

ЭВОЛЮЦИОННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

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

Излагаются результаты исследований, посвящённых свойству многоальтернативности строения и функционирования сложных биологических систем. Целью работы являются: обобщение этих результатов в виде эволюционной методологии многоальтернативного управления большими искусственными системами, выявление места этой методологии в ряду известных кибернетических принципов управления и определение её возможностей при практической реализации. Отмечено, что актуальность упомянутого обобщения определяется назревшей необходимостью систематизации различных направлений в рамках самой кибернетики как науки. Раскрыто кибернетическое основание методологии многоальтернативного управления, заключающееся в воспроизведении эволюционных механизмов живых систем, выходящих за рамки механизма естественного отбора и традиционно рассматриваемых как свойство многообразия этих систем. На основе анализа содержания указанных механизмов сформулированы достаточно простые принципы предлагаемой методологии: принцип разнообразия и разделения функций, принцип многоуровневости структуры и принцип модульности. Показан конструктивный характер этих принципов, непосредственно указывающий на методы и способы их практической реализации. Представлена обобщённая модель системы многоальтернативного управления, данописание её функциональных узлов. Показана системообразующая роль методологии многоальтернативного управления по отношению к ряду базовых кибернетических принципов управления сложными объектами, заключающаяся в выявлении у этих принципов общего эволюционного содержания. Рассмотрены конкретные примеры применения методологии для синтеза систем управления различными объектами, и продемонстрирована её высокая результативность.

Ключевые слова: эволюционная кибернетика, кибернетические принципы эволюции, методология многоальтернативного управления.

¹ Семён Леонидович Подвальный, д.т.н, профессор (spodvalny@yandex.ru).

² Евгений Михайлович Васильев, д.т.н, с.н.с. (vgtu-aits@yandex.ru).

1. Введение

Кибернетика как наука о наиболее общих принципах управления и обработки информации в животном, машине и обществе характеризуется значительным разнообразием направлений своего развития в технике, экономике, биологии и социологии [29, 30]. Это разнообразие предметных областей кибернетики сопровождается соответствующим расширением перечня её базовых принципов:

- принцип обратной связи и концепция чёрного ящика [10];
- принцип критической сложности Дж. фон Неймана [28];
- принцип дискретности информации [21];
- принцип магистрального развития [1, 2, 27];
- принцип необходимого разнообразия [55];
- принципы иерархической организации и рациональной централизации [29] и т.д. [30, 31, 43, 44, 59].

Проводя анализ истории прогресса кибернетики, Д.А. Новиков отмечает: «Но в начале 70-х годов [её] развитие затормозилось, целостный поток разветвился на множество частных и, наконец, «потерялся в деталях»: число научных направлений росло, каждое из них продолжало развиваться, а общих закономерностей почти не выявлялось и не систематизировалось» [30, с. 46].

Кроме того, в практическом плане применительно к задачам управления большими системами перечисленные базовые принципы во многих случаях требуют своего конструктивного раскрытия, указывающего на методы, способы и приёмы их реализации при построении сложных систем.

Приведём некоторые примеры.

Непосредственное использование принципа обратной связи на основе классической концепции чёрного ящика (управление по выходу) для управления сложными системами не позволяет обеспечить приемлемое качество управления такими системами [18, 19, 20, 34, 51, 57]. Практическое применение этого принципа в сложных системах выразилось в виде многоконтурных систем подчиненного регулирования [6, 60]; систем модального управления [4, 7, 25] и синергетических систем [9, 18, 19, 20, 52,

53], в которых предусмотрен частичный или полный отказ от концепции управления по выходу.

Принцип критической сложности в большинстве случаев трактуется лишь как концептуальная парадигма, реализация которой не выходит за рамки моделей клеточных автоматов [5, 61, 64].

Принцип необходимого разнообразия практически воплотился в системах с переменной структурой и скользящими режимами [15, 22, 23, 26, 48, 49, 50], идеи которых первоначально возникли без явной методической связи с этим принципом.

Таким образом, с точки зрения собственно кибернетики (Кибернетики с большой буквы [29, с. 9]) упомянутый выше перечень её принципов необходимо предполагает:

во-первых, существование некоторой единой концепции, объединяющей эти принципы в рамках кибернетики;

во-вторых, наличие вытекающей из этой концепции общей методологии управления, которая бы не только включала в себя указанные принципы, но и содержала указания на конкретные методы, способы и приёмы их реализации, т.е. была бы конструктивной.

Целью предлагаемой работы является методологическое обобщение указанных кибернетических принципов на основе эволюционной концепции многоальтернативного управления [33,39], которая, объединяя их в содержательном плане, одновременно будет обладать конструктивным характером, т.е. будет определять конкретные пути реализации этих принципов независимо от физической природы управляемых систем.

Для изложения заявленной методологии многоальтернативного управления воспользуемся схемой, предложенной в работе [33]:

- основания методологии;
- конструктивные принципы;
- внутренняя структура, определяющая объект и предмет методологии, её модели и методы;
- оценка практической результативности;
- системообразующая (объединяющая) функция методологии многоальтернативности как кибернетической концепции.

2. Кибернетические основания методологии многоальтернативного управления сложными системами

Исходным, эмпирическим установленным феноменом, инициировавшим формирование концепции многоальтернативности, является то обстоятельство, что эволюционная стабильность биологических систем с ростом их сложности возрастает [18, с. 12], т.е. в живых открытых системах, в отличие от антропогенных систем, не существует проклятия размерности.

Раскроем содержание понятия сложности биологических систем и роль этой сложности в их эволюционной стабильности.

Наиболее очевидной характеристикой сложности живых систем является их многообразие.

Многообразие биосистем на уровне элементарной эволюционной ячейки – популяции одного вида, заключается в многообразии её генофонда, содержащего, в том числе, нейтральные в текущих условиях гены, которые «активируются» при изменении этих условий и обеспечивают сохранение вида в целом [17]. Ярким проявлением эволюционной роли такого молекулярно-генетического многообразия является понятие критической численности популяции – аналогии понятия критической сложности системы по Дж. фон Нейману [28]: при достижении числа особей в популяции значения, меньшего чем некоторое критическое значение, последняя обречена на вырождение. Причина этого заключается в том, что интенсивность потока генетических мутаций в малой популяции становится ниже интенсивности потока изменений внешней среды, и популяция в целом на уровне своего генетического фонда уже не в состоянии приспособиться к этим изменениям. Теоретический анализ описываемого эволюционного процесса в популяции проведён в работе [37] на основе дискретной марковской модели накопления генофонда. На рис. 1 и рис. 2 показаны результаты этого анализа для популяции с начальной численностью особей $n_{\text{нач}} = 40$ – выше критического значения (рис. 1) и $n_{\text{нач}} = 10$ – ниже критического значения, рис. 2. Интенсивности потока генетических изменений в одной особи $\mu = 1$ и потока событий внешней

среды $\lambda = 25$ таковы, что суммарный поток накопления генофонда $n_{\text{нач}} \cdot \mu$ в первом случае превышает значение λ ($40 > 25$), а во втором случае – меньше его ($10 < 25$).

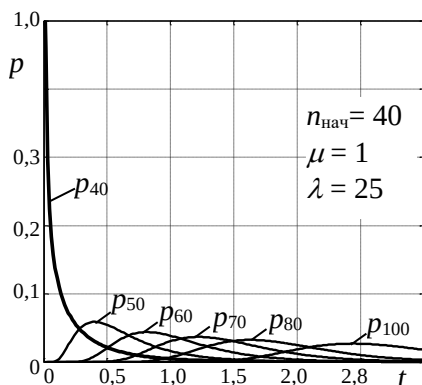


Рис. 1. Рост генофонда популяции при её начальной численности $n_{\text{нач}} = 40$

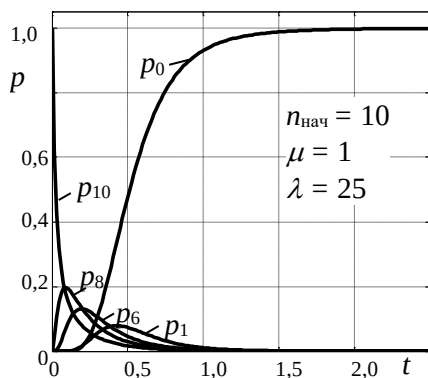


Рис. 2. Вырождение генофонда популяции при её начальной численности $n_{\text{нач}} = 10$

Рис. 1 и рис. 2 содержат графики изменения вероятностей p_i накопления популяцией генофонда объёмом i . Сопоставление этих рисунков показывает, что в популяции с количеством особей выше критического значения с течением времени t про-

исходит неограниченный рост объёма генофонда, при обратном соотношении популяция постепенно приходит в поглощающее состояние с нулевым объёмом генофонда, т.е. вырождается.

Эволюционная роль разнообразия в рамках одного вида проявляется также в форме разделения функций между органами, предназначенными для функционирования в разных условиях окружающей среды: светочувствительные клетки для дневного зрения и клетки для сумеречного зрения у приматов; ионофильтрующие клетки для пресной воды и для морской воды в жаберном эпителии мигрирующих рыб; жёсткие крылья для передвижения в грунте или древесине и мягкие крылья для полёта у жуков. Такая специализация функций значительно расширяет приспособительные возможности вида для обитания в разной среде.

На уровне крупных экосистем эволюционная роль многообразия проявляется, прежде всего, в разнообразии видов живых организмов, обладающих разными приспособительными механизмами и обеспечивающих сохранение живой массы экосистемы в разных условиях внешней среды. Возникающая при этом межвидовая конкуренция приводит к освоению новых экологических ниш отдельными видами, т.е. приводит к расширению ареала экосистемы. Э.Д Коуп в работе [58] указывает, что при возникновении экологического кризиса отмирание ранее господствующих видов сопровождается быстрым ростом числа ранее угнетённых видов, оказавшихся лучше приспособленными к новым условиям. Современным примером такого расширения является экосистема Аральского моря, при усыхании которого возросла его солёность, что привело к практическому исчезновению пресноводных донных организмов с одновременным компенсирующим взрывообразным ростом численности солоноустойчивых видов [3].

Помимо молекулярно-генетического многообразия и многообразия видов, в больших экологических системах появляется дополнительный способ обеспечения их эволюционной стабильности: многоуровневость пищевой цепочки, в которой происходит регулирующее взаимодействие между уровнями

(по схемам хищник – жертва или симбиоза) и, в конечном счёте, их сохранение в замкнутом круговороте вещества [13].

Аналитическая модель в виде системы дифференциальных уравнений для изменения биомассы каждого уровня замкнутой экосистемы, подтверждающая стабилизирующие свойства многоуровневости, приведена, например, в работах [37, 39]. Воспользуемся полученными в этих работах результатами исследования переходных процессов биомассы x_i^j в экосистемах с разным количеством трофических уровней $j = 2$ и $j = 3$, с числом видов $i = 1, \dots, 3$ на каждом уровне (уровень 3 высший), рис. 3 и рис. 4.

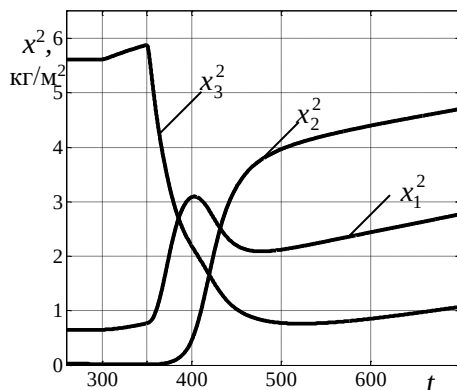


Рис. 3. Изменение биомассы x двухуровневой биосистемы в результате возмущения, вызвавшего угнетение организмов третьего вида второго уровня x_3^2

Возмущение (изменение условий внешней среды) поступает на второй уровень системы в момент времени $t = 350$ и в двухуровневой системе приводит к шестикратному уменьшению биомассы третьего вида второго уровня x_3^2 . При этом наблюдается многократный рост биомассы x_2^2 второго вида, который стал занимать доминирующее положение в своём уровне, а также увеличение биомассы x_1^2 первого вида с колебательным характером переходного процесса.

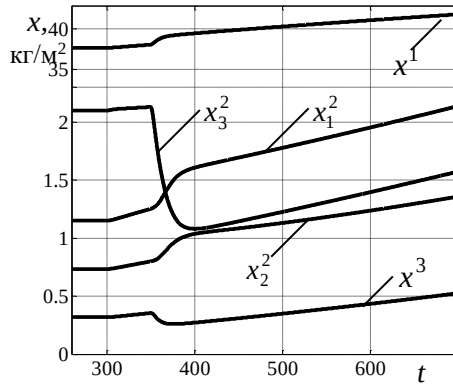


Рис. 4. Изменение биомассы x трёхуровневой биосистемы в результате возмущения, вызвавшего угнетение организмов третьего вида второго уровня x_3^2

При переходе к трёхуровневой системе (см. рис. 4) перечисленные выше кризисные изменения существенно уменьшились по амплитуде и стали монотонными, т.е. введение дополнительного уровня иерархии в систему улучшило её стабилизирующие свойства за счёт «перераспределения» возмущения по всем уровням системы – биомассы x^1 и x^3 также претерпели соответствующие изменения.

Анализируя механизмы регулирования во многоуровневых системах живых организмов, У. Эшби [55, 56] отмечает, что общая стабильность состояния сложной живой системы (гомеостазис) при сравнительно небольших отклонениях от этого состояния обеспечивается процессам регулирования в рамках некоторого одного уровня системы. При исчерпании ресурсов регулирования на текущем уровне системы управление передаётся на вышестоящий по своим ресурсам уровень, механизмы регулирования на котором могут носить качественно иной характер. Как пример им приводится пятиуровневая система регулирования содержания глюкозы в крови человека [56, с. 99].

Отметим ещё одно свойство живых систем, «материально» обеспечивающее упомянутые выше характеристики разнообразия и многоуровневости, – свойство блочности (модульности):

всё многообразие живого мира уже на генетическом уровне обусловлено дискретными комбинациями небольшого числа базовых блоков – нуклеотидов, образующих цепочки аминокислот и различных генов [47]. Именно свойство дискретности генетических структур, по мнению Р. Докинза [14], определяет их эволюционную устойчивость – «бессмертность гена».

Отмечая эволюционную роль дискретности живых структур, Э.М. Галимов в [12, с. 217] указывает, 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».

Перечисленные свойства многообразия, многоуровневости и модульности, определяющие собою сложность экосистем, позволяют выдвинуть тезис о том, что многоальтернативность является эволюционной стратегией живых систем, обеспечивающей им эволюционную стабильность [37]. В совокупности эти свойства можно объединить в единую эволюционную концепцию многоальтернативности строения и функционирования биологических систем, которая, в соответствии с основной идеей кибернетики, может быть положена в основу методологии многоальтернативного управления сложными системами любой природы.

3. Конструктивные принципы методологии многоальтернативного управления

Для того чтобы концепция многоальтернативного строения и функционирования сложных систем приобрела практический, конструктивный характер, необходимо сформулировать её принципы (механизмы), которые бы непосредственно указывали на методы, способы и приёмы реализации этой концепции в искусственных системах.

Изложенные выше кибернетические основы методологии многоальтернативного управления позволяют к таким принципам отнести [36, 37, 39]:

– принцип разнообразия и разделения функций в системе, заключающийся в том, что сложная система разделяется на подсистемы по функциональному признаку с высоким уровнем специализации каждой из них, включая качественно разные принципы построения. При изменении условий функционирования системы происходит автоматическая передача управления от одной подсистемы к другой, в результате чего достигается адаптация системы к воздействиям внешней среды. Узкая специализация каждой подсистемы создаёт предпосылки для упрощения реализации каждой из них с одновременным повышением качества выполнения своих функций;

– принцип многоуровневости структуры сложной системы даёт возможность выстроить «глубокоэшелонированное» в энергетическом смысле управление, при котором переход к более высокому уровню происходит по мере исчерпания возможностей управления низкого уровня. Такая иерархия системы управления позволяет обеспечить в ней аналог биологического свойства гомеостазиса;

– принцип модульности (блочности) сложной системы является необходимой предпосылкой для физической реализации перечисленных выше принципов разнообразия и иерархии в системе. Модульность системы даёт возможность создать многообразие вариантов функционирования системы, которое обеспечивает ей полное или частичное функционирование (живучесть) при открытом взаимодействии с внешней средой в широком диапазоне изменений её параметров.

4. Объект и предмет методологии, её модели и методы

Объектом рассматриваемой методологии является собственно Кибернетика как наука об управлении, в частности, её раздел – эволюционная кибернетика [45, 46]. Отмечая актуальность выделения этого раздела кибернетики, В.Г. Редько пишет [46, с. 17]: «В процессе биологической эволюции возникли чрезвычайно сложные и вместе с тем удивительно эффективно функционирующие живые организмы. Эффективность, гармо-

ничность и согласованность работы компонент живых существ обеспечивается биологическими управляющими системами», – и, далее, о его предмете: «Какие архитектуры и принципы функционирования биологических систем управления обеспечивают способность животных приспосабливаться, адаптироваться к постоянно меняющимся условиям во внешней среде?».

К предмету рассматриваемой методологии относятся модели и методы эволюционной кибернетики, позволяющие осуществить практический синтез систем управления искусственными сложными системами на основе изложенных выше эволюционных принципов многоальтернативности.

Исходя из содержания этих принципов (раздел 3) обобщённая модель системы многоальтернативного управления должна включать в себя следующие функциональные блоки:

- функциональные блоки управления, соответствующие различным функциям (режимам) системы или различным алгоритмам управления в рамках одной функции;
- несколько уровней передачи управления, отличающихся физическими принципами работы или энергетическими возможностями;
- блоки оценки текущего состояния системы и выбора, в зависимости от этого состояния, альтернативного варианта управления;
- контуры параметрического управления в рамках одного алгоритма (контуры малых отклонений) и контур переключения альтернативных вариантов алгоритмов.

Общий вид модели системы многоальтернативного управления в виде функциональной схемы представлен на рис. 5.

Аналитическое представление показанных на рис. 5 процедур:

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{x} = B(x, t) + N(x, t) \cdot u + F(x, t) \cdot f; \\ y = A(x, t) + K(x, t) \cdot u + H(x, t) \cdot f, \end{cases}$$

$$(2) \quad x_j \rightarrow u_{ij}; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, N_i},$$

$$(3) \quad b_i \rightarrow u_{ij}; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{1, N_i},$$

$$(4) \quad \varepsilon = g - y; \quad u_{ij} = u_{ij}(\varepsilon).$$

где (1) – объект управления с нестационарными матрицами входов u , f , состояния x и выходов y ; (2) – процедуры выбора альтернативы управления u_{ij} по состоянию x_j объекта; (3) – процедуры программного назначения альтернативы управления u_{ij} в зависимости от требуемого режима b_i работы объекта; (4) – процедуры параметрического регулирования по отклонению ε . Практическое содержание этих процедур будет раскрыто ниже (раздел 5).

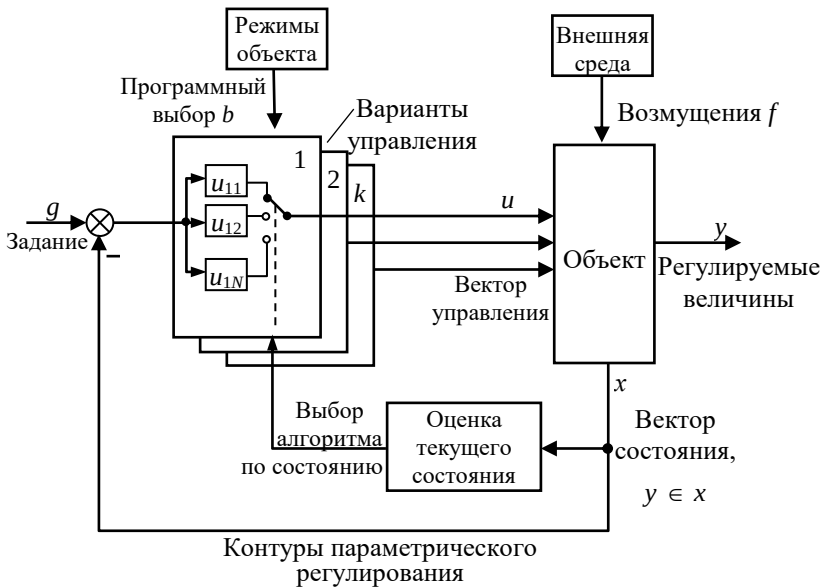


Рис. 5. Обобщённая модель системы многоальтернативного управления с двумя уровнями регулирования

Высокая степень общности принципов многоальтернативности, реализуемых в моделях вида (1)–(4), оставляет широкие возможности для использования в этих системах всего объёма методов, накопленных теорией автоматического управления, сохраняя лишь характерные для таких систем признаки разделения функций, многоуровневости и модульности.

5. Оценка практической результативности методологии многоальтернативного управления

Рассмотрим примеры целенаправленного практического применения методологии многоальтернативности для построения систем управления техническими объектами с различной степенью неопределённости происходящих в них процессов.

5.1. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Процесс ускоренного затвердевания бетонных изделий происходит в паровлажностных камерах, температура $T(t)$ в которых должна изменяться по требуемой функции $T_{\text{тр}}(t)$, соответствующей режимам нагрева, выдерживания и остывания изделий, рис. 6 [8]. Изменение $T(t)$ по закону $T_{\text{тр}}(t)$ обеспечивается релейным регулятором подачи пара в единственном канале полной мощности $W_{\text{очн}}(t)$. Недостатками такого способа управления являются значительные пульсации фактической температуры $T(t)$ и большое число переключений дорогостоящего парового клапана полной мощности, приводящее к необходимости его частой замены, рис. 6 [8].

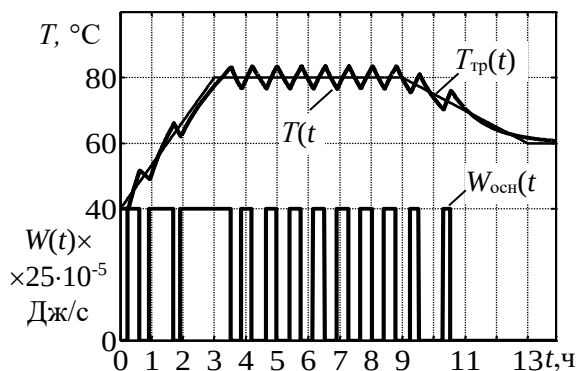


Рис. 6. Процесс регулирования температуры в одноуровневой системе управления

Анализ физического содержания режимов работы камеры указывает на то, что большая мощность при подаче пара необ-

ходима только в режиме нагрева камеры или при больших отклонениях фактической температуры $T(t)$ от требуемой $T_{\text{тр}}(t)$; в остальных режимах для управления температурой достаточно подача пара (тепла) с малой дополнительной мощностью $W_{\text{доп}}(t)$. Кроме того, для постоянной компенсации потерь тепла во внешнюю среду нужна мощность $W_{\text{пост}}$ подачи тепла, не изменяющаяся во времени.

Таким образом, анализ технологического процесса указывает на целесообразность разделения функций управления по трём каналам системы с иерархически различным уровнем мощности подачи пара: $W_{\text{осн}}(t)$, $W_{\text{доп}}(t)$, $W_{\text{пост}}$.

Результат такого разделения функций показан на рис. 7.

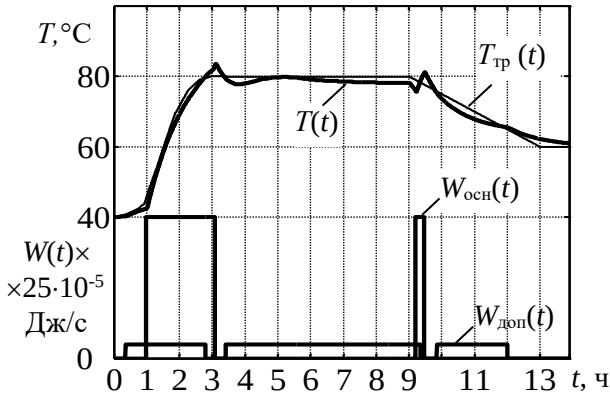


Рис. 7. Процесс регулирования температуры в трехуровневой системе управления

Сопоставление рис. 6 и рис. 7 показывает, что использование в рассматриваемой системе принципа разделения функций и иерархичности уровней управления позволяет существенно снизить среднее отклонение фактической температуры $T(t)$ от требуемой $T_{\text{тр}}(t)$ и в то же время уменьшить число переключений мощного клапана с 24 до 4 раз и общее число переключений всех трёх клапанов — в два раза по сравнению с одноканальной системой. Полученные преимущества улучшают прочностные характеристики обрабатываемых бетонных изде-

лий с одновременным уменьшением эксплуатационных расходов на замену паровых клапанов.

5.2. СИСТЕМА МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ

Задача подавления собственных колебаний в объектах вида

$$(5) \quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Bx(t) + Nu(t); \\ y(t) &= Ax(t) \end{aligned}$$

с характеристическим полиномом

$$(6) \quad C(s) = s^n + c_{n-1}s^{n-1} + \dots + c_1s + c_0$$

традиционно может быть решена построением замкнутой системы с модальным регулятором R :

$$(7) \quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Bx(t) + N(g(t) - Rx(t)); \\ y(t) &= Ax(t), \end{aligned}$$

и желаемым характеристическим полиномом

$$(8) \quad D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0$$

или

$$(9) \quad D(s) = s^n + (c_{n-1} + r_n)s^{n-1} + \dots + (c_1 + r_2)s + c_0 + r_1,$$

корни $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ которого путём выбора соответствующих коэффициентов регулятора $R = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n]$ могут быть размещены требуемым образом на вещественной полуоси $(-\infty, 0]$ комплексной плоскости корней [25].

В том случае, если характеристическая матрица B нестационарная, т.е. имеет вид $B(t)$, на модальный регулятор может быть возложена задача обеспечения робастности системы управления к изменению коэффициентов $c_{n-1}, c_{n-2}, \dots, c_1, c_0$.

Из (9) следует, что такая робастность обеспечивается при выполнении n неравенств:

$$(10) \quad r_{i+1} \gg |c_i|, \quad i = 0, n-1.$$

Поскольку уравнение (9) имеет единственное решение относительно неизвестных коэффициентов $r_1, r_2, \dots, r_n$, то это решение в общем случае не удовлетворяет условию робастности (10), т.е. задачи (9) и (10) несовместны.

Принцип разделения функций указывает в этом случае на необходимость отдельного решения указанных задач.

Такое разделение можно обеспечить, если часть корней $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*$, $k < n$, определяющих требуемые динамические свойства системы, разместить на доминирующие позиции комплексной плоскости корней, а оставшиеся $n - k$ корней расположить на этой плоскости так, чтобы выполнялось условие (10) и одновременно корни $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*$ сохранили своё доминирующее положение, т.е.:

$$(11) \operatorname{Re}(\lambda_j) \ll \min[\operatorname{Re}(\lambda_i)]; \quad i = \overline{1, k}; \quad j = \overline{k+1, n}.$$

Выразим коэффициенты d_i полинома $D(s)$ через его корни:

$$(12) d_i(r_1, r_2, \dots, r_n) = d_i(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n); \quad i = \overline{0, n-1}.$$

В результате будет сформирована общая система ограничений:

$$(13) \begin{cases} d_i(r_1, r_2, \dots, r_n) = d_i(\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*, \lambda_{k+1}, \dots, \lambda_n); & i = \overline{0, n-1}; \\ r_{\ell+1} \gg |c_\ell|; & \ell = \overline{0, n-1}; \\ \operatorname{Re}(\lambda_j) \ll \min[\operatorname{Re}(\lambda_i)]; & j = \overline{k+1, n}, \end{cases}$$

в которой неизвестны $2n - k$ величин: $r_1, r_2, \dots, r_n, \lambda_{k+1}, \lambda_{k+2}, \dots, \lambda_n$, и имеется n ограничений-равенств и $2n - k$ ограничений-неравенств. Таким образом, система ограничений (13) совместна и имеет $n - k$ свободных переменных $\lambda_{k+1}, \dots, \lambda_n$, т.е. искомое решение не единственно.

При практическом решении поставленной задачи степень доминирования (неравенства) в ограничениях определяются эмпирически, обычно 5–10-кратная. Кроме того, неединственность решения целесообразно использовать для совместного решения задачи (13) с задачей нахождения экстремума некоторой функции, например:

$$(14) J = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \Omega)^2}{\Omega^2} \rightarrow \min,$$

в которой $\Omega = \sqrt[n]{r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n}$ – среднегеометрическое значение коэффициентов модального регулятора, а критерий J оптимизации обеспечивает минимальный разброс этих коэффициентов относительно среднегеометрического значения.

В качестве примера рассмотрим существенно колебательный объект [41]:

$$(15) W_{об}(s) = \frac{0,2(s + 0,2 + 400j)(s + 0,2 - 400j)}{(s + 0,5 + pj)(s + 0,5 - pj)(s + 100)},$$

собственная частота p колебаний которого изменяется в диапазоне $p = 6 \dots 60 \text{ с}^{-1}$.

Синтез модального регулятора с разделением функций по процедурам (13), (14) с заданными значениями доминирующих полюсов системы $\lambda_1^* = -20 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_2^* = -100 \text{ с}^{-1}$ привёл к значению третьего полюса $\lambda_3 = -587 \text{ с}^{-1}$ и коэффициентам регулятора $R = [1133975; 71939,75; 606]$.

Подавление колебаний в системе и её грубость при изменении параметра p подтверждается рис. 8 и таблицей 1.

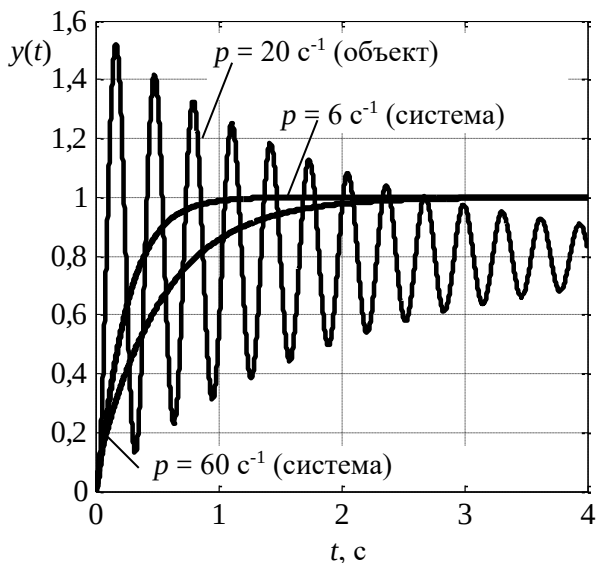


Рис. 8. Иллюстрация подавления колебаний в объекте с одновременным обеспечением робастности системы

Таблица 1. Чувствительность полюсов системы к изменению собственной частоты p колебаний объекта

p, c^{-1}	λ_1, c^{-1}	λ_2, c^{-1}	λ_3, c^{-1}
60	-26	-100	-581
20	-20	-100	-587
6	-19	-100	-588

Содержание таблицы 1 показывает, что при десятикратном изменении собственной частоты p колебаний объекта полюса системы с модальным регулятором с разделением функций остаются вещественными, т.е. обеспечивают монотонный характер переходных процессов, при этом значение доминирующего корня λ_1 изменяется всего в 1,3 раза.

5.3. СИСТЕМА С СИГНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ

Типовые структуры систем с сигнальной адаптацией, использующие эталонную модель и обратную связь с большим коэффициентом передачи, отличаются высоким быстродействием и простой реализацией, но обеспечивают малую глубину адаптации [16].

На рис. 9 представлен пример структуры такой системы [40], в которой $W(s)$, B , N , A – передаточная функция и матрицы (1) объекта управления; $\hat{W}(s)$, $\hat{B}$, $\hat{N}$, $\hat{A}$ – передаточная функция и соответствующие матрицы эталонной модели; k – коэффициент передачи обратной связи.

Уравнения движения представленной системы

$$(16) \quad \begin{cases} \dot{x} = (B - NkA)x + N(k\hat{A}\hat{x} + u); \\ \dot{\hat{x}} = \hat{B}\hat{x} + \hat{N}u \end{cases}$$

можно переписать в виде:

$$(17) \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B - NkA & Nk\hat{A} \\ 0 & \hat{B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N \\ \hat{N} \end{bmatrix} \cdot u$$

и получить характеристический полином системы:

$$(18) \left| \begin{array}{c|c} sE - B + NkA & -NkA \\ \hline 0 & sE - \hat{B} \end{array} \right| = |sE - B + NkA| \cdot |sE - \hat{B}|,$$

где $E = \text{diag}(1 \dots 1)$.

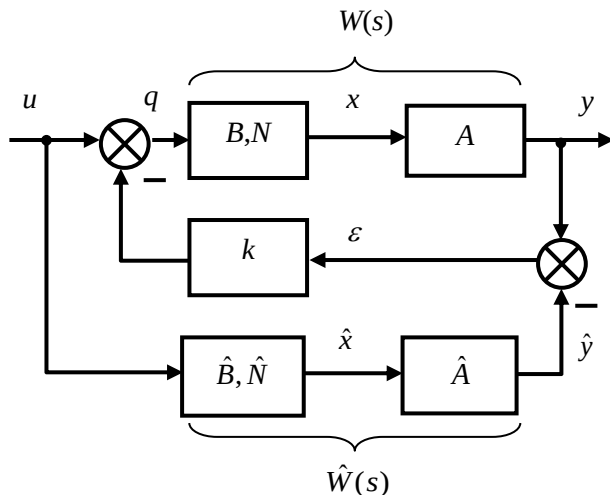


Рис. 9. Типовая структурная схема системы с сигнальной адаптацией и эталонной моделью

Выражение (18) показывает, что характеристический полином замкнутой системы разбивается на два независимых сомножителя, соответствующие объекту с обратной связью и эталонной модели. Поскольку полином эталонной модели заведомо гурвицев, то коэффициент k обратной связи влияет только на устойчивость и свойства замкнутого контура с объектом.

Анализ этого факта, проведённый в [40], показал, что в общем случае стремление увеличить глубину адаптации путём увеличения коэффициента k ограничено ростом колебательности и потерей устойчивости системы, однако в объектах с динамическим порядком не выше второго указанное ограничение отсутствует. Этот вывод указывает на целесообразность физического представления объекта в виде блочной структуры из элементов низкого порядка и построения многоуровневой схе-

мы сигнальной адаптации в виде последовательного иерархически связанного соединения одноуровневых систем, рис. 10.

На рис. 10 показан вариант структуры двухкаскадной системы, в которой $W_1(s)$, $W_2(s)$ обозначают передаточные функции каскадов объекта; $\hat{W}_1(s)$, $\hat{W}_2(s)$ – передаточные функции соответствующих каскадов эталонной модели.

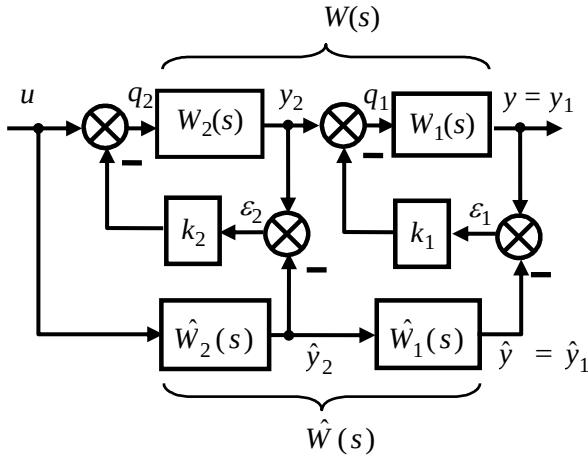


Рис. 10. Двухуровневая система с сигнальной адаптацией

Общая передаточная функция $\tilde{W}(s, k_1, k_2)$ двухуровневой системы имеет вид

$$(19) \quad \tilde{W}(s, k_1, k_2) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{W(s)(k_2 \hat{W}_2(s) + 1)}{(1 + k_1 W_1(s))(1 + k_2 W_2(s))} + \frac{W_1(s) k_1 \hat{W}(s)}{1 + k_1 W_1(s)},$$

из которого следует соотношение

$$(20) \quad \lim_{\substack{k_1 \rightarrow \infty \\ k_2 \rightarrow \infty}} \tilde{W}(s, k_1, k_2) = \hat{W}(s),$$

т.е. с ростом k_1 и k_2 динамические свойства системы приближаются к свойствам эталонной модели.

Результативность двухуровневой системы иллюстрируется рис. 11, на котором показаны переходные процессы в одноуров-

невой и двухуровневой системах с сигнальной адаптацией при пятикратном изменении параметров объекта. Одноуровневая система $y_{1,1}(t)$ не подавила собственные колебания объекта. При этом в двухуровневой системе обеспечена высокая степень совпадения переходного процесса $y_{1,2}(t)$ с эталонной моделью $\hat{y}(t)$.

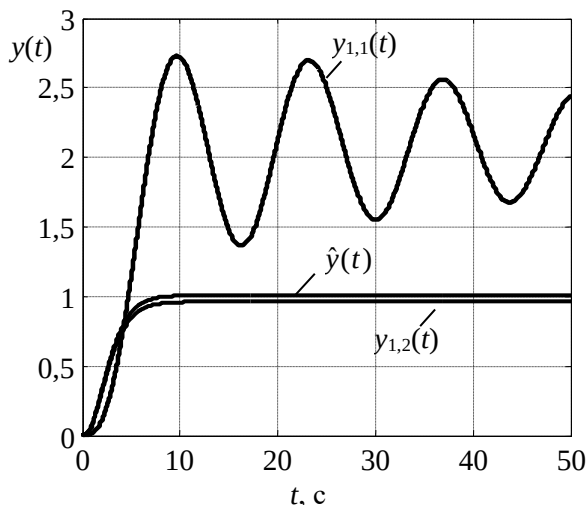


Рис. 11. Сопоставление адаптационных свойств одноуровневой $y_{1,1}(t)$ и двухуровневой систем сигнальной адаптации $y_{1,2}(t)$ относительно эталонной модели $\hat{y}(t)$

Полученные результаты, подтверждающие результативность рассматриваемой методологии для синтеза систем с сигнальной адаптацией, справедливы и в том случае, если объект физически невозможно разделить на части с низким динамическим порядком, но количество доминирующих корней характеристического полинома каждой части не превышает двух [42].

5.4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Рассмотрим беспилотный летательный аппарат (БПЛА) вертолётного типа, рис. 12, описываемый системой дифферен-

циальных уравнений [63]:

$$(21) \quad \dot{\omega}_x = \frac{(J_y - J_z) \cdot \omega_y \omega_z + Q_x}{J_x};$$

$$(22) \quad \dot{\omega}_y = \frac{(J_z - J_x) \cdot \omega_z \omega_x + Q_y}{J_y};$$

$$(23) \quad \dot{\omega}_z = \frac{Q_z}{J_z};$$

$$(24) \quad \dot{\phi} = \omega_x + \operatorname{tg}(\theta) \cdot (\omega_y \cdot \sin(\varphi) + \omega_z \cdot \cos(\varphi));$$

$$(25) \quad \dot{\theta} = \omega_y \cdot \cos(\varphi) - \omega_z \cdot \sin(\varphi);$$

$$(26) \quad \dot{\psi} = \frac{\omega_y \cdot \sin(\varphi) + \omega_z \cdot \cos(\varphi)}{\cos(\theta)};$$

$$(27) \quad \dot{V}_x = \frac{m \cdot g \cdot \sin(\theta) - m(V_z \cdot \omega_y - V_y \cdot \omega_z) - k_x \cdot (V_x - V_{W_x}) \cdot |V_x - V_{W_x}|}{m};$$

$$(28) \quad \dot{V}_y = \frac{-m \cdot g \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) - m(V_x \cdot \omega_z - V_z \cdot \omega_x) - k_y \cdot (V_y - V_{W_y}) \cdot |V_y - V_{W_y}|}{m};$$

$$(29) \quad \dot{V}_z = \frac{U_z - m \cdot g \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) - m(V_y \cdot \omega_x - V_x \cdot \omega_y) - k_z \cdot (V_z - V_{W_z}) \cdot |V_z - V_{W_z}|}{m};$$

$$(30) \quad \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = C^T \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}.$$

Принятые обозначения: НСК – неподвижная (земная) система координат XYZ ; ПСК – подвижная (связанная с аппаратом) система координат xuz ; $\Omega_1, \dots, \Omega_4$ и $u_1, \dots, u_4$ – частоты вращения и силы тяги винтов; $U_z = u_1 + u_1 + u_3 + u_4$; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ и Q_x, Q_y, Q_z – угловые скорости и вращающие моменты БПЛА относительно осей координат x, y, z ПСК; J_x, J_y, J_z – моменты инерции корпуса БПЛА относительно осей x, y, z ; V_x, V_y, V_z – составляющие скорости БПЛА в ПСК; k_x, k_y, k_z и $V_{W_x}, V_{W_y}, V_{W_z}$ – коэффициенты сопротивления воздуха и скорости ветра по осям x, y, z ; m – масса аппарата; g – ускорение свободного падения; C – матрица перехода между подвижной и неподвижной системами координат; θ, ψ, φ – тангаж, курс и крен аппарата, см. рис. 12;

$$(31) \quad C = \begin{bmatrix} c\theta \cdot c\psi & c\theta \cdot s\psi & -s\theta \\ s\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi - & s\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi + & s\varphi \cdot c\theta \\ -c\varphi \cdot s\psi & +c\varphi \cdot c\psi & \\ c\varphi \cdot s\theta \cdot c\psi + & c\varphi \cdot s\theta \cdot s\psi - & \\ +s\varphi \cdot s\psi & -s\varphi \cdot c\psi & c\varphi \cdot c\theta \end{bmatrix},$$

$c\theta = \cos(\theta)$, $s\theta = \sin(\theta)$, $c\varphi = \cos(\varphi)$, $s\varphi = \sin(\varphi)$, $c\psi = \cos(\psi)$, $s\psi = \sin(\psi)$.

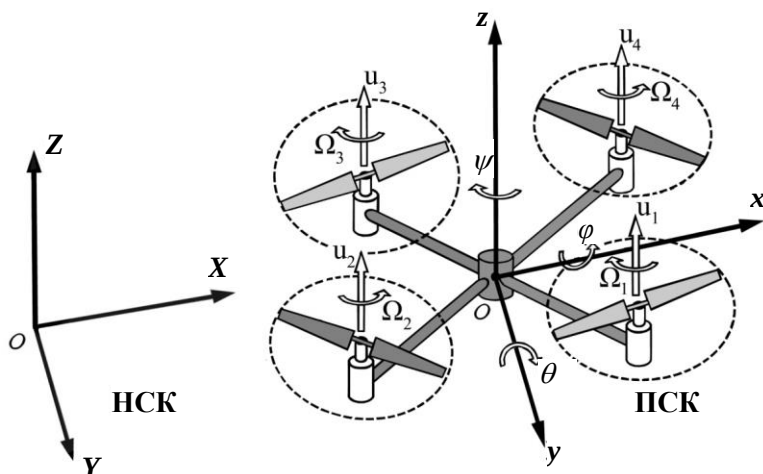


Рис. 12. Компоновочная схема и системы координат БПЛА

Основная трудность управления, в частности, стабилизации такого аппарата в условиях ветровых возмущений F_w , заключается, как это следует из (21)–(31), в наличии существенных перекрёстных связей между координатами его состояния. Синтез автономных каналов регулирования, компенсирующих эти взаимосвязи, существенно усложняет систему управления; синтез системы без учёта этих взаимосвязей не позволяет обеспечить высокие показатели качества регулирования.

Для преодоления этой трудности в работах А.А. Колесникова [18, 19, 20] предложен метод аналитического конструи-

рования агрегированных регуляторов, который предусматривает разделение переменных состояния объекта на группы, образующие физически связанную последовательность величин. В результате общий многомерный регулятор разбивается на части с малой динамической размерностью, т.е. регулятор становится агрегированным и его синтез можно выполнить последовательно – по частям. При этом учитываются все внутренние взаимосвязи многомерного объекта. Такой покаскадный синтез значительно проще синтеза полного регулятора, не требует линеаризации модели, обеспечивает получение высоких показателей качества системы и в целом соответствует принципу разделения функций и многоуровневости методологии многоальтернативного управления.

Для данного объекта указанное разделение координат осуществляется следующим образом [63].

Поскольку задачей управления является формирование требуемой траектории $L_{\text{тр}}(t) = [X_{\text{тр}}(t) \ Y_{\text{тр}}(t) \ Z_{\text{тр}}(t)]^T$ перемещения $L(t)$ БПЛА в пространстве, то в соответствии с (30) для построения такой траектории необходимо сформировать вектор скоростей $V_{\text{тр}}(t) = [V_{\text{тр},x}(t) \ V_{\text{тр},r}(t) \ V_{\text{тр},z}(t)]^T$, текущие значения которого можно вычислять исходя из условия монотонной сходимости макропеременной $L_{\text{тр}}(t) - L(t) = \Psi_L(t)$ к нулю с заданной постоянной времени T_L :

$$(32) \quad T_L \cdot \dot{\Psi}_L(t) + \Psi_L(t) = 0,$$

где $L(t)$ – координаты центра масс: $L(t) = [X(t) \ Y(t) \ Z(t)]^T$.

Таким образом, в качестве первой группы управляющих переменных следует использовать вектор фактических скоростей $V(t) = [V_x(t) \ V_r(t) \ V_z(t)]^T$, рис. 13.

Далее, из уравнений (24)–(29) можно увидеть, что для создания вектора $V(t)$ линейных скоростей и курса ψ следует использовать очередную (вторую) группу переменных: вектор угловых скоростей $\Omega(t) = [\omega_x(t) \ \omega_y(t) \ \omega_z(t)]^T$ и силу тяги U_z , требуемые значения которых будет вычисляться аналогично (32) из условий (33):

$$(33) \quad \begin{aligned} T_V \cdot \dot{\Psi}_V(t) + \Psi_V(t) &= 0; \\ T_\Psi \cdot \dot{\Psi}_\Psi(t) + \Psi_\Psi(t) &= 0, \end{aligned}$$

в которых $\Psi_V(t) = V_{тр}(t) - V(t)$; $\Psi_\Psi(t) = \psi_{тр}(t) - \psi(t)$, рис. 13.

Третья группа управляющих переменных – вектор вращающих моментов $Q(t)$ – определяется уравнениями (21)–(23), требуемое значение $Q_{тр}(t)$ которого будет вычисляться с использованием макропеременной $\Psi_\Omega = \Omega_{тр} - \Omega$ по условию

$$(34) \quad T_\Omega \cdot \dot{\Psi}_\Omega(t) + \Psi_\Omega(t) = 0.$$

Выделение указанных управляющих переменных $V(t)$, $\Omega(t)$, $Q(t)$, вычисляемых иерархически последовательно, позволяет разбить регулятор на три части, которые синтезируются по условиям (32)–(34) независимо друг от друга, рис. 13.

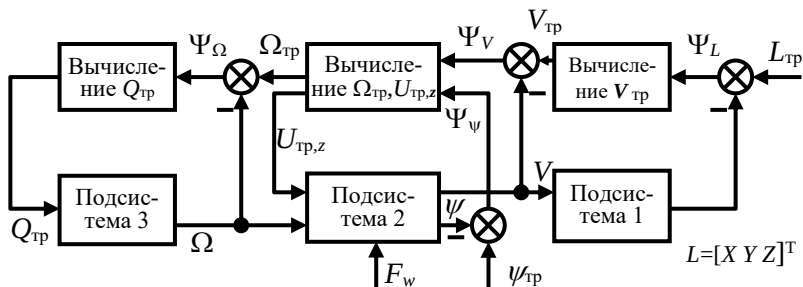


Рис. 13. Структурная схема объекта с выделенными подсистемами и соответствующим агрегированным регулятором с разделением функций управления по группам переменным

Результаты моделирования процесса стабилизации заданного курса $\psi(t)$ БПЛА при его движении со скоростью 3 м/с при возникновении порыва бокового ветра со скоростью 20 м/с на интервале $t = [5; 8]$ с представлены на рис. 14.

Рис. 14 подтверждает способность системы автоматически поддерживать заданное направление полёта путём энергичного управления угловым положением аппарата, т.е. управлением вектором его тяги.

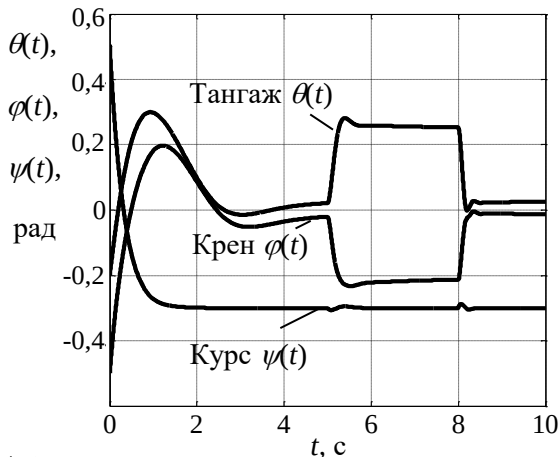


Рис. 14. Стабилизация курса БПЛА изменением вектора его тяги при боковом порыве ветра на интервале $t = [5; 8]$ с

Важно отметить, что использование принципа иерархии управления и разделения функций при построении агрегированного регулятора не является его тривиальной декомпозицией на независимые линеаризованные части меньшей размерности, так как в нём сохраняется многосвязность и нелинейность управления многомерным объектом высокого порядка, в то время как каждая часть регулятора представляет собою динамическое звено первого порядка.

5.5. СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрим пример применения методологии многоальтернативности для построения системы принятия оптимальных решений как частного случая системы управления.

В качестве объекта выберем класс комбинаторных задач, отличающийся следующими особенностями:

- наличие большого количества локальных экстремумов;
- расположение глобального экстремума в пространстве поиска в общем случае изолировано от расположения локальных

оптимальных решений, т.е. область глобального экстремума нельзя обнаружить по шлейфу локальных, рис. 15 [35].

Указанное обстоятельство затрудняет использование для решения таких задач генетических алгоритмов, исключая, по существу, использование свойства преемственности этих алгоритмов. Например, если при решении тестовых задач квадратичного программирования размерностью $n = 12$ классический генетический алгоритм обеспечивал нахождение глобального экстремума в 80% поисков, то при увеличении размерности до $n = 20$ такой результат достигался лишь в 2–5% поисков [35].

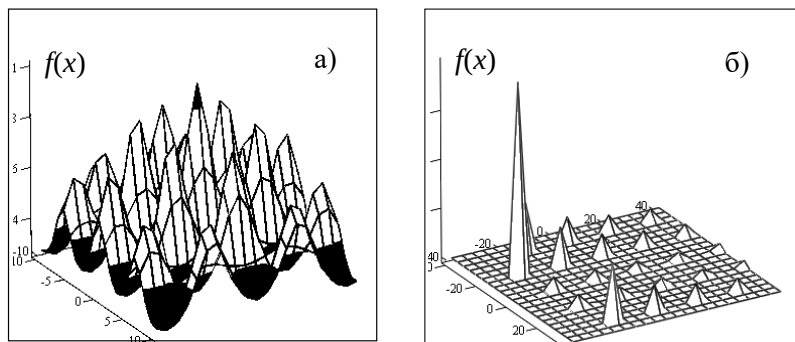


Рис. 15. Иллюстрация расположения глобального экстремума функции $f(x)$: а) в окружении шлейфа локальных экстремумов; б) изолированное

Методология многоальтернативности указывает на целесообразность использования в данной задаче принципа блочности, который применительно к генетическим процессам был сформулирован М. Эйгеном [54] в виде гипотезы о том, то в добиологический период рост макромолекул происходил не путём скрещивания родительских особей, а на основе матричной репликации: накопительного присоединения новых блоков в результате самоинструирования – избирательной предпочтительности такого присоединения, определяемой уже сформированной частью макромолекулы.

Практические процедуры генетического алгоритма с матричной репликацией содержат следующие этапы:

- формирование множества вариантов решений – наборов хромосом таким образом, что во все хромосомы входит одна и та же матрица: в дальнейшем неизменяемые по содержанию и расположению участки – гены. Пример такой хромосомы с матрицей репликации показан на рис. 16. Создаётся несколько вариантов таких исходных множеств (популяций), отличающихся своими матрицами. Например, если использовать матрицу, состоящую из одного элемента h_1^1 , то размещая её в одной популяции на первое место h_1^1 , во второй популяции – на второе место h_2^1 и т.д., мы получим 10 популяций, одна из которых уже содержит один элемент из варианта решения, соответствующему глобальному экстремуму X ;

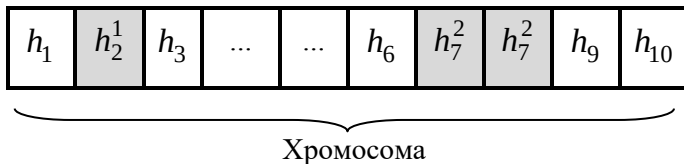


Рис. 16. Вариант хромосомы с генами h_i , $i = 1, \dots, 10$, содержащей трёхместную матрицу репликации $\{h_2^1, h_7^2, h_8^3\}$

- реализация процесса эволюции каждой популяции с помощью генетического алгоритма любой модификации. При этом, в соответствии с гипотезой М. Эйгена, предполагается, что та популяция, которая содержит неизменяемую матрицу глобального решения X , за счёт самоинструктирования обеспечит нахождение этого решения с вероятностью, большей, чем при «безматричной» эволюции. Отметим, что процедуры естественного отбора осуществляются только в пределах каждой популяции, т.е. эволюция каждой матрицы происходит независимо от других и исключение какой-либо матрицы из эволюционного процесса не допускается;

- анализ решений, полученных из каждой матрицы, и выбор лучших (или группы конкурентоспособных) из них.

В качестве демонстрации результативности применения принципа блочности в виде поиска с матрицей репликации приведём решение задачи определения кратчайшего маршрута сверления печатной платы с 99 отверстиями (задача коммивояжёра), рис. 17а [35].

Высокая размерность этой задачи практически исключила возможность нахождения глобального экстремума: пятисоткратное повторение поиска традиционным генетическим алгоритмом с 1000 циклов эволюции в каждом привело к получению ряда близких маршрутов длиной $L = 261...264$ мм, как это оказалось, далёких от кратчайшего пути.

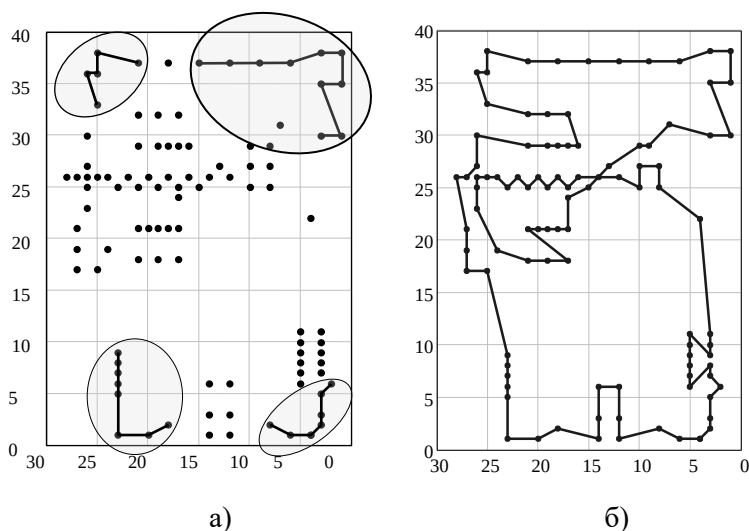


Рис. 17. Решение задачи коммивояжёра генетическим алгоритмом с матричной репликацией

Вместе с тем анализ полученных в результате такого традиционного поиска решений показал, что в значительно части решений присутствуют одинаковые элементы маршрутов (выделены на рис. 17а). Эти элементы были использованы в качестве четырёх матриц репликации и введены в алгоритм поиска в виде неизменяемой части. Уже 50-кратного повторения поиска

оказалось достаточным для получения значительно лучшего варианта маршрута с длиной $L = 232$ мм, рис. 176.

Разнообразие представленных выше задач, решаемых на основе методологии многоальтернативного управления, подтверждает высокую степень общности её принципов, заложенных в эволюционных механизмах природы.

6. Системообразующая функция методологии многоальтернативности как кибернетической концепции

Рассмотрим взаимосвязь методологии многоальтернативного управления с другими кибернетическими принципами.

Концепция чёрного ящика, заключающаяся в сознательном абстрагировании от внутреннего строения объектов управления и происходящих в них процессов, постепенно, с ростом сложности последних, уступает место управлению по вектору состояния, адекватная оценка которого возможна только при раскрытии внутренней структуры и процессов, протекающих в этих объектах. Принципы многоальтернативного управления в своей основе в полной мере отвечают этой тенденции, так как раскрывают содержание внутренних эволюционных механизмов сложных живых систем, обеспечивающих им высокие адаптационные свойства.

Принцип критической сложности, сформулированный в работах Дж. фон Неймана и указывающий на возможность самоорганизации только в тех искусственных системах, уровень сложности которых выше некоторого критического значения, непосредственно согласуется с многоальтернативным принципом многообразия и разделения функций, обеспечивающим сложной системе, как это было показано выше, устойчивую работоспособность и живучесть в широких пределах изменяющихся условий функционирования.

Принцип дискретности информации и комбинаторный подход к определению её количества [14, 21] полностью совпадает с принципом блочности структур сложных систем, порождаю-

щим многообразием их конфигураций и приспособительных функций.

Принцип магистрального развития предусматривает существование у сложных многоагентных систем такой стратегии своего развития, которая делает невыгодным ни одному агенту отклонение от этой стратегии, несмотря на то, что интересы отдельно взятых агентов не совпадают [62]. Реализация этого принципа в технических системах осуществляется с помощью многоальтернативного принципа иерархичности строения и функционирования сложных систем, в которых выполнение общей (магистральной) функции системы возможно только при согласованном, синергетическом функционировании её подсистем, подчинённом этой общей функции. Примечательно, что принцип иерархического строения хорошо согласуется результатами работы [11], в которой доказывается правило рациональной организации: с ростом сложности системы и условий её функционирования количество уровней иерархии в ней необходимо увеличивать.

Принцип необходимого разнообразия [55], утверждающий, что для противодействия многообразным условиям изменяющейся внешней среды открытая система должна обладать соответствующим многообразием своих состояний, т.е. управлений, и по названию и по своему содержанию совпадает с сущностью методологии многоальтернативного управления, изложенной выше.

Таким образом, определяя место методологии многоальтернативного управления в кибернетике, можно констатировать, что она выполняет функцию обобщения основных кибернетических принципов, методологически объединяя в себе их содержание на основе общих механизмов эволюционных процессов живой природы.

7. Заключение

Феномен высокой адаптационной стабильности сложных биологических систем указывает на существование в них неко-

торых эволюционных механизмов, выходящих за рамки естественного отбора.

В качестве таких механизмов предложено выделить ряд достаточно общих принципов – принципы многоуровневости, многообразия и разделения функций и принцип модульности, составляющих в своей совокупности общую эволюционную концепцию многоальтернативного строения и функционирования биологических систем.

Математическое моделирование процессов эволюции живых систем с учётом механизмов многоальтернативности подтвердило эволюционные свойства последних и открыло возможность для направленного воспроизведения этих свойств в сложных антропогенных системах. Такое воспроизведение необходимо предполагает обобщение соответствующих процедур синтеза в эволюционную методологию многоальтернативного управления.

Раскрытые в работе состав и кибернетическое содержание этой методологии позволили выявить её системообразующую (обобщающую) роль по отношению к ряду базовых кибернетических принципов построения сложных систем, заключающуюся в выявлении у этих принципов единого – эволюционного смысла.

Представленные примеры практического применения методологии многоальтернативного управления не только подтверждают её высокую результативность, но и раскрывают конструктивный характер её принципов, непосредственно указывающих на способы их реализации при построении сложных искусственных систем.

Литература

1. АБАКУМОВ А.И. *Модели Неймана – Гейла*. – Владивосток: ДВГУ, 2004. – 44 с.
2. АБАКУМОВ А.И., ПИДЮРА Т.А. *Магистральные характеристики матричных моделей экономической динамики*. – Владивосток: Вестник ТГЭУ. – 2010. – № 2. – С. 96–103.

3. АНДРЕЕВА С.И., АНДРЕЕВ Н.И. *Эволюционные преобразования двустворчатых моллюсков Аральского моря в условиях экологического кризиса.* – Омск: Изд-во Омского государственного педагогического университета, 2003. – 382 с.
4. АНИСИМОВ А.А., ТАРАРЫКИН С.В. *Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – №5. – С. 3–14.
5. АРИСТОВ А.О. *Теория квазиклеточных сетей.* – М: МИ-СиС, 2014. – 188 с.
6. БАШАРИН А.В., НОВИКОВ В.А., СОКОЛОВСКИЙ Г.Г. *Управление электроприводами.* – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
7. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ГУСЕВ К.Ю. *Модальное управление нестационарными системами* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4, №8. – С. 46–54.
8. ВАСИЛЬЕВ Е.М., ТАРАТЫНОВ О.Ю. *Алгоритмы управления тепловлажностной обработкой бетонных изделий* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №2. – С. 13–16.
9. ВЕСЕЛОВ Г.Е., ПОПОВ А.Н., КУЗЬМЕНКО А.А. *Синергетический подход в теории управления: истоки, развитие, результаты* // Тр. X Всероссийской науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика». – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 12–18.
10. ВИНЕР Н. *Кибернетика, или управление и связь в животном и машине.* – М.: Наука, 1983. – 344 с.
11. ВОРОНИН А.А., ГУБКО М.В., МИШИН С.П. и др. *Математические модели организаций.* – М.: Ленанд, 2008. – 360 с.
12. ГАЛИМОВ Э.М. *Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции.* – М.: Едиториал УРСС, 2006. – 256 с.
13. ГРИНИН Л.Е., МАРКОВ А.В., КОРОТАЕВ А.В. *Макроэволюция в живой природе и обществе.* – М.: Либроком, 2009. – 248 с.
14. ДОКИНЗ Р. *Эгоистичный ген.* – М.: АСТ, 2013. – 512 с.

15. ЕМЕЛЬЯНОВ С.В. *Системы автоматического регулирования с переменной структурой*. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
16. ЖМУДЬ В.А. *Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром* // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – №2(8). – С. 106–122.
17. КИМУРА М. *Молекулярная эволюция: теория нейтральности*. – М.: Мир, 1985. – 394 с.
18. КОЛЕСНИКОВ А.А. *Синергетическая теория управления*. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.
19. КОЛЕСНИКОВ А.А. *Синергетическая теория управления: концепция, методы, тенденции развития* // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2001. – Т. 23, №5. – С. 7–27.
20. КОЛЕСНИКОВ А.А. *Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза*. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
21. КОЛМОГОРОВ А.Н. *Три подхода к определению понятия «количество информации»* // Проблемы передачи информации. – 1965. – Т. 1, вып. 1. – С. 3–11.
22. КРАСНОВА С.А., УТКИН В.А., УТКИН А.В. *Блочный синтез систем управления роботами-манипуляторами в условиях неопределённости*. – М.: Ленанд, 2014. – 208 с.
23. КРАСНОВА С.А. *Каскадный синтез наблюдателей состояния для нелинейных систем при наличии возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 3–26.
24. КРАСОВСКИЙ А.А. *Проблемы физической теории управления* // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №11. – С. 3–28.
25. КУЗОВКОВ Н.Т. *Модальное управление и наблюдающие устройства*. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
26. ЛЁТОВ А.М. *Условно устойчивые регулируемые системы (об одном классе оптимальных регулируемых систем)* // Автоматика и телемеханика. – 1957. – №7. – С. 601–604.
27. МАКАРОВ В.Л., РУБИНОВ А.М. *Математическая теория экономической динамики и равновесия*. – М.: Наука, 1973. – 336 с.
28. НЕЙМАН ДЖ. *Теория самовоспроизводящихся автоматов*. – М.: URSS, 2010. – 384 с.

29. НОВИКОВ Д.А. *Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития.* – М.: Ленанд, 2016. – 160 с.
30. НОВИКОВ Д.А. *Методология управления.* – М.: Либроком, 2011. – 128 с.
31. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления образовательными системами.* – М.: Народное образование, 2009. – 452 с.
32. НОВИКОВ С.П. *Вторая половина XX века и ее итог: кризис физико-математического сообщества в России и на Западе* // Вестник ДВО РАН. – 2006. – Вып. 4. – С. 3–22.
33. НОВИКОВ А.М., НОВИКОВ Д.А. *Методология.* – М.: Синтег, 2007. – 668 с.
34. *Новые концепции общей теории управления: Сборник научных трудов* / Под ред. А.А. Красовского. – М.-Таганрог: ТРТУ, 1995. – 183 с.
35. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Матричная репликация в NP-полных задачах комбинаторной оптимизации* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, №4. – С. 7–14.
36. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л. *Многоальтернативные системы: обзор и классификация* // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – №2. – С. 4–13
37. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы* // Управление большими системами. Вып. 48. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 6–58.
38. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Многоальтернативность: эволюционная стратегия биологических систем* // Управление большими системами. – 2019. Вып. 77. – С. 125–170.
39. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Системы многоальтернативного управления: эволюционный подход.* – Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2023. – 376 с.
40. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Многоуровневая сигнальная адаптация в нестационарных системах управления* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, №5. – С. 38–47.

41. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ЗАХВАТОВ В.И., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Принцип разделения функций в задачах модального управления* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, №1 – С. 7–16.
42. ПОДВАЛЬНЫЙ С.Л., ВАСИЛЬЕВ Е.М. *Синтез систем высокого порядка с сигнальной адаптацией* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, №3. – С. 7–14.
43. ПРАНГИШВИЛИ И.В. *Системный подход и общесистемные закономерности*. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
44. ПРАНГИШВИЛИ И.В. *Энтропийные и другие системные закономерности*. – М.: Наука, 2003. – 428 с.
45. РЕДЬКО В.Г. *Эволюционная кибернетика*. – М.: Наука, 2003. – 155 с.
46. РЕДЬКО В.Г. *Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики*. – М.: Либроком, 2013. – 224 с.
47. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ Н.В., ВОРОНЦОВ Н.Н., ЯБЛОКОВ А.В. *Краткий очерк теории эволюции*. – М.: Наука, 1977. – 303 с.
48. УТКИН В.И. *Метод разделения движений в задачах наблюдения* // Автоматика и телемеханика. – 1990. – №3. – С. 27–37.
49. УТКИН В.И. *Скольльзящие режимы и их применение в системах с переменной структурой*. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
50. УТКИН В.И. *Условно устойчивая система с переменной структурой в работе А.М. Лётова* // Автоматика и телемеханика. – 2011. – №11. – С. 140–142.
51. ФИЛИМОНОВ Н.Б. *Методологический кризис «всепобеждающей математизации» современной теории управления* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, №5. – С. 291–300.
52. ХАКЕН Г. *Синергетика*. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
53. ХАКЕН Г. *Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам*. – М.: УРСС, 2014. – 320 с.
54. ЭЙГЕН М. *Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул*. – М.: Мир, 1973. – 224 с.

55. ЭШБИ У.Р. *Введение в кибернетику*. – М.: КомКнига, 2005. – 432 с.
56. ЭШБИ У.Р. *Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения*. – М.: Изд. иностр. лит., 1962. – 397 с.
57. ABBOTT D. *The reasonable ineffectiveness of mathematics* // Procs. of the IEEE. – 2013. – Vol. 101, No. 10. – P. 2147–2153.
58. COPE E.D. *The primary factors of organic evolution*. – Sydney: Wentworth Press, 2016. – 588 p.
59. HEYLIGHEN F., JOSLYN C. *Cybernetics and Second-Order Cybernetics* // Encyclopedia of Physical Science & Technology. – New York: Academic Press, 2001. – P. 155–170.
60. KESSLER C. *Ein beitrage zur theorie mehrschleifiger regelungen* // At-Automatisierungstechnik. – 1960. – Vol. 8, No. 1–12. – P. 261–266.
61. KROC J., JIMÉNEZ-MORALES F., GUIADO J.L. et al. *Building efficient computational cellular automata models of complex systems: background, applications, results, software, and pathologies* // Advances in Complex Systems. – 2019. – Vol. 22, No. 5. – 1950013. – 38 p.
62. *Mechanism design and management: mathematical methods for smart organizations* / Ed. by Prof. D. Novikov. – New York: Nova Science Publishers, 2013. – 163 p.
63. PODVALNY S.L., VASILJEV E.M. *Analytical synthesis of aggregated regulators for unmanned aerial vehicles* // Journal of Mathematical Sciences. – 2019. – Vol. 239, No. 2. – P. 135–145.
64. ZHANG J., XIONG X., WANG Y. et al. *Simulation model for cascading failure in complex network: a cellular automata approach* // Proc. of the 2nd World Symposium on Software Engineering. – New York: Publisher Association for Computing Machinery, 2020. – P. 274–277.

EVOLUTIONARY METHODOLOGY FOR MULTI-ALTERNATIVE CONTROL OF COMPLEX SYSTEMS

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

Eugeny Vasiljev, Voronezh State Technical University, Voronezh,
Doctor of Science, senior researcher (vgtu-aits@yandex.ru).

Abstract: The article presents the results of studies devoted to the property of multi-alternative structure and functioning of complex biological systems. The purpose of the work is: generalization of these results in the form of an evolutionary methodology of multi-alternative control of large artificial systems, identification of the place of this methodology among known cybernetic principles of control, and determination of its capabilities in practical implementation. It is noted that the relevance of the above-mentioned generalization is determined by the urgent need to systematize various areas within the framework of cybernetics itself as a science. The cybernetic basis of the methodology of multi-alternative control is revealed, consisting in the reproduction of evolutionary mechanisms of living systems that go beyond the mechanism of natural selection and are traditionally considered as a property of the diversity of these systems. Based on the analysis of the content of these mechanisms, fairly simple principles of the proposed methodology are formulated: the principle of diversity and separation of functions, the principle of multi-level structure and the principle of modularity. The constructive nature of these principles is shown, directly indicating the methods and ways of their practical implementation. A generalized model of a multi-alternative control system is presented, and a description of its functional units is given. The system-forming role of the multi-alternative control methodology in relation to a number of basic cybernetic principles of control of false objects is shown, consisting in identifying the general evolutionary content of these principles. Specific examples of the application of the methodology for the synthesis of control systems for various objects are considered, and its high efficiency is demonstrated.

Keywords: evolutionary cybernetics, cybernetic principles of evolution, methodology of multi-alternative control.

УДК 007:575.85

ББК 22.18 28.02

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.К. Погодаевым.*

Поступила в редакцию 28.02.2025.

Опубликована 31.05.2025.