

МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ В КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ КАК МОДЕЛЬ БИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

С. Л. Подвальный, Е. М. Васильев

Воронежский государственный технический университет

Поступила в редакцию 14.01.2015 г.

Аннотация. На основе анализа процессов функционирования биологических систем в условиях изменяющейся внешней среды формулируются принципы многоальтернативного поведения в критических режимах сложных систем широкого назначения. Приведены примеры применения этих принципов. Дано обобщённое описание системы принятия решений, использующей стратегию многоальтернативного поведения.

Ключевые слова: принятие решений, критический режим, многоальтернативное поведение.

Annotation. The authors analyze the functioning of biological systems under changing environment, and then proceed to the essential principles of multiple-choice behavior in critical conditions peculiar to versatile complex systems. Examples of the application of these principles. The paper concludes with the generalized description of the decision making system which involves multiple-choice behavior strategy.

Keywords: decision making, critical conditions, multiple-choice behavior.

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью сложных систем является их способность при определённых условиях качественно изменять своё поведение, что позволяет этим системам функционировать вдали от состояния равновесия, т.е. сложные системы обладают способностью функционировать в некотором смысле критических режимах [1, 2]. В технических приложениях примерами систем, функционирующих в критических режимах, являются структурно неустойчивые объекты – химические реакторы, летательные аппараты, механизмы, описываемые моделью перевёрнутого маятника. К критическим режимам технологических установок и процессов относятся также их предаварийные, неравновесные состояния, из которых возможен необратимый фазовый переход к недопустимому состоянию – отказу. Кроме того, понятие критического режима как некоторого неравновесного состояния можно распространить на широ-

кий класс систем и алгоритмов получения оптимальных проектных решений.

Обеспечение заданного критического или допустимого состояния сложной динамической системы при изменении её параметров и внешних воздействий обычно реализуется методами адаптивного управления.

Вместе с тем, в работах [3, 4] констатируется, что в теории адаптивных систем в практику внедряется незначительная часть теоретических достижений, и указывается на “плохую реализацию на практике имеющихся схем адаптивного управления” из-за их громоздкости и сложности.

Сложившееся противоречие между теорией и практикой робастно-адаптивного управления свидетельствует о необходимости перехода к качественно иным моделям поведения сложных систем в критических режимах. Аналогичная потребность, в частности, NP-проблема, существует в традиционном автоматизированном проектировании на основе детерминированных и стохастических алгоритмов в связи с недостижимостью

глобального экстремума в комбинаторных системах высокой размерности [5].

В связи с этим уместно обращение к эволюционно-биологическим аналогиям рассматриваемой задачи [6], поскольку именно процесс эволюции живых организмов под действием естественного отбора представляет собою непрерывную череду критических режимов – приспособительных реакций этих организмов на угрожающие их существованию условия среды. Как будет показано ниже, природа пошла не по пути грубости (робастности) организмов к внешней среде, а по пути высокодифференцированной адаптации на основе многоальтернативности (от лат. *alternare* – чередовать), предпочитая в качестве вариантов выбора простые структуры.

1. ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КРИТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

1.1. Многоуровневость

Классическим примером многоуровневой организации приспособительных механизмов в биологических системах является процесс гомеостаза [7], 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. На рис. 1 показано схематическое представление этого процесса для двух случаев:

а) параметрический уровень управления, стабилизирующий заданное состояние биосистемы только при не критических отклонениях её физиологических параметров;

б) структурный уровень, запускающий механизмы существенной перестройки организма, которые носят качественно новый характер, в частности – порождающими альтернативные структуры управления.

У. Эшби в [7] приводит пять! независимых механизмов стабилизации содержания глюкозы в крови человека.

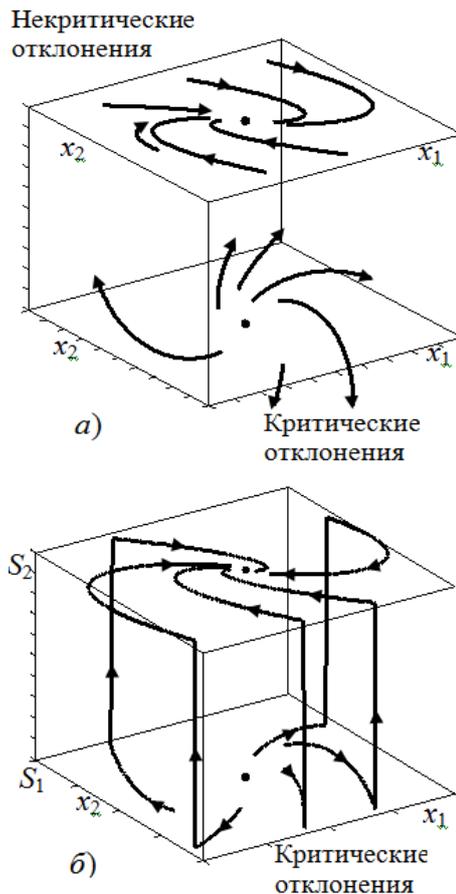


Рис. 1. Представление гомеостаза как многоуровневого управления поведением:
а) параметрический уровень;
б) структурный уровень – переход от структуры S_1 к структуре S_2

Таким образом, многоуровневый принцип функционирования образует, в результате накопления, наращивания фонда приспособлений, многослойный защитный “пояс”, предохраняющий биосистему от непредвиденных изменений окружающей среды [8].

1.2. Модульность

Рассматривая эволюцию как процесс перехода биологической системы через неравновесные состояния к очередному варианту своего построения, следует выделить в этом процессе принцип блочного формирования новых структур из уже “опробованных”, т. е. жизнеспособных биологических блоков, имеющих специализированные функции [8, 9]. В частности, известное многообразие белков обеспечивается комбинациями 20 основных

аминокислот, размещение которых в белке закодировано в генетическом коде цепочкой триплетов, использующих всего четыре нуклеотида: аденин – А, гуанин – G, тимин – Т, цитозин – С. Указанный набор блоков с избытком обеспечивает всё белковое разнообразие животного мира: цепочка длиной всего в 100 триплетов способна сформировать 20^{100} вариантов белков, фактические же размеры последовательностей достигают нескольких тысяч и даже десятков тысяч триплетов.

Блочный принцип формирования биологических систем положен в основу гипотезы М. Эйгена о решающем значении матричной репликации в процессе появления жизни [10]. 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.

Обсуждая механизмы построения систем Э. М. Галимов [11] 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 “неупрощаемой сложности” [12] биосистем понятие “неусложняемой простоты”, подчёркивая этим комбинаторную природу эволюции.

В разделе 2 рассмотрен пример применения принципа модульности для решения NP-задачи поиска проектного решения.

1.3. Многоальтернативность

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 [13]. В работе [14] 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. Без разнообразия невозможна реализация основного фактора эволюции – естественного отбора [15]. Меры разнообразия рассмотрены, например, в [16–18].

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.

Переходя к приспособительным механизмам отдельных уровней системы, выделим механизм специализации и разделения функций, обеспечивающий устойчивое существование таксона в разнообразных экологических нишах. В [15] рассматривается возникновение такой специализации внутри популяции (внутрипопуляционный полиморфизм) на примере раннелетних и позднелетних форм растений одного вида, цветущих в разное время года вплоть до образования яровых и озимых форм.

Подобное разделение функций обнаружено у актинобактерий рода *Rhodococcus*, способных к существованию в экстремальных местообитаниях с нефтяными загрязнениями или высоким содержанием минеральных солей. Эта способность обусловлена дифференциацией в их жизненном цикле четырёх типов клеток, образующих разнообразные способы межклеточной кооперации в колонияльных популяциях бактерий в зависимости от условий среды [19].

Уникальным приспособительным свойством животного мира является существование в живых организмах изначально неспециализированных – стволовых клеток, способных, при необходимости, к дифференциации в любую узкофункциональную клетку ткани [20].

Отмеченный многоальтернативный характер поведения сложных систем сформулирован У. Эшби в виде информационного принципа необходимого разнообразия [21]: “Только многообразии может уничтожить многообразие”.

Можно заключить, что биологические системы достигли высокой степени приспособительного, критического 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.

2. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОСТИ

2.1. Гомеостат

Техническим прототипом систем с критическими неравновесными состояниями является модель гомеостата У. Эшби [22]. Рассмотрим пример реализации этой модели для виртуальной многомерной системы 16-го порядка с четырьмя идентичными локальными подсистемами, на входы которых поступает вектор $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_4]^T$ состояния объекта, а с выхода снимается управление $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_4]^T$ [23]. 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 (докритических) и больших (критических) отклонений: $\omega \subset \Omega$) осуществляет умножение текущего значения регули-

руемой 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 дополнительно 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 при управлении используются перекрёстные связи многомерной системы. В итоге можно записать общее выражение для управления $u_i(t)$ по полному вектору $y(t)$:

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

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:

$$\begin{aligned} u_i(t > t_{\Omega,i}) \Big|_{\substack{y_i \notin \omega \\ y_i \in \Omega}} &= \\ &= y_i(t) \cdot \xi_{i,i}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_j(t) \cdot \xi_{i,j}(t_{\Omega,i}); \\ u_i(t > t_{\omega,i}) \Big|_{y_i \in \omega} &= \\ &= y_i(t) \cdot \xi_{i,i}(t_{\omega,i}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 y_j(t) \cdot \xi_{i,j}(t_{\Omega,i}). \end{aligned} \quad (2)$$

Количество N альтернативных структур определяется выражением:

$$N = \sum_{k=0}^4 C_4^k \cdot 2^k = 81, \quad (3)$$

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

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 о динамическом порядке объекта, его структуре и параметрах. Это обстоятельство подтверждает эффективность многоальтернативного поведения сложных систем в критических режимах функционирования.

2.2. Алгоритм оптимизации с матричной репликацией

Рассмотрим пример применения блочно-модульного принципа многоальтернативности в проектных решениях.

Известна задача проектирования распределительной электрической сети, содержащей n подстанций (узлов), конфигурация которой обеспечивает наименьшие приведённые затраты Z на передачу 1 кВт·ч энергии и одновременно удовлетворяет требованиям к степени резервирования потребителей, допустимым потерям напряжения, коэффициенту мощности, максимальным для данного уровня напряжения сечениям кабелей [24]:

Комбинаторный характер зависимости функции цели от переменных, разнотипность, дискретность и нелинейность ограничений практически исключают решение этой задачи в полной постановке детерминированными методами, и возникает необходимость перехода к эволюционным – генетическим алгоритмам [25]. Однако эффективность типовых генетических алгоритмов с ростом размерности n задачи быстро снижается в связи с проблемой недостижимости глобального экстремума: если при $n = 12$ достижимость глобального экстремума тестовой комбинаторной задачи составляет 100 %, то при

$n = 15$ уже 80 % и, наконец, при $n = 20$ всего 2–5 % [26, 27].

Это обстоятельство имеет биологическую аналогию, сформулированную Н. И. Вавиловым в законе гомологических рядов – родственные виды имеют сходные спектры изменчивости [28]. Прикладная интерпретация этого закона заключается здесь в том, что механизм размножения мейозом (скрещиванием) обладает высокой избирательностью, выражающейся во всё возрастающей частоте порождения себе подобных, что в генетических алгоритмах обуславливает быстрое вытеснение неконкурентоспособных особей из популяции. Очевидно, что при этом так же быстро утрачивается эволюционная пластичность вида и теряется способность порождения уникального решения, изолированно располагающего в пространстве состояний системы.

С целью улучшения сходимости к глобальному экстремуму введём в модель генетического алгоритма заранее заданные блоки – матрицы репликации.

Рассмотрим хромосому, содержащую m локусов, в каждом из которых может быть размещён ген g_i , $i = 1, m$, имеющий одну аллелоформу. Некоторый, неизвестный вариант $R^* = \{i_1, i_2, \dots, i_j, \dots, i_m\}$ размещения генов i в локусы j ($j = 1, m$) будет соответствовать глобальному экстремуму решаемой задачи.

Очевидно, что в качестве матрицы репликации могут служить любые r локусов размещения R^* , $r = 1, m$. Тогда задача введения матрицы длиной r в исходную популяцию P сведётся к регулярному размещению A_m^r без повторений r произвольно взятых генов в m локусах.

Для каждой матрицированной особи популяции P осуществляются процедуры мутации, реализующие их отдельную, независимую эволюцию, т. е. одновременно будет происходить параллельное построение A_m^r вариантов решений поставленной задачи, причём предпочтительность выбора присоединяемых аллелоформ будет осуществляться по принципу сигнатуры, т. е. степень их комплементарности будет определяться исходной матрицей репликации.

Исследования, проведённые на тестовых примерах [26, 27] с $n = 20$ показали, что достижимость глобального экстремума генетическим алгоритмом в результате введения матричной репликации возрастает в 5...10 раз.

Для рассматриваемой задачи проектирования электрической сети с $n = 30$ генетическая модель представляет собою двумерную хромосому в виде таблицы смежности вершин сети.

Таблица смежности вершин сети

Вершина	Вершина				
	b_0	b_1	b_2	...	b_{30}
b_0	0	1	1	1	1
b_1	1	0	1	...	0
...	1
b_{30}	1	1	0	...	0

Введение матрицы репликации в указанную модель заключается в изначальном установлении факта смежности выбранных вершин сети путём размещения соответствующих единиц в таблице.

Результаты проектирования представлены на рис. 2.

Приведённые затраты в найденной конфигурации сети снизились по сравнению с существующим вариантом с 74,87 до 55,58 руб/МВт·ч.

3. ОБОБЩЁННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ

Обобщённая функциональная схема системы принятия решений, построенная на принципах многоальтернативного поведения, показана на рис. 3.

Формальное описание системы представлено уравнениями (4)–(9):

$$\begin{cases} \dot{x} = K(x,t) + N(x,t) \cdot u + F(x,t) \cdot f; \\ y = L(x,t) + A(x,t) \cdot u + H(x,t) \cdot f, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_j \xrightarrow{r_{ij}} s_{ij}; \quad r_{ij} \in R; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, N_i}, \quad (5)$$

$$x_j \xrightarrow{s_{ij}} u_{ij}; \quad s_{ij} \in S, \quad \text{или} \quad b_j \xrightarrow{d_{ij}} u_{ij}; \quad d_{ij} \in D, \quad (6)$$

$$u = [u_{ij}(p_{ij}, Q)]; \quad p_{ij} = P_{ij}(x_{ij}), \quad (7)$$

$$q(t) = \text{extr}_t q(s_{i, N_i + l_i}); \quad q(t) = q(g(t), x(t)), \quad (8)$$

$$Q(t) = \text{extr}_{ij} Q(u_{ij}); \quad Q(t) = Q(g(t), x(t)), \quad (9)$$

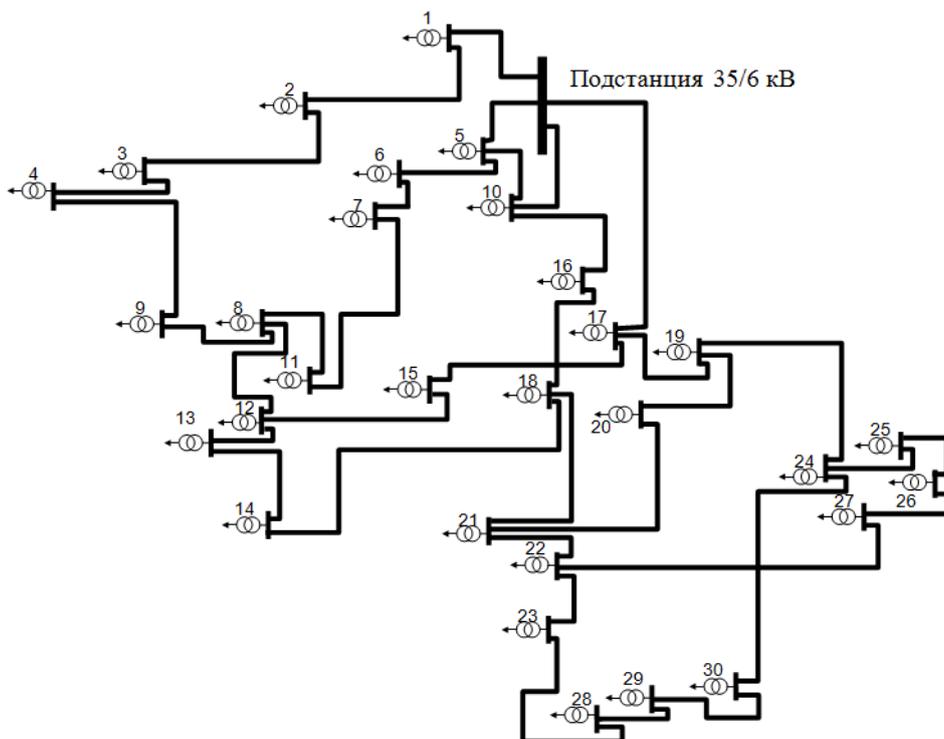


Рис. 2. Оптимальная конфигурация электрической сети, полученная с использованием блочно-модульного принципа многоальтернативности

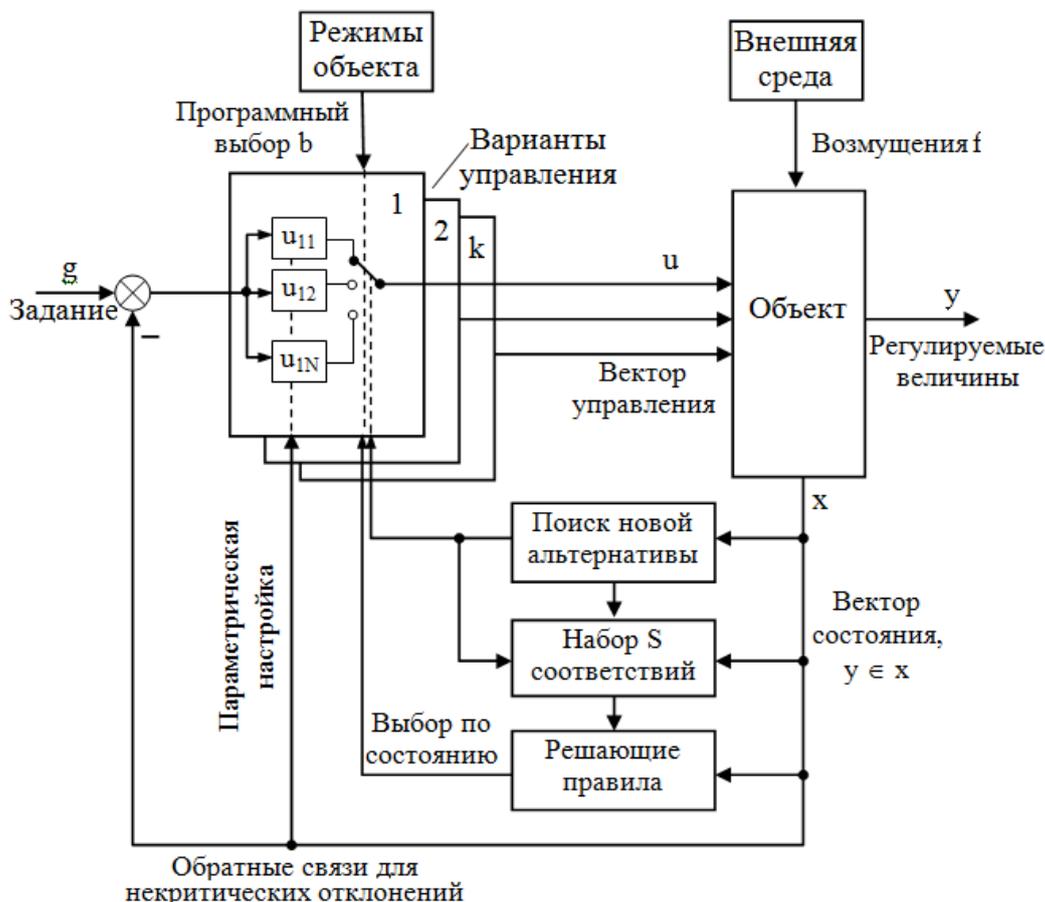


Рис. 3. Функциональная схема системы принятия решений, использующая принципы многоальтернативного поведения

где (4) – описание объекта управления в пространстве состояний x с векторами управления u и возмущения f с помощью нестационарных матриц K, N, F, L, S, H ; (5) – 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} ; (6) – 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 $d_{ij} \in D_i$; (7) – 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 ; (8) – процедуры обучения, обеспечивающие синтез новых взаимосвязей $s_{i, N_i + \ell_i}$ по целевому критерию $q(t)$ обучения; (9) – общая цель

управления $Q(t)$, достигаемая на множестве альтернатив u_{ij} .

Отметим, что эти процедуры составляют существо так называемых интеллектуальных систем, определяющих общую перспективу развития теории управления и принятия решений [29, 30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный анализ биологических аналогий процессов принятия решений в критических режимах позволяет заключить, что биологические системы достигли высокой степени приспособительного взаимодействия с внешней средой путём селективной специализации этого взаимодействия на основе набора достаточно простых механизмов разделения функций, модульности и иерархичности структуры. Эти приспособительные механизмы объединяются единой концепцией многоальтернативности структур и

процессов функционирования интеллектуальных систем.

Использование концепции многоальтернативного поведения в задачах принятия решений и управления большими 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.

Приведённые примеры управления многомерным объектом с неравновесными состояниями и решения задачи автоматизированного проектирования с комбинаторной неопределённостью, построенные на принципах многоальтернативности, подтверждают эффективность применения изложенного подхода к процессам принятия решений в сложных системах различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен. – М. : УРСС, 2014. – 320 с.
2. *Пригожин И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М. : Прогресс, 1986. – 432 с.
3. *Мирошник И. В.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 2000. – 549 с.
4. *Бобцов А. А.* Развитие методов робастного управления в задачах адаптации / А. А. Бобцов, С. А. Холунин // Научно-технический вестник СПб ГИТМО, вып. 6. – СПб. : ГИТМО, 2002. – С. 223–228.
5. *Забелин С. Л.* Разработка и исследование моделей, методов и алгоритмов для синтеза и анализа решений задач геометрического покрытия / С. Л. Забелин, В. Д. Фроловский // Вестник СибГУТИ. – 2013. – № 2. – С. 42–53.
6. *Подвальный С. Л.* Эволюционные принципы формирования структуры вычислительных систем / С. Л. Подвальный // Адаптация в сложных системах управления: сб. науч.

тр. Воронеж : Воронежский политехнический институт, 1979. – С. 60–63.

7. *Эшби У. Р.* Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения / У. Р. Эшби. – М. : Изд. иностр. лит., 1962. – 397 с.

8. *Красилов В. А.* Метаэкология. Закономерности эволюции природных и духовных систем / В. А. Красилов. – М. : Палеонтол. ин-т РАН, 1997. – 208 с.

9. *Ратнер В. А.* Блочно-модульный принцип организации и эволюции молекулярно-генетических систем управления / В. А. Ратнер // Генетика. – 1992. – Т. 28, № 2. – С. 5–23.

10. *Эйген М.* Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул / М. Эйген. – М. : Мир, 1973. – 224 с.

11. *Галимов Э. М.* Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции / Э. М. Галимов. – М. : Едиториал УРСС, 2006. – 256 с.

12. *Behe M. J.* Darwin's Black Box / M. J. Behe // The Biochemical Challenge to Evolution. – N.Y. : Simon & Shuster, 1998. – 307 p.

13. *Гринин Л. Е.* Макроэволюция в живой природе и обществе / Л. Е. Гринин, А. В. Марков, А. В. Коротаев. – М. : Либроком, 2009. – 248 с.

14. *Cope E. D.* The primary factors of organic evolution / E. D. Cope. – Chicago: The Open Court Publishing Company, 1904. – 547 p.

15. *Тимофеев-Ресовский Н. В.* Краткий очерк теории эволюции / Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. Н. Воронцов, А. В. Яблоков. – М. : Наука, 1977. – 303 с.

16. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М. : Изд. иностр. лит., 1963. – 829 с.

17. *Подвальный С. Л.* Эволюционные структуры специального математического обеспечения интегрированных систем моделирования / С. Л. Подвальный // В кн. Проблемы оптимального выбора в прикладных задачах. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 1980. – С. 90–139.

18. *Подвальный С. Л.* Многоальтернативные системы: обзор и классификация / С. Л. Подвальный // Системы управления и

информационные технологии. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 4–13.

19. *Ившина И. Б.* Адаптационные механизмы выживания алканотрофных родококков, реализованные в неблагоприятных условиях среды / И. Б. Ившина, Т. Н. Каменских, Б. А. Анохин // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. – 2007. – Вып. 5(10). – С. 107–112.

20. *Пальцев М. А.* Биология стволовых клеток и клеточные технологии. В 2 т. Т. 1. / М. А. Пальцев, В. В. Терских, А. В. Васильев. – М.: Медицина., 2009. – 272 с.

21. *Эшби У. Р.* Введение в кибернетику / У. Р. Эшби. – М.: КомКнига, 2005. – 432 с.

22. *Эшби У. Р.* Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения / У. Р. Эшби. – М.: Изд. иностр. лит., 1962. – 397 с.

23. *Васильев Е. М.* Робастная стабилизация многомерных объектов в системах с переменной структурой / Е. М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 24–26.

24. *Васильев Е. М.* Синтез электрических сетей с оптимальной конфигурацией / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 4 – С. 16–20.

25. *Батищев Д. И.* Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Д. И. Батищев. – Воронеж: ВГТУ, 1995. – 69 с.

26. *Васильев Е. М.* Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 2 – С. 21–23.

27. *Васильев Е. М.* Генетический алгоритм решения квадратичной задачи о назначениях / Е. М. Васильев, И. В. Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 3 – С. 29–33.

28. *Вавилов Н. И.* Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости / Н. И. Вавилов. – Л.: Наука, 1987. – 256 с.

29. *Подвальный С. Л.* Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления / С. Л. Подвальный, Т. М. Леденева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 11. – С. 17–23.

30. *Леденева Т. М.* Моделирование оценочных систем на основе принципа многоальтернативности / Т. М. Леденева, С. Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57, № 3-1. – С. 155–161.

Подвальный Семён Леонидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет.
E-mail: spodvalny@yandex.ru

Podvalny Semen L. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Automated and Computer Systems, Voronezh State Technical University.
E-mail: spodvalny@yandex.ru

Васильев Евгений Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и информатики в технических системах, Воронежский государственный технический университет.
E-mail: vgtu-aits@yandex.ru

Vasiljev Eugeny M. – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Chair of Automation and Computer Science in Engineering Systems, Voronezh State Technical University.
E-mail: vgtu-aits@yandex.ru