рис. 7 показаны фазовые портреты системы (15) с различным характером траекторий движения, выбор которых определяется целью управления.

В этой связи следует отметить, что возможность многоальтернативного управления стимулирует изучение ранее недоступных для использования режимов функционирования объектов и использование этих режимов для повышения качества технологических процессов.

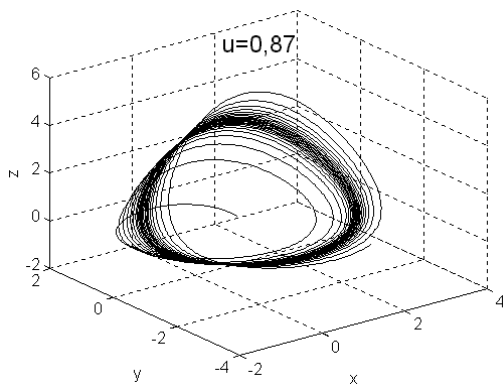


Рис. 7а. Режим неустойчивой работы системы (расходящиеся колебания), $0 \leq u < 0,88$

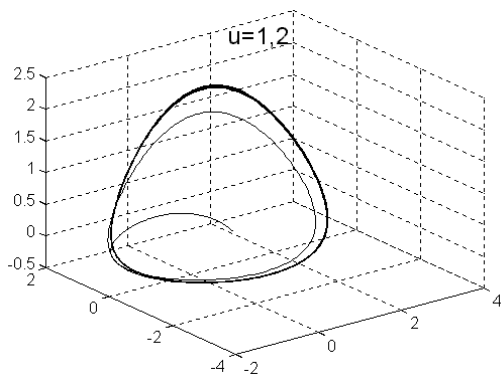


Рис. 7б. Режим устойчивых колебаний системы с предельным циклом первого порядка; $0,88 \leq u < 2$

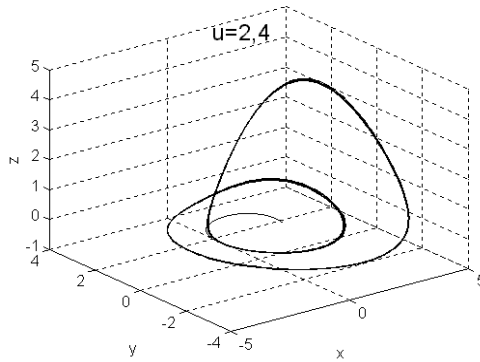


Рис. 7в. Режим устойчивых колебаний системы с предельным циклом второго порядка; $2 \leq u < 2,81$

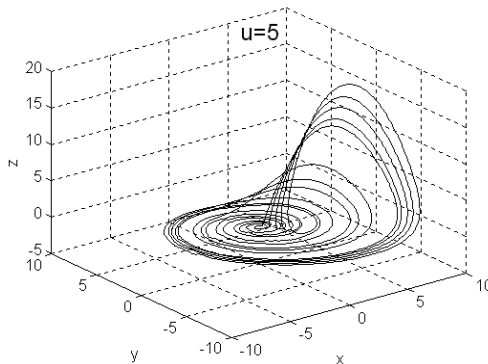


Рис. 7г. Режим устойчивой работы системы с хаотическими колебаниями; $2,81 \leq u$

В работе [17] показана возможность повышения эффективности процесса теплообмена с помощью системы с переменной структурой, содержащей два замкнутых контура управления по отклонению дисперсии скорости частиц рабочей жидкости и предусматривающей переключение этих контуров для выбора режима регулирования плотности теплового потока, подводимого к теплообменнику.

Качественное отличие двух возможных режимов теплообмена (конвективного и хаотического) показано на рис. 8.

Результаты моделирования работы типового теплообменника с внутренним источником энергии показали, что использование хаотического режима по сравнению с конвективным позволило увеличить коэффициент теплопередачи на 17%.



Рис. 8а. Линии тока жидкости в установившемся режиме конвективного теплообмена

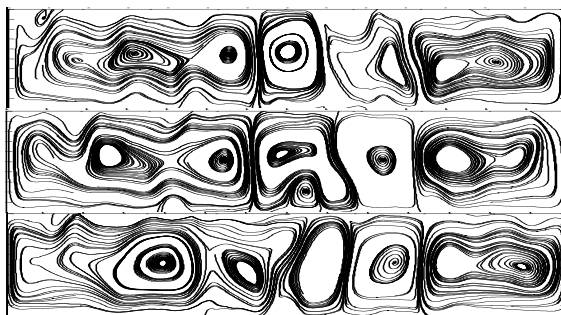


Рис. 8б. Линии тока жидкости в нестационарном режиме турбулентного теплообмена в последовательные моменты времени с интервалом 40 с

Дополнительные возможности, открываемые при использовании многоальтернативного детерминированного выбора управления, были обнаружены также при исследовании генераторов электрических колебаний, описываемых системой уравнений [13, 16, 32]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{1}{C_1} \cdot \left((x_2 - x_1) \cdot \frac{1}{R} - f(x_1) \right), \\
 (16) \quad \dot{x}_2 &= \frac{1}{C_2} \cdot \left((x_1 - x_2) \cdot \frac{1}{R} + x_3 \right), \\
 \dot{x}_3 &= \frac{1}{L} \cdot (e - x_2);
 \end{aligned}$$

где x_1, x_2 – напряжения в определённых точках схемы; x_3 – ток в цепи с индуктивностью L ; $e(t)$ – эдс источника управляющего сигнала; $f(x_1)$ – нелинейная зависимость тока от напряжения x_1 с отрицательным дифференциальным сопротивлением:

$$\begin{aligned}
 f(x_1) &= -5 \cdot 10^{-4} x_1^6 - 1 \cdot 10^{-4} x_1^5 + 1,98 \cdot 10^{-2} x_1^4 + \\
 &+ 4,2 \cdot 10^{-2} x_1^3 - 0,18 x_1^2 - 1,12 x_1 + 0,56;
 \end{aligned}$$

C_1, C_2, R – значения емкостей конденсаторов и сопротивление резистора соответственно.

В частности, в работах [13, 16] показано, что в нелинейных электрических цепях, подобных (16), возможно не только подержание двух режимов колебаний – периодических и хаотических, но существует дополнительная возможность формирования хаотических аттракторов различного вида (например, рис. 9), множество которых может составить алфавит кодирования информации в каналах передачи данных отличающихся повышенными помехоустойчивостью и защищённостью [73, 83, 93].

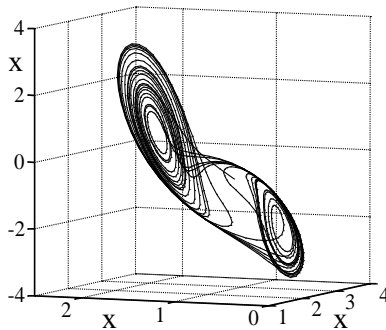


Рис. 9а. Режим хаотических колебаний при $e = 0,34$ В

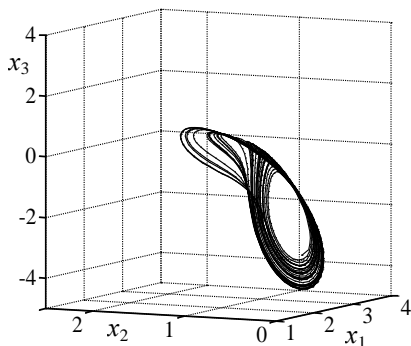


Рис. 9б. Режим хаотических колебаний при $e = 0,5 В$

Очевидно, что системы с детерминированным выбором вариантов многоальтернативного управления, являясь его простейшей разновидностью, сформировались хронологически первыми и нашли широкое применение на практике.

3.2. СИСТЕМЫ СО СЛУЧАЙНЫМ ВЫБОРОМ УПРАВЛЕНИЯ

Существенным недостатком систем с детерминированным выбором управления является их «неприспособленность» к самоорганизации структуры, необходимость в которой возникает при непредвиденных перестройках в объекте, приводящих, например, к изменению его динамического порядка, топологии и знаков причинно-следственных связей. Многообразие таких перестроек может быть настолько большим, что заранее установить детерминированное соответствие некоторого управления каждому из этих состояний становится невозможным. В биологических системах с этой задачей справляется рассмотренный выше процесс гомеостаза с адаптацией – случайным поиском управления, завершающимся в каждой конкретной ситуации выработкой условного рефлекса.

Техническим прототипом систем со случайным выбором управления является гомеостат У. Эшби [98].

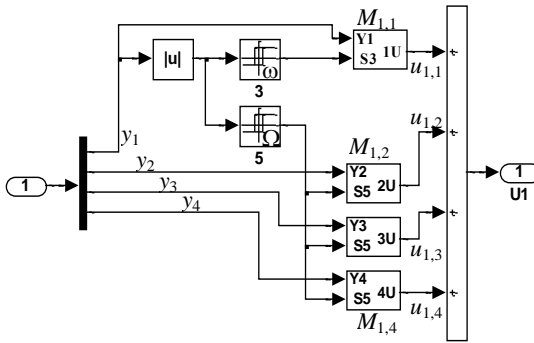


Рис. 10. Структурная схема локальной подсистемы со случайным выбором управления

Пример анализа адаптационных способностей гомеостата с кратковременной памятью приведён в [15] для виртуальной многомерной системы 16-го порядка с четырьмя идентичными локальными подсистемами (рис. 10), на входы которых поступает вектор $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_4]^T$ состояния объекта, а с выхода снимается управление $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_4]^T$.

Подсистема управления содержит четыре стохастических мультипликатора $M_{i,j}$, $j = 1, \dots, 4$, каждый из которых в зависимости от текущего состояния объекта относительно областей ω и Ω (соответственно – малых и больших отклонений: $\omega \subset \Omega$) осуществляет умножение текущего значения регулируемой величины $y_j(t)$ на случайную величину $\xi_{i,j}(t)$, равномерно распределённую на отрезке $\xi_{i,j}(t) = [-\xi_{i,j,max}, \xi_{i,j,max}]$:

если $y_i \in \omega$, ($\omega = [-3; 3]$), то все мультипликаторы умножают $y_j(t)$ на некоторые постоянные числа $\xi_{i,j}$. В этом режиме состояние объекта близко к заданному, и случайные вариации управления не требуются;

если $y_i \notin \omega$, но $y_i \in \Omega$, ($\Omega = [-5; 5]$), то мультипликатор $M_{i,i}$ использует случайные значения $\xi_{i,i}(t)$, т.е. в системе дополни-

тельно начинает действовать локальная стохастическая стабилизация по регулируемой величине y_i ;

если $y_i \notin \Omega$, то все мультипликаторы $M_{i,j}$, $j = 1, \dots, 4$, участвуют в стохастической стабилизации с использованием полного вектора $y(t)$. В этом режиме эффективно используются перекрёстные связи многомерной системы.

В итоге можно записать общее выражение для управления $u_i(t)$ по полному вектору $y(t)$:

$$(17) \quad u_i(t) \Big|_{y_i \notin \Omega} = \sum_{j=1}^4 u_{i,j}(t) \Big|_{y_i \notin \Omega} = \sum_{j=1}^4 y_j(t) \cdot \zeta_{i,j}(t).$$

Как только в результате управления в момент времени $t_{\Omega,i}$ выполнится условие $y_i \notin \omega$ и $y_i \in \Omega$, генераторы случайных чисел, входящие в мультипликаторы $M_{i,j}$, $j \neq i$, отключаются, запоминая на своём выходе значения $\xi_{i,j}(t_{\Omega,i})$, $j \neq i$. Аналогичное сохранение значений $\xi_{i,i}(t_{\omega,i})$ реализуется в моменты $t_{\omega,i}$ при вхождении регулируемой величины y_i в область ω : $y_i \in \omega$. Таким образом, в режимах локальной стабилизации управление имеет вид:

$$(18) \quad \begin{aligned} u_i(t > t_{\Omega,i}) \Big|_{y_i \notin \omega} &= y_i(t) \cdot \zeta_{i,i}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_j(t) \cdot \zeta_{i,j}(t_{\Omega,i}); \\ u_i(t > t_{\omega,i}) \Big|_{y_i \in \omega} &= y_i(t) \cdot \zeta_{i,i}(t_{\omega,i}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_j(t) \cdot \zeta_{i,j}(t_{\Omega,i}). \end{aligned}$$

В изложенном алгоритме управления количество N альтернативных структур определяется выражением

$$N = \sum_{k=0}^4 C_4^k \cdot 2^k = 81$$

и оказалось достаточным для парирования заданного диапазона внешних возмущений и изменений внутренних параметров.

Иллюстрация стабилизирующих свойств многоальтернативного управления приведена на рис. 11 для примера отработки системой ступенчатых возмущающих воздействий $f = [f_1 \dots f_4]^T$, поступающих в моменты времени 5, 10, 15 и 20 с соответственно. Реакция неуправляемого объекта на эти возму-

щения приводит к поочерёднему выходу из области Ω всех компонент регулируемого вектора y (рис. 11, маркер 1).

В замкнутой системе наблюдается стабилизация положения равновесия системы в заданных областях $\Omega = [-5; 5]$ и $\omega = [-3; 3]$ (рис. 11, маркер 2).

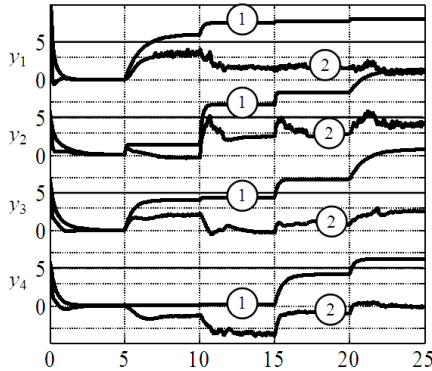


Рис. 11. Иллюстрация стабилизирующих свойств системы со случайным выбором управлений

Обратим внимание, что работоспособность системы и реализация в ней адаптивных свойств были обеспечены в наиболее неблагоприятных с кибернетической точки зрения условиях равновероятного выбора альтернативного варианта управления, отсутствия долговременного запоминания найденного варианта и полной неопределённости динамического порядка объекта, его параметров и внутривидовых связей. Это обстоятельство подтверждает возникновение робастно-адаптивного поведения систем многоальтернативного управления как их принципиального свойства.

3.3. СИСТЕМЫ С СУЩЕСТВЕННО НЕОПРЕДЕЛЁННОЙ СТРАТЕГИЕЙ ВЫБОРА

Приспособительные свойства систем со случайным выбором управлений могут быть значительно улучшены, если:

ввести долговременное запоминание соответствия s_i каждого найденного альтернативного варианта управления u_i и состояния x_i объекта, $x_i \xrightarrow{s_i} u_i$ («накопление адаптаций» [98]);

с помощью установленного множества S ($s_i \in S$) соответствий случайный равновероятный поиск управления u_i заменить его выбором по текущему состоянию x_i .

В качестве примеров систем, обладающими свойствами, наиболее близкими к указанным, можно привести системы с нечётким выбором [22, 38, 79], для которых характерны важные черты многоальтернативного управления:

– многоальтернативность выбора: для каждой значимой текущей ситуации x устанавливается своё нечёткое правило вывода с соответствующим весом, т.е. способ формирования управления в системе изменяется в соответствии с состоянием объекта;

– многокритериальность выбора: нечёткие решающие правила в состоянии одновременно оперировать несколькими критериями, характеризующими состояние объекта;

– параллельность выбора: принятие решения по каждому правилу нечёткого вывода может осуществляться независимо – параллельно во времени, с последующим объединением частных решений u_i в результирующее управление.

Использование нечётких решающих правил при выборе альтернативных вариантов является, по-существу, введением в систему памяти S – накопленного опыта оператора о целесообразном для каждого состояния объекта алгоритма управления, и отвечает требованию долговременного запоминания выбора. Вместе с этим в рамках выбранного варианта управления (текущего решающего правила) могут формироваться внутренние параметры алгоритма с помощью задания функций принадлежности для значений используемых лингвистических переменных, т.е. в системе реализуются два уровня иерархии управления, принципиально необходимые для адаптации [98].

Кроме того, нечёткий подход к анализу альтернатив управления занимает промежуточное положение между полностью

детерминированным и случайным выбором и целесообразен по двум причинам:

– реализация полностью детерминированного выбора управления с ростом количества значимо отличающихся состояний объекта требует соответствующего роста вычислительных ресурсов;

– возникновение состояния объекта, близкого одновременно к нескольким зафиксированным в памяти ситуациям, при нечётком выборе позволяет получить результирующее управление, вес компонент которого будет соответствовать степени близости этого состояния к указанным ситуациям. Эта особенность нечёткого выбора снижает возможность возникновения грубых ошибок управления и в плане биологических аналогий является прообразом предвидения.

Указанные причины дали основание отнести рассматриваемый способ выбора альтернатив к существенно неопределённым стратегиям выбора, характерным для высшей нервной деятельности [38].

Эффективность такой существенно неопределённой стратегии выбора продемонстрирована в [22] на примере управления структурно неустойчивым объектом – обратным маятником с горизонтально перемещаемой опорой. В качестве математической модели маятника использовалась система уравнений

$$(19) \begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} - m_2L(\ddot{\alpha}\cos\alpha - \dot{\alpha}^2\sin\alpha) = F - F_{\text{тр}}, \\ F_{\text{тр}} = \mu[m_1g + m_2\cos\alpha(g \cdot \cos\alpha - \ddot{x}\sin\alpha - \dot{\alpha}^2L)\text{sign}(\dot{x})], \\ -\ddot{x}\cos\alpha + L\ddot{\alpha} - g\sin\alpha = 0; \end{cases}$$

определяющая в качестве регулируемых величин угловое положение $\alpha(t)$ маятника и координату $x(t)$ его подвижной опоры, а также общий порядок объекта, равный четырём. (Обозначения: m_1, m_2 – массы опоры и сосредоточенная масса маятника соответственно; L – длина маятника; g – ускорение свободного падения; μ – коэффициент сухого трения опоры; $F_{\text{тр}}$ – сила сухого трения; F – внешняя сила, приложенная к подвижной опоре).

Нетривиальной особенностью поставленной задачи стабилизации объекта является наличие всего одного канала управления (сила F), в то время как количество регулируемых величин (критериев управления) равно двум: $\alpha(t)$ и $x(t)$.

Эта особенность потребовала привлечения идеи разделения регулирования движений $\alpha(t)$ и $x(t)$ во времени (необходимость такого разделения для конечной длительности процесса стабилизации сложной системы обоснована в [98]), в результате чего для решения задачи оказалось достаточным формирование всего десяти решающих правил (альтернатив).

Результаты моделирования процесса стабилизации маятника с одновременным его горизонтальным перемещением по переключающему закону x_0 представлены на рис. 12 для массы маятника $m_2 = 20 \dots 200$ кг, изменяющейся в 10 раз.

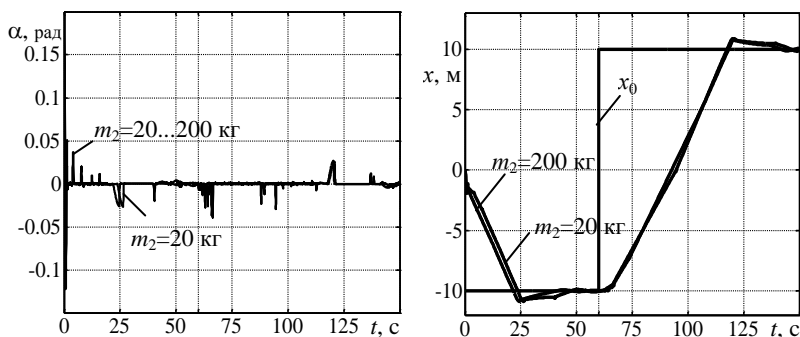


Рис. 12. Стабилизация маятника при возвратно-поступательном перемещении опоры

Анализ рис. 12 указывает на существовании у системы высоких робастных свойств.

Полученный результат потребовал использования полного четырёхмерного вектора состояния объекта: $\alpha(t)$, $\dot{\alpha}(t)$, $x(t)$, $\dot{x}(t)$. Кроме того, проследивая биологические аналогии, отметим, что представленная в примере система не является самообучаемой, т.е. в ней отсутствуют механизмы получения и накопления новых альтернативных вариантов управления.

4. Перспективы развития

На основе проведённого анализа сформулируем основные требования к управляющей части открытых систем:

1) приспособляемость системы к изменениям условий функционирования обеспечивается соответствующими изменениями внутренней структуры и параметров её управляющей части, т.е. её многоальтернативностью;

2) многообразие возможных альтернативных состояний управляющей части открытой системы не должно уступать многообразию условий её функционирования;

3) изменения внутренней структуры и параметров системы обеспечиваются по меньшей мере двумя иерархически связанными видами обратной связи по её состоянию: обратной связью по критическим отклонениям переменных системы, используемой для качественных, как правило, структурных изменений в управлении, и обратной связью, реализующей регулирование и параметрическую настройку при небольших, некритических отклонениях в рамках выбранного варианта управления;

4) выбор альтернативного варианта управления, адекватного текущему состоянию объекта, необходимо предполагает получение полной информации о координатах этого состояния;

5) теоретически предельным по своей эффективности способом выбора альтернативного управления является детерминированная дифференциация всех соответствий «состояние объекта – управление»;

6) многоальтернативность алгоритмов управления подразумевает наличие нескольких каналов управления объектом, число k которых может превосходить количество n регулируемых координат. Наличие взаимосвязи между этими каналами определяет возможность заблаговременной реакции управления на возможное предстоящее изменение состояния объекта, т.е. свойство предвидения;

7) в управляемых открытых системах должен быть предусмотрен механизм формирования и сохранения новых альтернатив управления, причём этот механизм целесообразно построить на комбинаторном поиске нового сочетания из имеющегося

многообразия способов (блоков) управления. В общем случае в многоальтернативной системе с памятью следует различать адаптацию как процесс выбора адекватного управления из уже имеющегося множества альтернатив, и адаптацию как обучение – процесс формирования новой альтернативы с последующим её запоминанием.

Общий вид функциональной схемы многоальтернативной системы управления, отвечающей перечисленным требованиям, приведён на рис. 13.

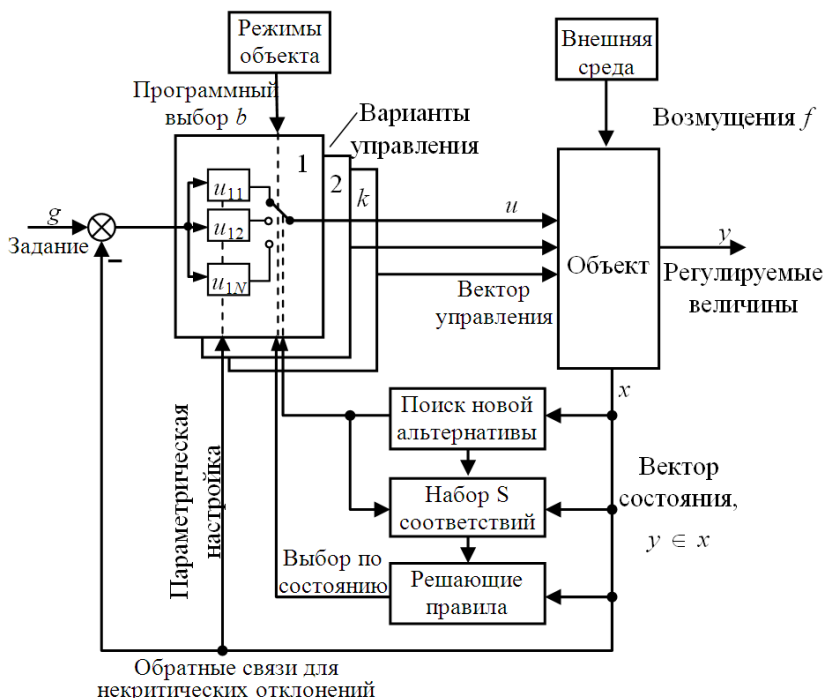


Рис. 13. Функциональная схема системы многоальтернативного управления

Показанные на рис. 13 блок поиска альтернатив, блоки вариантов управления u_{iN} и соответствий $s_i \in S$ и блок решающих

правил реализуют процедуры обучения, хранения его результатов и принятия решений соответственно.

Формальное описание системы многоальтернативного управления может быть представлено в виде (20)–(25):

$$(20) \begin{cases} \dot{x} = K(x, t) + N(x, t) \cdot u + F(x, t) \cdot f; \\ y = L(x, t) + S(x, t) \cdot u + H(x, t) \cdot f, \end{cases}$$

$$(21) x_j \xrightarrow{r_{ij}} s_{ij}; \quad r_{ij} \in R; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, N_i},$$

$$(22) x_j \xrightarrow{s_{ij}} u_{ij}; \quad s_{ij} \in S, \text{ или } b_j \xrightarrow{d_{ij}} u_{ij}; \quad d_{ij} \in D,$$

$$(23) u = [u_{ij}(p_{ij}, Q)]; \quad p_{ij} = P_{ij}(x_{ij}),$$

$$(24) q(t) = \text{extr}_\ell q(s_{i, N_i + \ell}); \quad q(t) = q(g(t), x(t)); \quad \ell_i = 1, 2, \dots,$$

$$(25) Q(t) = \text{extr}_{ij} Q(u_{ij}); \quad Q(t) = Q(g(t), x(t)),$$

где (20) – описание объекта управления в пространстве состояний x с векторами управления u и возмущения f с помощью нестационарных матриц K, N, F, L, S, H ; (21) – процедуры принятия решений (решающие правила) r_{ij} при выборе необходимого соответствия s_{ij} между текущим состоянием x_j объекта и вариантом алгоритма управления u_{ij} ; (22) – выбор варианта управления u_{ij} из множества альтернатив $j = 1, 2, \dots, N_i$ по текущему состоянию x_j , а также при программном назначении режима b_j работы системы с помощью функциональных взаимосвязей $d_{ij} \in D_i$; (23) – формирование вектора управления u в соответствии с выбранной альтернативой u_{ij} , текущим значением функции цели $Q(t)$ и параметрами $p_{ij} = P_{ij}(x_j)$, настраиваемыми контуром параметрического управления с алгоритмами P ; (24) – процедуры обучения, обеспечивающие синтез новых взаимосвязей $s_{i, N_i + \ell}$ по целевому критерию $q(t)$ обучения; (25) – общая цель управления $Q(t)$, достигаемая на множестве альтернатив u_{ij} .

Обзор указанных функций системы многоальтернативного управления позволяет сделать вывод о ключевой роли процедур поиска новых альтернатив, их запоминания и принятия текущих решений. Эти процедуры составляют существо так называемых интеллектуальных систем управления, определяющих общую

перспективу развития теории автоматического управления [39, 68, 72].

Остановимся на некоторых направлениях реализации этих процедур в открытых многоальтернативных системах.

4.1. АКТИВНЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Биологическим прототипом процедур обучения является процесс нервной деятельности живых организмов, в результате которого формируется набор приобретённых рефлексов, обеспечивающих заблаговременную реакцию – подготовку организма к событию, которое ещё не произошло, но может произойти вследствие сложившейся ситуации [2].

Исключительной особенностью биологических нейросетей являются [2, 31, 40, 47, 85]:

- накопительный характер обучения, позволяющий сохранять без искажений старую информацию в сети;
- избирательный характер дообучения – к имеющемуся отображению внешней среды добавляются только ранее не встречавшиеся ситуации;
- распределённость памяти по значительной части сети, обеспечивающая воспроизводимость всей информации даже при значительных нарушениях в структуре нейросети.

Свойства накопления, избирательности и распределённости памяти являются взаимообусловленными, т.е. составляют, по существу, целевую функцию нейросети как системы, направленной на достижения полезных для организма результатов [2, 77].

Механизмами обучения и запоминания, наиболее близкими к своему биологическому прототипу, обладают искусственные нейронные сети, обладающие способностью к поиску новых альтернатив и сохраняющие многообразие найденных соответствий S между состоянием и управлением $x_i \xrightarrow{s_i} u_i$ в виде параметров сети. Однако перечисленные свойства биологических нейронных сетей в известных искусственных сетях в полной мере не достигаются [31, 47, 92].

Наиболее существенные трудности вызывает проблема переобучения сети, заключающаяся в росте её ошибок при предъявлении обучающих ситуаций сверх некоторого, априорно неизвестного достаточного количества. В биологических нейросетях подобное явление не происходит. Это несоответствие привело в настоящее время к незаслуженной практической дискредитации искусственных нейронных сетей и постепенному смещению методов реализации искусственного интеллекта в сторону теории машинного обучения, опирающейся на статистический аппарат принятия решений [104, 108]. Причина этого заключается в неадекватном воспроизведении процессов биологических нейросетей в форме пассивного отражения множества S «ситуация–управление» с помощью сепарабельных функций, совокупность параметров (весов) которых определяет собою все накопленные в процессе обучения отображения S .

Современные представления о нервной системе как о структурном ансамбле нервных клеток [2, 41] указывают на необходимость введения в механизм запоминания не только параметрических, но и ступенчатых структурных перестроек более высокого иерархического уровня организации, т.е. реализации концепции многоальтернативного управления на уровне нейросети как подсистемы. При этом критерием перестройки является не минимизация внутрисетевых связей, а степень обеспечения общесистемной цели всего организма [103]. Эта цель достигается за счёт избыточности состава нейросети и организации непрерывной активной перестройки структуры и поиска параметров, обеспечивающих накопление новых соответствий s_i и одновременно устойчивость (нечувствительность) сети к внешним возмущениям и внутренним изменениям, вызванных процессом накопления.

На рис. 14 [51] показана структура обучения простейшей активной нейронной сети с двумя входами ($n = 2$) и четырьмя нейронами ($m = 4$), содержащей искусственно вводимые возмущения ξ_{ij} , возбуждающие в системе неравновесное движение, эквивалентное активному поиску оптимального варианта структуры и параметров.

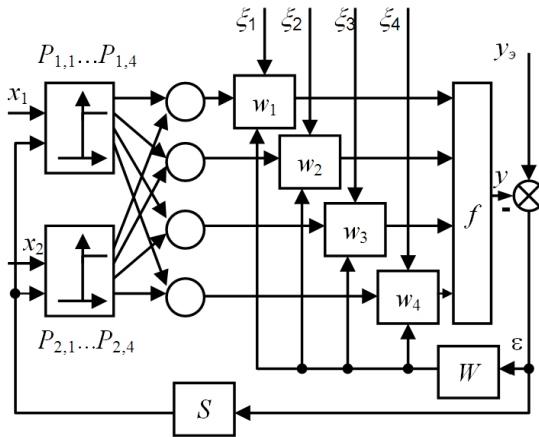


Рис. 14. Структурная схема обучения активной нейросети

При обучении формировались две комбинации сигналов $(x_{1,1}, x_{2,1})$, $(x_{1,2}, x_{2,2})$ и синхронно с ними – эталонный сигнал $y_{эт}$, имеющий два значения $y_{эт1}$, $y_{эт2}$, чередующихся с интервалом $T = 5$ с. Ошибка $\varepsilon = y_{эт} - y$ использовалась для управления блоками параметрического W и структурного S поиска.

Структурная оптимизация в сети заключалась в выборе каналов связи $P_{1,1}, \dots, P_{1,4}$ и $P_{2,1}, \dots, P_{2,4}$ входных аргументов x_1 и x_2 с первым слоем сети, а параметрическая – в варьировании весовых коэффициентов w_j ; f – логистическая функция активации.

На рис. 15 показаны процессы обучения пассивной и активной сетей.

В активной системе хорошо видны вариации Δu , появляющиеся в результате случайного изменения w_j под действием возбуждающих сигналов ξ_j . Время обучения в активной сети по сравнению с пассивной значительно увеличилось – примерно в пять раз – однако анализ результатов обучения, представленный в таблице 1, показывает, что активная сеть в большей мере использует исходное множество структурных связей (6 связей из 8 в активной системе по сравнению с 4 связями из 8 в неактивной) и обеспечивает более равномерное распределение весов в сети.

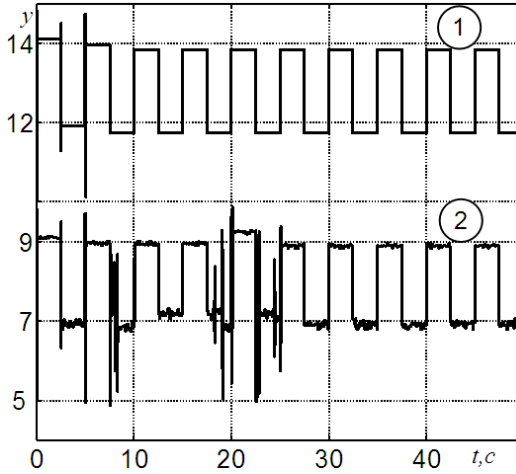


Рис. 15. Процессы обучения пассивной (маркер 1) и активной (маркер 2) нейросетей

Эти отличия хорошо соответствуют избыточности структурных связей и равномерной распределённости возбуждённых нейронов в реальных биологических сетях.

Таблица 1. Структура и весовые коэффициенты обученной нейросети

Тип сети	Каналы воздействия x_1				Каналы воздействия x_2				Весовые коэффициенты			
	1	2	3	4	1	2	3	4	w_1	w_2	w_3	w_4
Пассивная	1	0	1	1	0	0	1	0	0,08	–	0,14	0,07
Активная	1	1	1	1	1	0	0	1	0,07	0,06	0,08	0,11

4.2. САМОИНСТРУКТИРУЮЩИЕ ПРИНЦИПЫ В ОБУЧЕНИИ

Избыточная и, в общем случае, непрерывно растущая размерность активных нейронных сетей приводит к быстрому ухудшению сходимости процедур обучения к глобальному экстремуму – лучшей альтернативной структуре и параметрам нейросети. Опираясь на изложенный выше принцип модульности и селективности при формировании новых альтернатив, можно предположить, что перспективными методами решения этой комбинаторной проблемы являются генетические (или, в широком плане, эволюционные) алгоритмы, основанные не на механизме расщепления родительских признаков, а на матричной репликации (самоинструктировании), при этом в качестве матриц могут выступать уже имеющиеся структурные элементы сети [78].

В качестве примера, иллюстрирующего возможности эволюционных механизмов самоинструктирования, в работе [21] рассмотрено решение тестовой NP-полной квадратичной задачи о назначениях $ta120a$ размерностью $N = 20!$ с заранее известной величиной глобального экстремума [114, 115]. Эта задача решалась двумя алгоритмами:

- типовой генетический алгоритм с генной мутацией одной пары генов в популяции из 6000 особей и формированием новой популяции такого же объёма из лучших родителей и мутантов;
- генетический алгоритм с матричной репликацией одной пары генов в 116280 особях и последующим отбором лучшего варианта отдельно в каждой последовательности.

Для сопоставимости результатов численного эксперимента алгоритм без репликации повторялся 40 раз для популяции объёмом 6000 особей, а алгоритм с репликацией осуществил двукратную индивидуальную эволюцию для 116280-ти особей. Результаты решения представлены в таблице 2.

Содержание таблицы 2 подтверждают эффективность и перспективность применения многоальтернативных принципов модульности и селективности в задачах обучения активных нейронных сетей.

Таблица 2. Сравнительные результаты решения задачи *tai20a* различными генетическими алгоритмами

Вариант алгоритма	Количество эволюций, завершившихся формированием глобального экстремума	
	Генные мутации	Генные и хромосомные мутации
Без репликации	1	2
С репликацией	8	11

4.3. АССОЦИАТИВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРЕДВИДЕНИЯ

Многоальтернативное управление по состоянию открывает возможность реализации в открытых системах функции предвидения, основанной в живых организмах на установлении внутренних связей между альтернативами поведения [98]. Установление таких взаимосвязей предполагает:

- участие каждого состояния в нескольких соответствиях s_i

между состоянием и управлением $x_i \xrightarrow{s_i} u_i$ с различной долей значимости (весомости), т.е. распределённость соответствий;

- параллельность оценивания текущего состояния одновременно по нескольким соответствиям s_i ;

- существование нескольких каналов воздействия на объект с соответствующими подмножествами u_k возможных альтернатив управления (см. рис. 13), причём эти подмножества могут быть связаны иерархически.

Способы реализации перечисленных требования в той или иной мере были раскрыты выше и хорошо вписываются в общую концепцию многоальтернативности информационно-управляющих систем. Сюда, в частности, следует отнести возможность и целесообразность использования в многоальтернативных системах активных нейросетей с использованием нечётких, в том числе и динамических связей, дополнительно обеспечивающих требуемую временную последовательность ассоциаций [90].

Формирование временной последовательности решений, осуществляемое на принципах многоальтернативности, одно- временно сопровождается решением задачи достижимости поставленной цели H_j управления [68]. Можно указать на следующие критические ситуации, возникающие при решении этой задачи:

1. Многообразии $|U^r|$ вариантов управления $u_i^r \in U^r$ на текущем уровне r иерархии системы не обеспечивает требуемую степень достижимости $F(H_j)_{\text{тр}}$ цели H_j управления, и осуществляется переход на более высокий, $(r+1)$ -й альтернативный уровень управления U^{r+1} ($u_i^{r+1} \in U^{r+1}$), обладающий большими возможностями.

2. Требуемое значение $F(H_j)_{\text{тр}}$ достижимости цели H_j управления не может быть реализовано из-за недостаточности имеющихся информационных или энергетических ресурсов системы на всех уровнях её иерархии. В этом случае многоальтернативность управления предусматривает переход к другой цели H_k управления, достижение которой возможно или вынужденно необходимо: $F(H_k) \geq F(H_k)_{\text{тр}}$. Таким образом, в процессе работы системы осуществляется многоальтернативный выбор целей управления, совокупность которых также может иметь иерархическую организацию.

Как уже отмечалось, в целом рассматриваемые проблемы синтеза многоальтернативных систем относятся к общим проблемам построения интеллектуальных систем управления и неразрывно связаны со смежными направлениями в теории этих систем. В этой связи следует упомянуть сравнительно новую – коннективистскую теорию построения интеллектуальных систем [113]. Эта теория известна в большей степени как теория обучения, основанная не на когнитивном накоплении знаний, а на способности установления взаимосвязей между областями знаний, т.е. способности формирования информационной сети с постоянно изменяющимися связями между источниками информации. Не затрагивая здесь весьма злободневную в педагогической среде проблему соотношения когнитивного и коннективистского способов обучения, отметим, что использование

парадигмы коннективизма при реализации активных нейросетей с ассоциативной памятью и предвидением имеет много общего с изложенными здесь идеями многоальтернативности.

5. Заключение

Решение задач управления открытыми системами путём синтеза единых универсальных робастно-адаптивных алгоритмов характеризуется нарастающим противоречием между достигнутыми в этом направлении теоретическими результатами и степенью их реализации на практике.

Обращение к биологическим истокам рассматриваемой проблемы показывает, что многообразие состояний внешней среды привело в процессе эволюции живых организмов к созданию в них соответствующего приспособительного механизма: многоальтернативности функционирования.

Известные примеры реализации этого механизма в системах автоматического управления различного назначения подтверждают его высокую эффективность. В то же время процедуры построения этих систем носят в большинстве случаев эврико-эмпирический, интуитивный характер и не опираются на единую методологическую основу.

Предложенная концепция многоальтернативности как способ понимания механизмов эволюции и адаптации в живых организмах открывает возможность целенаправленного воспроизведения этих механизмов в системах управления динамическими объектами. Эта концепция определяет собою конструктивный принцип «неусложняемой простоты», отвечающий задачам построения современных интеллектуальных систем управления на всех этапах их функционирования – обучения, запоминания и принятия решений.

Литература

1. АЛЕКСЕЕВ А.С., ДМИТРИЕВ В.Ю., ПОНОМАРЕНКО А.Г. *Эволюция таксономического разнообразия.* – М.: Геос, 2001. – 126 с.

2. АНОХИН П.К. *Системные механизмы высшей нервной деятельности*. – М.: Наука, 1979. – 453 с.
3. БАРАБАНОВ А.В., ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Структурное моделирование непрерывных процессов многоцентральной полимеризации // Системы управления и информационные технологии*. – 2008. – №2.2. – С. 216–218.
4. БЕРНИ Д. *Большая иллюстрированная энциклопедия живой природы* (печатается по изданию: *The Kingfisher Illustrated Nature Encyclopedia, London, 2004*). – М.: Махаон, 2011. – 320 с.
5. БАЖЕНОВ Ю.М. *Технология бетона*. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
6. БЁМЕ Р.Л., ФЛИНТ В.Е. *Пятиязычный словарь названий животных. Птицы. Латинский-русский-английский-немецкий-французский / Под общ. ред. В.Е. Соколова*. – М.: Руссо, Русский язык, 1994. – 845 с.
7. БЕРТАЛАНФИ Л. *Общая теория систем – критический обзор / В кн. «Исследования по общей теории систем» / Под общ. ред. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина*. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.
8. БЕСЕКЕРСКИЙ В.А., НЕБЫЛОВ А.В. *Робастные системы автоматического регулирования*. – М.: Наука, 1983. – 240 с.
9. БОБЦОВ А.А., ХОЛУНИН С.А. *Развитие методов робастного управления в задачах адаптации // Научно-технический вестник СПб ГИТМО. Вып. 6. Информационные, вычислительные и управляющие системы*. – СПб.: ГИТМО, 2002. – С. 223–228.
10. *Большая советская энциклопедия. Том 18 / Под ред. А.М. Прохорова*. – М.: Изд-во Советская энциклопедия, 1974. – 632 с.
11. ВАВИЛОВ Н.И. *Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости*. – Л.: Наука, 1987. – 256 с.
12. ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Адаптивные ПИД-регуляторы в системах с запаздыванием // Информационные технологии моделирования и управления*. – 2008. – №6. – С. 653–657.

13. ВАСИЛЬБЕВ Е.М. *Хаотические движения в системах низкого порядка* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №6. – С. 104–108.
14. ВАСИЛЬБЕВ Е.М. *Управление критическими режимами хаотических систем* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №9. – С. 32–39.
15. ВАСИЛЬБЕВ Е.М. *Робастная стабилизация многомерных объектов в системах с переменной структурой* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №11. – С. 24–26.
16. ВАСИЛЬБЕВ Е.М. *Многоальтернативное управление в хаотических системах связи* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №11. – С. 155–158.
17. ВАСИЛЬБЕВ Е.М. *Исследование критических режимов в системах управления теплообменом* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №12.1. – С. 69–72.
18. ВАСИЛЬБЕВ Е.М., ГОНЧАРОВ А.С., МИРОНОВ С.М. *Частотный синтез следящих систем с переменной структурой* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – №4. – С. 52–55.
19. ВАСИЛЬБЕВ Е.М., ГУСЕВ К.Ю. *Модальное управление нестационарными системами* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4, №8. – С. 46–54.
20. ВАСИЛЬБЕВ Е.М., ГУСЕВ К.Ю. *Синтез адаптивных наблюдателей с разделением движений* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – №2. – С. 55–58.
21. ВАСИЛЬБЕВ Е.М., КРУТСКИХ И.В. *Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, №2. – С. 21–23.
22. ВАСИЛЬБЕВ Е.М., ПРОКОФЬЕВА Д.М. *Нечёткое управление структурно неустойчивыми объектами* // Вестник Во-

- ронезского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №10.1. – С. 8–12.
23. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ТАРАТЫНОВ О.Ю. *Синтез адаптивных промышленных регуляторов* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №3. – С. 54–58.
 24. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ТАРАТЫНОВ О.Ю. *Автоматическая настройка регуляторов алгоритмами экстремального поиска* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №4. – С. 59–62.
 25. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ТАРАТЫНОВ О.Ю. *Алгоритмы управления тепловлажностной обработкой бетонных изделий* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №2. – С. 13–16.
 26. ВИНЕР Н. *Кибернетика, или управление и связь в животном и машине.* – М.: Наука, 1983. – 344 с.
 27. ВОРОНОВ К.В., КОРОЛЕВА О.И., НИКИФОРОВ В.О. *Робастное управление нелинейными объектами с функциональными неопределенностями* // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №2. – С. 112–121.
 28. ГАЛИМОВ Э.М. *Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции.* – М.: Едиториал УРСС, 2006. – 256 с.
 29. ГРИНИН Л.Е., МАРКОВ А.В., КОРОТАЕВ А.В. *Макроэволюция в живой природе и обществе.* – М.: Либроком, 2009. – 248 с.
 30. ДЖУРИ Е.Н. *Робастность дискретных систем. Обзор* // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №5. – С. 12–21.
 31. ДЛИ М.И., КРУГЛОВ В.В. *Нечёткая логика и искусственные нейронные сети.* – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
 32. ДМИТРИЕВ А.С., ПАНАС А.И., СТАРКОВ С.О. *Динамический хаос как парадигма современных систем связи* // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 4–26.
 33. ДОРОФЕЕВ В.И., ГУДКОВ В.В., ДОРОФЕЕВ Д.В., ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., МИХАЛЕВ М.В. *Способ управления периодическим процессом полимеризации бутадие-*

- стирольных термоэластопластов* // Патент России № 2188210. – 2002. – Бюл. №5.
34. ДОРОФЕЕВ Д.В., ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Синтез многомерного модального регулятора в АСУТП полимеризации бутадиен-стирольных каучуков* // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2002. – №6. – С. 24–26.
 35. ДРУЖИНИНА М.В., НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу* // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С. 3–33.
 36. ЕМЕЛЬЯНОВ С.В. *Системы автоматического регулирования с переменной структурой*. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
 37. ЖУСУБАЛИЕВ Ж.Т., ТИТОВ В.С. *Бифуркации в широтно-импульсных системах автоматического регулирования*. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2007. – 100 с.
 38. ЗАДЕ Л.А. *Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений*. – М.: Знание, 1974. – 64 с.
 39. *Интеллектуальные системы автоматического управления* / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
 40. КАЛАН Р. *Основные концепции нейронных сетей*. – М., С-Пб, Киев: Вильямс, 2003. – 287 с.
 41. КАРПЕНКОВ С.Х. *Концепции современного естествознания*. – М.: Академический Проект, 2003. – 640 с.
 42. КОЛЕСНИКОВ А.А. *Современная прикладная теория управления. Ч.1: оптимизационный подход в теории управления* / А.А. Колесников, А.А. Красовский, В.Н. Буков, А.Р. Гайдук, А.Г. Гельфгат, О.Т. Вавилов, М.Ю. Медведев. По общ. ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
 43. КОЛЕСНИКОВ А.А. *Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза*. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
 44. КРАСИЛОВ В.А. *Теория эволюции: необходимость нового синтеза* // Эволюционные исследования. Макроэволюция. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. – С. 4–17.

45. КРАСНОВА С.А. *Каскадный синтез наблюдателей состояния для нелинейных систем при наличии возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 3–26.
46. КРАСОВСКИЙ А.А. *Проблемы физической теории управления* // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №11. – С. 3–28.
47. КРУГЛОВ В.В. *Искусственные нейронные сети. Теория и практика.* – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
48. КРУТОВА И.Н., РУТКОВСКИЙ В.Ю. *Робастность систем управления с нелинейной параметрической коррекцией к некоторым видам возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 1991. – №9. – С. 145–159.
49. КУРДЮКОВ А.П. *Основы робастного управления.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. – 220 с.
50. ЛЁТОВ А.М. *Условно устойчивые регулируемые системы (об одном классе оптимальных регулируемых систем)* // Автоматика и телемеханика. – 1957. – №7. – С. 601–604.
51. МАНУКОВСКАЯ М.М., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Активные нейросетевые модели принятия решений* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – №4. – С. 76–78.
52. МЕЙЕН С.В. *Путь к новому синтезу, или куда ведут гомологические ряды?* // Знание – сила. – 1972. – №8. – С. 20–22.
53. *Методы автоматического проектирования нелинейных систем* / Под ред. Ю.И. Топчеева. – М.: Машиностроение, 1993. – 576 с.
54. *Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 5.* / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 784 с.
55. МИРОШНИК И.В., НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами.* – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
56. МУН Ф. *Хаотические колебания.* – М.: Мир, 1990. – 312 с.
57. *Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления* / Под ред. Ю. И. Топчеева. – М.: Машиностроение, 1971. – 467 с.

58. НИКИФОРОВ В.О., ФРАДКОВ А.Л. *Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой* // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №9. – С. 3–22.
59. НИКИФОРОВ В.О. *Робастное управление линейным объектом по выходу* // Автоматика и телемеханика. – 1998. – №9. – С. 87–99.
60. НИКИФОРОВ В.О., СЛИТА О.В., УШАКОВ А.В. *Интеллектуальное управление в условиях неопределенности*. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 226 с.
61. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Адаптация и оптимизация при построении АСУТП с использованием методов имитационного моделирования* // Структурная адаптация сложных систем управления: сб. науч. тр. – Воронеж: Воронежский политехнический институт, 1977. – С. 114–116.
62. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Эволюционные принципы формирования структуры вычислительных систем* // Адаптация в сложных системах управления: сб. науч. тр. – Воронеж: Воронежский политехнический институт, 1979. – С. 60–63.
63. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Моделирование промышленных процессов полимеризации*. – М.: Химия, 1979. – 256 с.
64. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Эволюционные структуры специального математического обеспечения интегрированных систем моделирования* // В кн. «Проблема оптимального выбора в прикладных задачах». – Воронеж: Воронежский государственный университет, 1980. – С. 90–139.
65. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Информационно-управляющие системы мониторинга сложных объектов*. – Воронеж: Научная книга, 2010. – 164 с.
66. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Многоальтернативные системы с переменной структурой автоматического управления процессами непрерывной полимеризации* // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – №4.1. – С. 175–179.
67. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Многоальтернативные системы: обзор и классификация* // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – №2. – С. 4–13.

68. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ЛЕДЕНЕВА Т.М. *Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №11. – С. 17–23.
69. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Сопряжённые системы и градиент при оптимизации динамических систем* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №12.1. – С. 57–62.
70. ПОЛЯК Б.Т., ЩЕРБАКОВ П.С. *Робастная устойчивость и управление*. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
71. ПОЛЯК Б.Т. *Развитие теории автоматического управления* // Проблемы управления. – 2009. – №3.1. – С. 2–18.
72. ПОСПЕЛОВ Д.А. *Ситуационное управление. Теория и практика*. – М.: Наука, 1986. – 284 с.
73. ПУСТОВОЙТ В.И. *Хаос в некоторых задачах информатики* // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 3.
74. РАТНЕР В.А. *Блочно-модульный принцип организации и эволюции молекулярно-генетических систем управления* // Генетика. – 1992. – №2. – С. 5–23.
75. РАТНЕР В.А. *Молекулярно-генетическая система управления* // Природа. – 2001. – №3. – С. 16–22.
76. РЕДЬКО В.Г. *Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты* // Научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2002»: Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты. – М.: МИФИ, 2003. – С. 8–39.
77. РЕДЬКО В.Г. *Модели адаптивного поведения – естественный подход к развитию информационных технологий* // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2004. – №1. – С. 19–43.
78. РЕДЬКО В.Г. *Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики*. – М.: Либроком, 2013. – 224 с.

79. РУТКОВСКАЯ Д., ПИЛИНСКИЙ М., РУТКОВСКИЙ Л. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
80. РУТКОВСКИЙ В.Ю., СУХАНОВ В.М., ГЛУМОВ В.М. *Комбинированное релейно-адаптивное управление ориентацией деформируемого космического аппарата // Автоматика и телемеханика*. – 2012. – №12. – С. 124–136.
81. СЕРКОВ В.М., КОРНИЕНКО М.С. *Динамика концентрации ионов натрия и кальция в крови у восьмилнейного терпуга *Hexagrammos octogrammus Pallas (Scorpaeniformes, Hexagrammidae)* при изменении солёности среды // Вопросы ихтиологии*. – 2003. – №1. – С. 139–141.
82. СЕРКОВ В.М., КОРНИЕНКО М.С. *Структурные и функциональные особенности хлоридных клеток жаберного эпителия дальневосточной краснопёрки *Trybolodon brandti* (сем. *Syprinidae*), адаптированных к воде различной солёности // Научные труды I Съезда физиологов стран СНГ*. – М.: Медицина-здоровье, 2005. – С. 97.
83. СКЛЯР Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
84. СЛИНЬКО М.Г. *Основы и принципы математического моделирования каталитических процессов*. – Новосибирск: Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 2004. – 488 с.
85. ТКАЛИЧ С.А., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Основания и возможности использования искусственных нейросетей в системах прогнозирования // Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2008. – №2. – С. 37–38.
86. ТУРЧИН В.Ф. *Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции*. – М.: ЭТС, 2000. – 368 с.
87. УТКИН В.И. *Скольльзящие режимы и их применение в системах с переменной структурой*. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
88. УТКИН В.И. *Условно устойчивая система с переменной структурой в работе А.М. Лётова // Автоматика и телемеханика*. – 2011. – №11. – С. 140–142.

89. ФОМИН В.Н., ФРАДКОВ А.Л., ЯКУБОВИЧ В.А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
90. ХАЙКИН С. *Нейронные сети: полный курс*. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
91. ЦЫКУНОВ А.М. *Робастное управление нестационарными объектами* // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С. 117–125.
92. ЧЕРНОДУБ А.Н., ДЗЮБА Д.А. *Обзор методов нейроуправления* // Проблемы программирования. – 2011. – №2. – С. 79–94.
93. ШАЛФЕЕВ В.Д., ОСИПОВ Г.В., КОЗЛОВ А.К., ВОЛКОВСКИЙ А.Р. *Хаотические колебания – генерация, синхронизация, управление* // Успехи современной радиоэлектроники (Зарубежная радиоэлектроника). – 1997. – №10. – С. 27–49.
94. ШЕННОН К. *Работы по теории информации и кибернетике*. – М.: Изд. иностр. лит., 1963. – 829 с.
95. ЭБЕЛИНГ В., ЭНГЕЛЬ А., ФАЙСТЕЛЬ Р. *Физика процессов эволюции. Синергетический подход*. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 328 с.
96. ЭЙГЕН М. *Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул*. – М.: Мир, 1973. – 224 с.
97. ЭЙГЕН М., ВИНКЛЕР Р. *Игра жизни*. – М.: Наука, 1979. – 99 с.
98. ЭШБИ У.Р. *Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения*. – М.: Изд. иностр. лит., 1962. – 397 с.
99. ЭШБИ У.Р. *Введение в кибернетику*. – М.: КомКнига, 2005. – 432 с.
100. ЯДЫКИН И.Б., ШУМСКИЙ В.М., ОВСЕПЯН Ф.А. *Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами*. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
101. ВЕНЕ М.Д. *Darwin's Black Box* // The Biochemical Challenge to Evolution. – N.Y.: Simon & Shuster, 1998. – 307 p.
102. СОРЕ E.D. *The primary factors of organic evolution*. – Chicago: The Open Court Publishing Company, 1904. – 547 p.

103. FURMAN M., WANG X.-J. *Similarity Effect and Optimal Control of Multiple-Choice Decision Making* // *Neuron*. – 2008. – №6. – P. 1153–1168.
104. HASTIE T., TIBSHIRANI R., FRIEDMAN J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.
105. HSU L., COSTA R.R. *Bursting phenomena in continuous-time adaptive systems with a σ -modification* // *Automatica*. – 1998. – №1. – P. 429–435.
106. IOANNOU P.A., KOKOTOVIĆ P.V. *Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control* // *Automatica*. – 1984. – №5. – P. 583–594.
107. JACOBS G.H., NATHANS J. *The Evolution of Primate Color Vision* // *Scientific American*. – 2009. – April. – P. 32–39.
108. JAVIER ARTURO CABALLERO OLVERA *Multi-alternative sequential analysis as a realistic model of biological decision-making*. PhD thesis. – University of Sheffield, 2012. – 129 p.
109. KANELLAKOPOULOS I., KOKOTOVIĆ P.V., MORSE A.S. *A toolkit for nonlinear feedback design* // *System and Control Letters*. – 1992. – Vol. 18. – P. 83–92.
110. LION P.M. *Rapid identification of linear and nonlinear systems* // *AAIAA*. – 1967. – №5. – P. 1835–1842.
111. RÖSSLER O.E. *Chemical turbulence: chaos in a small reaction-diffusion system* // *Z. Naturforsch.* – 1976. – 31a. – P. 1168–1172.
112. SAGAN C. *Die Drachen von Eden. Das Wunder der menschlichen Intelligenz*. – München; Zürich: Droemer Knauer, 1978 (Original 1977). – 271 s.
113. SIEMENS G. *Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age* // *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*. – 2005. – №1. – P. 3–10.
114. TAILLARD E.D. *Robust tabu search for the quadratic assignment problem* // *Parallel Computing*. – 1991. – №17. – P. 443–455.
115. TAILLARD E.D. *Comparison of iterative searches for the quadratic assignment problem* // *Location Science*. – 1995. – №3. – P. 87–105.

116. YAO B., TOMIZUKA M. *Adaptive robust control of SISO nonlinear system in a semi-strict feedback form* // Automatica. – 1997. – №5. – P. 893–900.

A MULTI-ALTERNATIVE APPROACH TO CONTROL IN OPEN SYSTEMS: ORIGINS, CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS

Semen Podvalny, Voronezh State Technical University, Voronezh, Doctor of Science, professor (spodvalny@yandex.ru).

Eugeny Vasiljev, Voronezh State Technical University, Voronezh, Cand.Sc., assistant professor (vgtu-aits@yandex.ru).

Abstract: The paper addresses biological origins, the present state and future prospects of a multi-alternative approach to the problem of automatic control in dynamical systems. We show that this approach meets the famous Law of Requisite Variety by Ashby and generalizes natural evolutionary mechanisms of open biological systems supporting their high level of adaptation to environment changes. We provide several examples of multi-alternative control in technical systems. These examples show increase in robustness and efficiency in accordance with predictions of biological analogy. We formulate the general functional scheme of a multi-alternative control system, build its mathematical model and analyze the prospects of their extension in the context of intellectual control systems.

Keywords: multi-alternative control systems, intellectual control, adaptive behavior.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым

*Поступила в редакцию 23.05.2013.
Опубликована 31.03.2014.*