

Концепция эволюционного синтеза современных сложных систем управления

Ю. А. Кораблёв✉, Д. М. Лосева, М. Ю. Шестопалов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉juri.korablev@gmail.com

Аннотация. Рассматривается концепция эволюционного синтеза сложных систем управления, представляющих предмет изучения в классической теории управления, и концепция эволюционного синтеза интеллектуальных отказоустойчивых систем управления, ставших результатом интеллектуализации традиционных сложных систем управления в целях решения проблем принятия рациональных решений, отличие этих концепций друг от друга. При этом интеллектуализацию сложных систем следует рассматривать как положительный вид развития систем управления, существенно облегчающий принятие правильных решений, так как механизмы решения в них похожи на механизмы, используемые человеческим интеллектом. Главной особенностью этих видов сложных систем управления является невозможность однозначно адекватно описать исследуемую сложную систему управления классическими математическими методами. Математические модели пригодны только для описания некоторых моментов, наиболее общих свойств и закономерностей, и всегда остается широкий круг вопросов и проблем, которые не могут быть описаны на основе существующих формальных методов. Помочь в решении этих проблем призвана методология эволюционного синтеза, сочетающая лучшие достижения классической теории управления и теории искусственного интеллекта.

Ключевые слова: концепция эволюционного синтеза, сложные системы управления, интеллектуализация, моделирование

Для цитирования: Кораблев Ю. А., Лосева Д. М., Шестопалов М. Ю. Концепция эволюционного синтеза современных сложных систем управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 4. С. 29–34. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-29-34.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

The Concept of Evolutionary Synthesis of Modern Complex Control Systems

Ju. A. Korablev✉, D. M. Loseva, M. Ju. Shestopalov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉juri.korablev@gmail.com

Abstract. The concept of the evolutionary synthesis of complex control systems, which are the subject of study in classical control theory, and the concept of the evolutionary synthesis of intelligent fault-tolerant control systems, which are the result of the intellectualization of traditional complex control systems in order to solve problems of rational decision-making, the difference between these concepts from each other, are considered. At the same time, the intellectualization of complex systems should be considered as a positive type of development of control systems, which significantly facilitates making the right decisions, since the decision mechanisms in them are similar to the mechanisms used by human intelligence. The main feature of these types of complex control systems is the inability to unambiguously adequately describe the complex control system under study using classical mathematical methods. Mathematical models are suitable only for describing some

moments, the most general properties and patterns, and there is always a wide range of issues and problems that cannot be described on the basis of existing formal methods. The methodology of evolutionary synthesis, combining the best achievements of classical control theory and the theory of artificial intelligence, is designed to help solve these problems.

Keywords: the concept of evolutionary synthesis, complex control systems, intellectualization, modeling

For citation: Korablev Ju. A., Loseva D. M., Shestopalov M. Ju. The Concept of Evolutionary Synthesis of Modern Complex Control Systems // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 4. P. 29–34. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-29-34.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В общенаучном понимании методология (от *греч.* *methodos* – путь исследования или познания, *logos* – слово, учение) представляет собой систему принципов, совокупность методов, методик исследования и обработки данных, т. е. основу научного исследования. Понятия «методология», «метод», «методика» родственные, методология – более широкое понятие. Оно содержит в себе, как часть понятия, методы и методики. Методология определяет стратегию, тактику исследований, способы изучения, пути достижения цели, т. е. методы, их реализацию, т. е. методики. Следовательно, с точки зрения философии эти понятия определяются как соотношение целого и части.

В свою очередь, термин «концепция» происходит от латинского *conceptio* (понимание, система) и обычно трактуется как главный замысел, руководящая идея. Концепция определяет стратегию исследований, в данном случае в предметной области современных сложных систем управления. Формирование концепции для исследования данной предметной области имеет свои особенности.

Постановка задачи. Большая размерность сложных систем управления, неполная определенность топологии, структур операторов исключает возможность решения задач синтеза сложных систем на основе только причинно-следственных моделей. Необходимо привлечение концептуальной функционально-целевой и системной информации. Также следует отметить, что функциональная причинно-следственная модель может быть полностью определена только в результате поэтапного развития сложной системы [1].

Этапы проектирования. На первом этапе проектирования сложной системы управления необходимо обосновать создание конкретной системы и решить ряд задач прогноза для определения перспектив развития систем данного класса.

Второй этап – концептуальный, для формирования целей управления и функциональных бло-

ков системы, осуществляется конструкторами. Этот этап связан с определением базового состава функциональных блоков, целей управления и взаимодействия комплексов в сложной системе.

В результате проведения второго этапа получается функционально-целевая системная информация о составе системы, а также определяются основные функционально-структурные отношения в системе.

Третий этап проектирования сложной системы управления представляет собой целенаправленный эволюционный синтез и заключается:

- в синтезе топологии, выборе структур операторов связей и задании количественных значений параметров всех элементов системы в соответствии с заданными для них целями управления;
- определении связей между элементами, элементами второго уровня иерархии и синтезе этих элементов в соответствии с их целями управления;
- образовании и синтезе всех элементов более высоких уровней иерархии.

На этом этапе синтеза реализуется заданное коллективное поведение системы с целью обеспечения общесистемных функций и целей управления.

Эффективным аппаратом для синтеза сложных систем управления [2] является аппарат системных графов, адекватный функционально-целевым причинно-следственным моделям сложных систем.

На четвертом этапе эволюционного синтеза сложной системы управления в результате анализа и выявления слабых мест принимается решение об организации следующей итерации синтеза, на которой происходит дальнейшее развитие и совершенствование системы в соответствии с откорректированными целями управления и критериями качества.

Таким образом, эволюционный синтез сложной системы управления (см. рисунок) можно условно представить так:

$$\begin{aligned}
 M_S^{(0)}(3) &\rightarrow M_S^{(1)}(0) \rightarrow \{M_S^{(1)}(1)\} \rightarrow \\
 &\rightarrow M_S^{(1)}(1) \rightarrow \{M_S^{(1)}(2)\} \rightarrow \\
 &\rightarrow M_S^{(1)}(2) \rightarrow \{M_S^{(1)}(3)\} \rightarrow \\
 &\rightarrow M_S^{(1)}(3) \rightarrow M_S^{(2)}(0) \rightarrow \dots
 \end{aligned}$$

В начале синтеза задается исходный граф системы $G_S^{(0)}$, свойства которого не удовлетворяют требованиям, т. е. на нулевой итерации синтеза – это модель системы третьего ранга неопределенности $M_S^{(0)}(3)$. Здесь целенаправленный эволюционный синтез реализуется включением дуг параллельной и последовательной коррекции. Как следствие, на первой итерации синтеза ($\lambda = 1$) результат – неопределенность топологии системы, т. е. модель системы имеет нулевой ранг $M_S^{(1)}(0)$.

На множестве вершин исходного графа $G_S^{(0)}$ выделяют два подмножества: подмножество вершин для возможного подключения звеньев параллельной коррекции и подмножество дуг графа для возможного подключения звеньев последовательной коррекции при разрыве этих дуг. Таким образом, модель нулевого ранга неопределенности оказывается эквивалентной множеству моделей первого ранга неопределенности:

$$M_S^{(1)}(0) = \{M_S^{(1)}(1)\},$$

среди которых следует вести поиск при топологическом синтезе.

На этапе топологического синтеза из множества возможных дуг коррекции выбирается только одна дуга. Предполагается, что при этом выбрана оптимальная модель $M_S^{(1)}(1)$ из множества моделей $\{M_S^{(1)}(1)\}$. При этом необходимо, чтобы определение места включения дуги коррекции происходило до выбора структур операторов и определения их параметров.

Модель системы $M_S^{(1)}(1)$ с наилучшей топологией имеет неопределенную структуру оператора дуги коррекции. Модель системы $M_S^{(1)}(1)$ первого ранга неопределенности при задании множества возможных структур оператора дуги коррекции эквивалентна множеству моделей второго ранга:

$$M_S^{(1)}(1) = \{M_S^{(1)}(2)\},$$

среди которых ведется поиск на этапе структурного синтеза.

Структурный синтез направлен на выбор рациональной структуры оператора дуги коррекции. В результате структурного синтеза на $\{M_S^{(1)}(2)\}$ выделяется модель $M_S^{(1)}(2)$ с неизвестными параметрами дуги коррекции.

Таким образом, модель $M_S^{(1)}(2)$ описывает множество систем третьего ранга неопределенности:

$$M_S^{(1)}(2) = \{M_S^{(1)}(3)\}.$$

Параметрический синтез имеет целью нахождение полностью определенной модели $M_S^{(1)}(3)$, которая оптимальна в смысле принятого критерия.

Процесс синтеза будет продолжен, если требуемые фундаментальные свойства системы не достигнуты. В этом случае назначается вторая итерация ($\lambda = 2$) синтеза, где все по сути дела повторяется: модель $M_S^{(1)}(3)$ образуется включением новой дуги коррекции. Аналогично модели системы в начале второй итерации здесь тоже нулевой ранг неопределенности, так как место включения коррекции неизвестно

$$M_S^{(2)}(0) = M_S^{(1)}(3).$$

На рисунке: λ – номер итерации, R – ранг неопределенности модели.

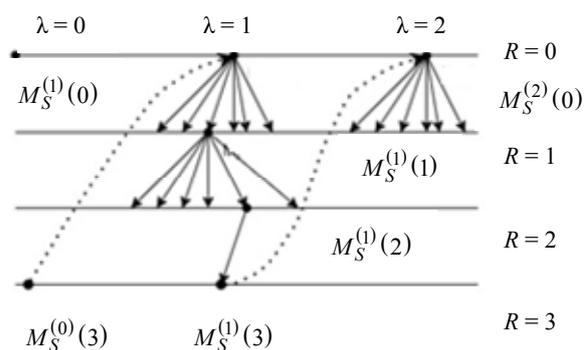


Иллюстрация целенаправленного эволюционного развития системы управления
Illustration of purposeful evolutionary development of the control system

Концепция эволюционного синтеза интеллектуальных отказоустойчивых систем. Эволюционный синтез интеллектуальных отказоустойчивых систем отличается во многом от эво-

люционного синтеза классических сложных систем управления [3].

Следует сказать, что описанные этапы эволюционного синтеза системы управления на нижнем уровне иерархии системы имеют смысл, если проектирование интеллектуальной отказоустойчивой системы происходит «с нуля». На практике же обычно система управления нижнего уровня иерархии уже спроектирована и речь идет только о проектировании системы на втором уровне иерархии.

Основное содержание проектирования интеллектуальных отказоустойчивых систем управления составляют задачи второго уровня иерархии. Это задачи диагностики состояния технических систем и обеспечения отказоустойчивости управления. Для этой области в настоящее время необходим новый методологический подход, который позволил бы систематизировать все накопленные знания по вопросам отказоустойчивого управления.

В качестве такого системно-методологического подхода предлагается рассмотрение предметной области интеллектуального отказоустойчивого управления, опирающееся на принципы системологии – неизбыточности и рекуррентного объяснения, конкретизированного и дополненного А. А. Вавиловым применительно к сложным системам управления в следующей формулировке:

- последовательное раскрытие неопределенности;
- однозначное и не избыточное представление свойств;
- единство функционально-структурных отношений;
- иерархический принцип организации систем;
- оценка взаимоотношений частей и целого, влияния свойств компонентов на качество системы управления;
- целенаправленное эволюционное развитие системы управления.

Проектирование отказоустойчивых систем предполагает также формализацию описания средств настройки и реконfigurирования или реструктуризации системы и опирается на понятие рангов неопределенности моделей. Из понятия рангов неопределенности моделей вытекает важное для проектирования утверждение: свойства менее определенной модели системы, сохраняются при повышении ранга модели

$$M(R') \subseteq \{M(R'')\}; R' < R''.$$

Из утверждения следует ряд практически важных выводов:

– принцип эволюционного развития, т. е. проектный цикл в виде последовательной тетрады: координаты – топология – структуры операторов – параметры:

$$M(0) \rightarrow M(1) \rightarrow M(2) \rightarrow M(3);$$

– особая роль проблемы формирования структур (топологии).

В основу анализа предметной области отказоустойчивого управления технологическими системами и объектами должна быть положена классификационная система, которая позволяет систематизировать имеющиеся знания, подводя итог уже существующей информации.

Построение классификационной схемы начинается с определения классификационных признаков. В данном случае они должны отражать, с одной стороны, методику эволюционного синтеза сложных систем управления А. А. Вавилова, с другой стороны, особенности структурной организации отказоустойчивых систем управления. Поэтому представляется логичным следующий выбор классификационных признаков исследуемой предметной области:

1. Ранги неопределенности:

- $M_S(0) = \langle X \rangle$ – множество переменных системы. Математически модели первого ранга неопределенности – нуль-граф, так как отсутствуют все связи, или, наоборот, полный неориентированный граф, так как можно предположить наличие связи между всеми переменными;
- $M_S(1) = \langle X, G \rangle$ – топология системы. Математически модели первого ранга неопределенности соответствует ориентированный граф;
- $M_S(2)$ – второй ранг неопределенности – структурная модель, которая кроме топологии содержит информацию о классе операторов;
- $M_S(3)$ – третий ранг неопределенности – полная параметрическая модель, которая содержит полную информацию о всех операторах.

2. Базовые функции отказоустойчивой системы управления:

- диагностика (Fault Detection and Diagnosis, FDD) – первая базовая функция, обеспечивающая решение следующих трех задач: обнаружения, локализации (изоляция) и идентификации отказа (неисправности);
- отказоустойчивое управление (Fault Tolerant Control, FTC) – вторая базовая функция, реализу-

Методология исследований в области отказоустойчивого управления
Methodology of research in the field of fault-tolerant management

Ранг неопределенности	Данные	Подход, основанный	Модель
$M_S(0)$	Отсчеты сигнала	на данных (Data based)	Нуль-граф
$M_S(1)$	Выборки данных	на топологии (Topology based)	Топологическая модель
$M_S(2)$	Структурно-спектральные свойства сигнала	на структуре (Structure based)	Структурная модель
$M_S(3)$	Модель данных	на модели (Model based)	Параметрическая модель

ющая алгоритм управления для компенсации порождаемых отказом изменений в системе таким образом, чтобы обеспечить устойчивость и приемлемые показатели качества управления в замкнутой системе.

Результат классификации по описанной схеме может быть представлен в табличной форме (см. таблицу), где значения основных классификационных признаков образуют соответственно строки и столбцы таблицы. Вертикальный ряд классификационных делений образуют ранги неопределенности диагностических моделей, горизонтальный ряд составляют базовые функции отказоустойчивой системы управления: подходы к проектированию, характер обрабатываемых данных, модели.

Следует отметить, что эта таблица иллюстрирует два основных подхода к проектированию интеллектуальных отказоустойчивых систем управления [4]:

1. Эволюционный синтез интеллектуальной отказоустойчивой системы управления, развитие которой происходит путем последовательного раскрытия неопределенностей и наращивания уровней иерархии системы в соответствии с рангом неопределенности.

2. Автономное использование решений на каждом ранге неопределенности, если проектируемая интеллектуальная отказоустойчивая система управления по своим характеристикам соответствует определенному уровню иерархии, указанному в таблице.

Заключение. В статье показано, что для анализа современных сложных систем управления при наличии принципиально неформализуемых проблем и невозможности математически точно сформулировать задачу могут быть применены эволюционные стратегии, эвристические когнитивные методы анализа, которые вскрывают сущ-

ности структур и проблемы нашего назначения и причины непонимания задач управления. Необходимо создавать основы получения нового знания для принятия интеллектуальных управленческих решений. Во всех теориях управления сегодня наиболее актуальна борьба с неопределенностью описания сложных систем. Когда имеется достаточно адекватное формализованное описание сложного объекта, тогда и никакие эвристические, когнитивные и робастные методы анализа не требуются. Только когда недостает исходной информации о сложной системе, система имеет противоречивые цели, плохо поставлена задача и очевидна неопределенность в адекватном описании, тогда возникает необходимость в эвристическом, робастном и когнитивном анализе и управлении сложными системами.

Основным социальным заказом для современной науки управления является решение плохо поставленных, слабоструктурированных или слабоформализуемых задач, связанных с рациональной организацией сложных технологических, организационных, социально-экономических объектов управления и перспективами их существования.

В интеллектуализированной сложной системе управление осуществляется на основе опыта, навыков, неявного знания, т. е. как бы «понимания» сложных ситуаций целенаправленного поведения. Элементарный интеллект в системе управления образует контуры обратной связи и потоки информации, при которых в системе возникает способность «понимать» текущую ситуацию. Если к этому основному контуру обратной связи добавляется адаптивизирующая подсистема, то появляется возможность «понимать» еще более сложные ситуации. Если исследуемый объект выполняет одновременно несколько функций (многоцелевой объект), тогда каждая новая функ-

ция интеллектуально усложняет систему и требует усложнения интеллектуальной подсистемы.

В статье показано, что одну и ту же задачу можно запрограммировать либо традиционными методами, либо нетрадиционными, например методом искусственного интеллекта, при котором

используются различные способы обработки знаний. В связи с тенденцией ко все большему усложнению процедур принятия решений в системах управления, по мере их развития надо применять все более сложные технологии искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Вавилов А. А. Структурный и параметрический синтез сложных систем. Л.: ЛЭТИ, 1979. 94 с.
2. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Эволюционный синтез систем управления. Л.: ЛЭТИ, 1983. 80 с.

3. Гаврилов А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2002. 142 с.
 4. Кораблев Ю. А. Проектирование гибридных интеллектуальных систем отказоустойчивого управления. СПб.: Изд-во «Печатный Цех», 2019. 156 с.
-

Информация об авторах

Кораблёв Юрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: juri.korablev@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2432-7169>

Лосева Дарья Михайловна – аспирант кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: d.m.loseva@gmail.com

Шестопалов Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: shestopalov_08@mail.ru

References

1. Vavilov A. A. Structural and parametric synthesis of complex systems. L.: LETI, 1979. 94 p. (In Russ.).
2. Vavilov A. A., Imaev D. X. Evolutionary synthesis of control systems. L.: LETI, 1983. 80 p. (In Russ.).

3. Gavrilo A. V. Hybrid intelligent systems. Novosibirsk: Publishing house of NSTU. 2002. 142 p. (In Russ.).
 4. Korablev Yu. A. Design of hybrid intelligent fault-tolerant control systems. SPb.: Publishing House Printing Shop, 2019. 156 p. (In Russ.).
-

Information about the authors

Yuri A. Korablev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Automation and Control Processes Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: juri.korablev@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2432-7169>

Daria M. Loseva – postgraduate student of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: d.m.loseva@gmail.com

Mikhail J. Shestopalov – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: shestopalov_08@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.03.2022; принята к публикации после рецензирования 05.04.2022; опубликована онлайн 28.04.2022.

Submitted 10.03.2022; accepted 05.04.2022; published online 28.04.2022.
