

Г.В. Горелова

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ*

Рассмотрены особенности организационно-технических систем (СОТС), относящихся к классу сложных. К СОТС могут быть отнесены робототехнические комплексы, автоматизированные производства, радиоэлектронные системы и устройства, служащие для передачи и преобразования информации и др. В современном понимании СОТС являются информационно-техническими системами и в настоящее время уже не являются только техническими объектами, их можно классифицировать также как киберфизические системы (СФС). Эффективность СОТС определяется многими критериями, которые должны изменяться по содержанию и времени в зависимости от целей, этапа существования СОТС, влияния внутренней и внешней среды. Это определяет специфику процессов принятия управленческих решений в них, требующую проведения предварительного имитационного моделирования, особенно на этапах проектирования этих систем. Дана в общем виде постановка задачи имитационного моделирования, базирующаяся на объединении трех подходов к решению: когнитивного, многокритериального и многоэтапного, вероятностной неопределенности. Предложены модели многоэтапного процесса принятия решений, вероятностной модели задачи оптимума номинала и когнитивного моделирования сложных систем, которые объединены в единый комплекс. Приведен демонстрационный пример, состоящий из разработки когнитивной карты условной СОТС, функционирующей при наличии угроз внешней среды, моделирования сценариев функционирования на когнитивной карте при гипотетических изменениях управляющих и возмущающих воздействий на систему. Показано, что на определенных этапах принятия решений при вариациях критериальных оценок и управляющих воздействий возможно подавление угроз, возникающих перед системой, а также повышение ее эффективности. Имитационное моделирование производилось с помощью авторской программной системы СМЛС. Разрабатываемые математическое и программное обеспечение предназначены для интеллектуальных систем управления рациональным поведением сложных объектов.

Сложная организационная техническая система; вероятностная неопределенность; когнитивное моделирование; задача принятия решений; многокритериальность.

G.V. Gorelova

STATEMENT THE PROBLEM OF SIMULATION OF DECISION-MAKING PROCESSES IN COMPLEX ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEMS

The article considers the features of organizational - technical systems (SOTS), belonging to the class of complex. SOTS may include robotic complexes, automated production, electronic systems and devices used to transmit and convert information, etc. In the modern sense, SOTS are information and technical systems and are currently not only technical objects, they can also be classified as cyberphysical systems (CPS). The effectiveness of SOTS can be determined by many criteria, which should vary in content and time depending on the goals, stage of the existence of SOTS, the influence of internal and external environment. This determines the specificity of managerial decision-making processes in them, requiring preliminary simulation modeling, especially at the design stages of these systems. The general formulation of the simulation problem is given, based on the combination of three approaches to the solution: cognitive, multi-criteria and multi-stage, probabilistic uncertainty. Which are combined into a single complex. Models of a multi-stage decision-making process, a probabilistic model problem of the nominal optimum and cognitive modeling of complex systems are proposed. A demo example is presented, consisting of the development of a cognitive map of conditional SOTS, functioning in the presence of threats, mod-

* Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ № 18-05-80092.

eling of functioning scenarios on a cognitive map with hypothetical changes in control and disturbing influences on the system. It is shown that at certain stages of decision-making with variations of criteria-based assessments and control actions, it is possible to suppress threats to the system, as well as increase its effectiveness. Simulation was performed using the author's software system CMLS. The developed mathematical and software are designed for intelligent control systems for the rational behavior of complex objects.

Complex organizational-technical system; probabilistic uncertainty; cognitive modeling; decision making task; multi-criteria.

Введение. Сложные технические системы (СТС) всё более определяют существование современной цивилизации. К СТС относятся автоматизированные производства, радиоэлектронные системы устройства, служащие для передачи и преобразования информации, робототехнические комплексы – список современных СТС обширен. В теоретическом плане будем традиционно понимать СТС как систему, обладающую следующими основными признаками сложной системы [1, 2]: единства цели, целостности, эмергентности, иерархичности, реализуемости, сложности (структурной, динамической, вычислительной) функционирования из-за необходимости выполнения большого количества разнообразных функций большим количеством элементов и блоков системы; при этом изменение одной переменной влечет за собой изменение многих переменных, чаще всего нелинейным образом. Существенным признаком современной сложной технической системы является также ее способность осуществлять выработку решений и выбор из них лучшего из многих согласно заранее выработанным критериям. Автоматизация таких процессов принятия решений может реализовываться в интеллектуальных системах поддержки принятия решений (ИСППР), если среди решающих элементов сложной технической системы присутствует «руководитель» – лицо, оценивающее и принимающее на ряде этапов и иерархических уровнях СТС окончательное решение. В этом случае СТС может пониматься как сложная организационно-техническая система (СОТС), в которой ЛПР отражают конкретную реализацию принципа единоначалия и единства целей в СОТС, организуют систему в соответствии с целями и задачами, иницируя процессы управления. СОТС работает в широком диапазоне условий эксплуатации и при различных режимах, что обуславливает возможное неполное соответствие её структуры изменяющимся во времени целям системы, поэтому она должна обладать свойствами изменчивости во времени собственной структуры и выполняемых функций, учитывать возможность изменений вектора целей системы. В современном понимании СОТС являются информационно-техническими системами и в настоящее время уже не являются только техническими объектами, их можно классифицировать также как киберфизические системы (англ. cyber-physical system – CPS) [3, 4]. Используем различные элементы из существующих определений CPS, которыми обозначены важные для дальнейшего изложения признаки, и определим киберфизические системы как комплексные системы, состоящие из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, позволяющих представить такое образование как единое целое; в CPS обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами, компьютеры осуществляют мониторинг и оптимизацию управления физическими процессами с использованием такой петли обратной связи, в которой происходящее в физических системах и окружающей среде оказывает влияние на вычисления и наоборот.

Постановка задачи имитационного моделирования процессов принятия решений. Проектирование, эксплуатация, функционирование сложной технической системы ставят множество актуальных задач перед лицом, принимающим решения на всех этапах создания и существования СОТС. Эффективное их решение может определяться критериями, которые, полагаем, должны изменяться по содержанию и времени в зависимости от целей, этапа существования СОТС, влияния внутренней и внешней среды.

Рассматривая СОТС с вышеизложенных позиций, определим процессы принятия решений в них как многокритериальные [5–10] и многоэтапные процессы (рис. 1).

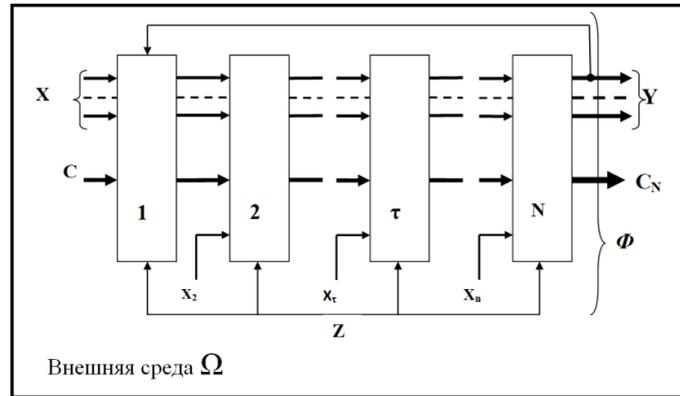


Рис. 1. Многоэтапный процесс принятия решений

На рис. 1:

X, Z, C – входные параметры; $X = \{X_\tau\}$, $X_\tau = \{x_i\}_\tau$, – контролируемые, управляемые переменные, $i=1,2,..n$; $Z = \{Z_\tau\}$, $\{Z_\tau\} = \{z_k\}_\tau$, $k=1,2,..K$ – контролируемые, неуправляемые переменные (возмущающие воздействия) внешней среды Ω ; $C = \{C_\tau\}$ – «полезность», «цена» результатов функционирования СОТС; $\tau = 1,2,..N$ – этапы процесса принятия решений.

Y, C_Y, Φ – выходные параметры; $Y = \{Y_\tau\}$, $Y = \{y_j\}_\tau$, $j = 1,2,..m$ – «показатели», «индикаторы», «критерии», «результаты» функционирования СОТС; C_Y – полезность результатов Y .

$\Phi = \{\Phi_\tau\}$ – функция эффективности, обобщающий показатель результатов функционирования СОТС, целевая функция для решения многокритериальной многоэтапной задачи принятия решений в процессе функционирования СОТС. В зависимости от ситуаций функционирования СОТС и ее конечного назначения, целевая функция может видоизменяться во времени, т.е. теоретически Φ можно рассматривать как $\Phi = \Phi(t)$. В зависимости от назначения и особенностей СОТС функция эффективности может быть как аддитивной, так и не аддитивной, последнее можно также считать признаком сложной системы при ее моделировании.

Представим функцию эффективности в следующем обобщенном виде, определяющем тип задачи принятия решений при ее конкретизации:

$$\Phi = \sum_{\tau=1}^N \Phi_\tau \text{ или } \Phi = \prod_{\tau=1}^N \Phi_\tau; \text{ или } \Phi(t) = \sum_{\tau=1}^N \Phi_\tau(t) \text{ или } \Phi(t) = \prod_{\tau=1}^N \Phi_\tau(t), \quad (1)$$

где $\Phi_\tau = F(C, X, Z, Y)_\tau$ или $\Phi_\tau = F(C, X, Y)_\tau | Z_\tau$

На функцию эффективности могут быть наложены ограничения (на взаимосвязь переменных, на их допустимую величину). Например, модель может иметь вид

$$\begin{aligned} \Phi &= \sum_{\tau=1}^N \Phi_\tau; & \Phi &= \sum_{\tau=1}^N F(C, X, Z, Y)_\tau \\ \sum_{i=1}^n a_i x_i &\leq b_i | \tau & & \\ X &\in X_{\text{дон}}; & Z &\in Z_{\text{дон}}; & Y &\in Y_{\text{дон}} \end{aligned} \quad (2)$$

В настоящее время существует большое количество подходов, моделей, методов, правил в задачах принятия решений.

Представим обобщенный вид многокритериальной модели задачи принятия решений (ЗПР) в следующем виде

$$ЗПР = \langle \Phi, A, P, ПП, S, \Phi^o \rangle \quad (3)$$

Φ – тип многокритериальной задачи, A – множество решений (альтернатив), P – система предпочтений ЛПП, $ПП$ – правила выбора решений; S – ситуации принятия решений, Φ^o – окончательное решение (наилучшее, «оптимальное»). Учитывая символику выражений (1) и (2), запишем:

$$ЗПР = \left\langle \sum_{\tau=1}^N F(C, X, Z, Y)_{\tau}, A, P, ПП, S, \sum_{\tau=1}^N F(X^o, Z, Y^o)_{\tau} \right\rangle. \quad (4)$$

Конкретное содержание и математический вид моделей (1)–(4) определяются предметной областью СОТС, соответствующей информационной базой (видом неопределенности – детерминированные, вероятностные, нечеткие задачи) и тем типом проблем (структурированные, слабоструктурированные, неструктурированные), которые характерны для конкретной СОТС при ее проектировании и функционировании.

В случае детерминированных задач (3) их решение (ПР) может быть найдено методами многоцелевого математического программирования (поиск экстремума функции), но для этого необходимо, чтобы и целевая функция, и ограничения на нее имели численное выражение и были известны заранее, что на практике часто нарушается. Для организационных СТС ЗПР может формулироваться как задача в условиях вероятностной неопределенности. В качестве целевой функции такой задачи может быть использована многомерная, дискретная по цене, обобщенная функция эффективности оптимума номинала φ , зависящая от времени t [11–16] – модель (5).

В модели (5) символы X, Y, Z, C, t имеют тот же смысл, что и в выражениях (1), (2). В данном случае альтернативы определяются наборами X ; $\vec{M}_{ht} = \eta(X, t)|_Z$ – моменты плотности распределения $f(Y)$; P_{YS} – вероятности попадания Y в области S пространства многомерного распределения:

$$\begin{aligned} P_{YS} &= \iint_{YS} \dots \int f(Y, \vec{M}_{ht})|_Z dY \\ \varphi_{\tau}(C, \vec{M}_h, X, Y, Z, t); C_{\tau}(X, Y, \vec{M}_{ht}); C &= \{c_s\}; s = 1, 2, \dots, n \\ X_{\tau} &= \{x_{s\tau}\}; Y = \{y_s\}; \vec{M}_{ht} = \{M_{ht}\}; \\ \varphi_{\tau}(C, \vec{M}_h, X, Y, Z, t) &= \sum_{s=1}^n c_s \iint_{YS} \dots \int f(Y, \vec{M}_{ht})|_Z dY \quad (5) \\ \begin{cases} \vec{M}_{ht} = \eta(X, t)|_Z, h = 1, 2, 3, 4 \\ X \in X_{don}, Y \in Y_{don} \end{cases} \end{aligned}$$

Для многоэтапной модели функция эффективности имеет вид

$$\Phi = \sum_{\tau=1}^N \varphi_{\tau}. \quad (6)$$

Как отмечалось, правила выбора решения, также как и модель функции эффективности, должны изменяться в зависимости от этапа исследования. Т.е. необходимо формализовать многоэтапный процесс принятия решений, учитывая, что он разворачивается на объекте (ОСТС), имеющем определенную структуру, функционирующую

в определенных условиях и при определенных управляющих и возмущающих воздействиях. Для этого предлагается представлять ОСТС в определенной внешней среде Ω в виде когнитивной карты, а результаты принятия решений на разных этапах τ представлять сценариями развития ситуаций на когнитивной модели. Воспользуемся в этих целях инструментарием когнитивного моделирования сложных систем [17–24], первым этапом которого является разработка модели сложной системы в виде когнитивной карты или более сложной когнитивной модели.

Как известно [17, 18, 22], когнитивная карта – это знаковый ориентированный граф

$$G = \langle V, E \rangle \quad (7)$$

в котором V – концепты, конечное множество вершин когнитивной карты G , $V_i \in V$, $i = 1, 2, \dots, k$, $E = \{e_{ij}\}$ – множество дуг e_{ij} графа, $i, j = 1, 2, \dots, m$.

Дальнейшие исследования сложной системы могут потребовать построения более сложной математически когнитивной модели, например, в виде параметрического векторного функционального графа

$$\Phi_{\Pi} = \langle \langle V, E \rangle, X, F, \theta \rangle, \quad (8)$$

где $G = \langle V, E \rangle$ – когнитивная карта, X – множество параметров вершин V ; $F = F(X, E) = f(x_i, x_j, e_{ij})$ – функциональные связи между вершинами, которые могут быть заданы функциями f_{ij} или весовыми коэффициентами w_{ij} ; θ – пространство параметров вершин. Если для построения когнитивной модели используются статистические данные или отношения между вершинами определены функциями, то векторный функциональный граф будет содержать «вероятностные» блоки и функциональные блоки, в том числе – динамические.

После разработки когнитивной модели производится анализ ее структурных свойств, устойчивости и ряда других особенностей, позволяющих судить о непротиворечии модели реальности, а также производится сценарное моделирование возможного развития ситуаций в системе [19, 23] с оценкой эффективности результатов для обоснования и выбора управленческих решений. Когнитивное моделирование сложных систем поддерживается авторской программной системой CMLS (Cognitive Modeling Large Systems) [23].

Проиллюстрируем постановку задачи на абстрактном простом вычислительном примере когнитивного моделирования.

Демонстрационный пример. Пусть СОТС состоит из четырех (в реальных системах их существенно больше) взаимодействующих объектов (вершины V_1, V_2, V_3, V_4), СОТС = {Объект №1, Объект №2, Объект №3, Объект №4}, целью (V_9) которой является эффективное противостояние возможным угрозам (V_5). Успешность действий каждого объекта оценивается несколькими критериями ($V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}$), свертка которых (V_6) определяет эффективность всей операции, в которой ЛПП (V_7) принимает решения, имея некоторые ресурсы (V_8) на их реализацию. На свертку критериев (функцию эффективности, как меру достижения цели) наложены ограничения (V_{14}, V_{15}). Соответствующая этим сведениям когнитивная карта G изображена на рис. 2.

На рис. 2 сплошными линиями изображены положительные дуги (увеличение/уменьшение сигнала в вершине V_i приводит к увеличению/уменьшению сигнала в V_j), пунктирными – отрицательные (увеличение/уменьшение сигнала в вершине V_i приводит к уменьшению/увеличению сигнала в V_j). Когнитивная карта G построена с помощью CMLS.

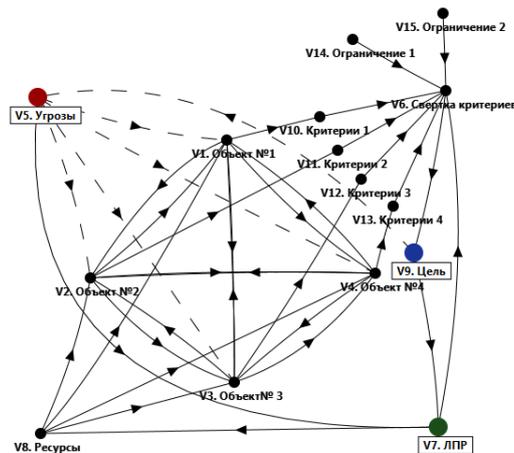


Рис. 2. Когнитивная карта G

Проведенное исследование когнитивной карты G включало анализ свойств графа, анализ его путей и циклов, анализ устойчивости, топологический анализ.

На рис. 3 изображены отрицательный цикл (стабилизирующий, нечетное число отрицательных дуг) и положительный цикл (акселератор процессов, четное число отрицательных дуг или их отсутствие) когнитивной карты. Всего циклов 214. Нечетное число (65) отрицательных циклов свидетельствует о структурной устойчивости системы [20–23].

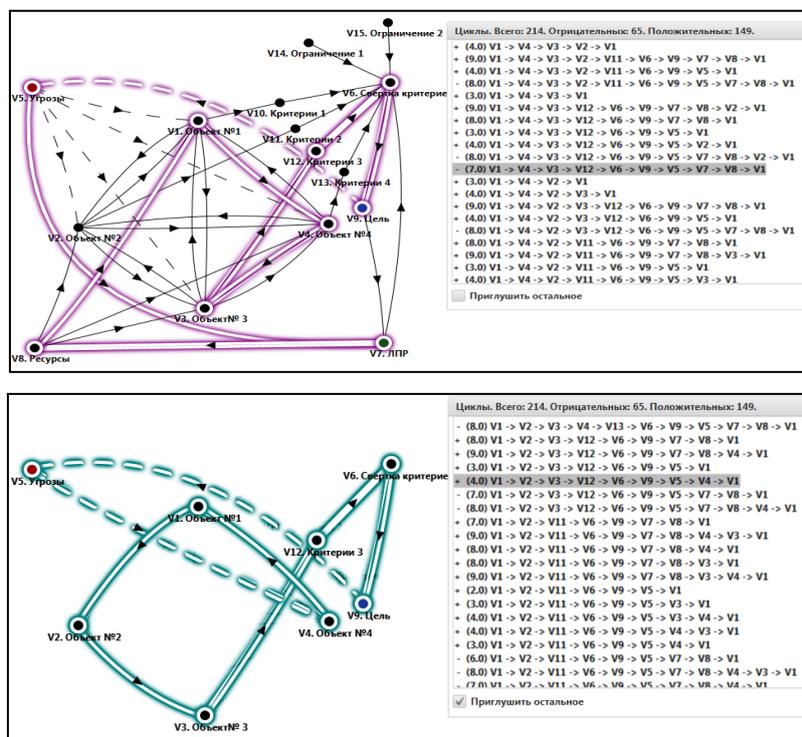


Рис. 3. Выделение циклов когнитивной карты G: один из 149 положительных циклов и один из 65 отрицательных

Исследование устойчивости когнитивной карты к возмущениям показал ее неустойчивость в этом смысле, поскольку максимальное по модулю число матрицы смежности когнитивной карты $|M| = 3,05 > 1$, то система G не устойчива к возмущениям [22].

Анализ циклов когнитивной карты (также, как и путей) позволяет проверить логическую непротиворечивость причинно-следственных связей, образующих цикл (или путь из вершины в вершину).

После анализа свойств когнитивной карты наступает следующий этап – сценарный анализ, проводимый методом импульсного моделирования возможных процессов развития ситуаций при воздействии на систему управляющих или возмущающих сигналов [19]. В табл. 1 и на рис. 4, 5 изображены результаты импульсного моделирования по двум сценариям.

Сценарий №1. Предположим, что возникают угрозы для СОТС, что имитируется внесением возмущающего импульса в вершину V_5 .

В табл. 1 приведены результаты вычислений с помощью CMLS значений импульсов в вершинах когнитивной карты. На рис. 4 изображена часть графиков импульсных процессов и гистограмма результатов на 6 шагах моделирования, построенных по данным табл. 1.

Как видно по расчетам, возникновение угроз может крайне негативно сказаться на системе – по всем критериям наблюдается ухудшение тенденций развития системы. Начиная с третьего и четвертого шагов моделирования, возникает серьезное падение эффективности системы и значение эффективности (свертка критериев, вершина V_6) существенно превышает допустимое по Ограничению 2 (вершина V_{15}) значение. Т.е. если на первых этапах принятия решений (1-й, 2-й, 3-й шаг моделирования) не предпринимать никаких действий, то в таких условиях СОТС может не выполнить свои функции.

Таблица 1

Результаты импульсного моделирования по Сценарию №1

Шаг Вершина	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
V1. Объект №1	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V2. Объект №2	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V3. Объект №3	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V4. Объект №4	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0	-9244.0
V5. Угрозы	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	4.0	16.0	47.0	148.0	440.0
V6. Свертка критериев	0.0	0.0	0.0	1.0	-3.0	-15.0	-46.0	-147.0	-439.0	-1322.0	-4052.0
V7. ЛПР	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	2.0	-3.0	-11.0	-30.0	-100.0	-291.0
V8. Ресурсы	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	2.0	-3.0	-11.0	-30.0	-100.0
V9. Цель	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-3.0	-15.0	-46.0	-147.0	-439.0	-1322.0
V10. Критерии 1	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V11. Критерии 2	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V12. Критерии 3	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V13. Критерии 4	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-12.0	-36.0	-107.0	-323.0	-988.0	-3022.0
V14. Ограничение 1	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
V15. Ограничение 2	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

Сценарий №2. Пусть ЛПР после анализа начала развития ситуаций задействует свои ресурсы и на 4-м шаге моделирования внесет управляющее воздействие в вершину V_8 (Ресурсы). Т.е. иницируем в когнитивной карте две вершины, сначала V_5 , потом на 4 шаге – V_8 . Часть результатов импульсного моделирования изображена на рис. 5. Угрозы могут быть подавлены.

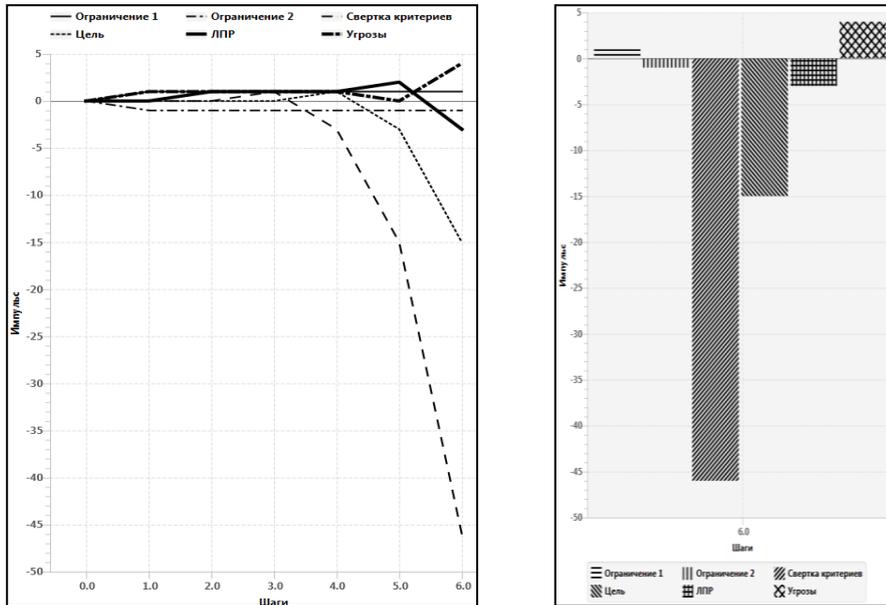


Рис. 4. Графики импульсных процессов в 6 вершинах, сценарий №1

В работах [14–16] представлен ряд результатов использования функции эффективности оптимума номинала в вариантах модели (5) в когнитивном моделировании сложных систем.

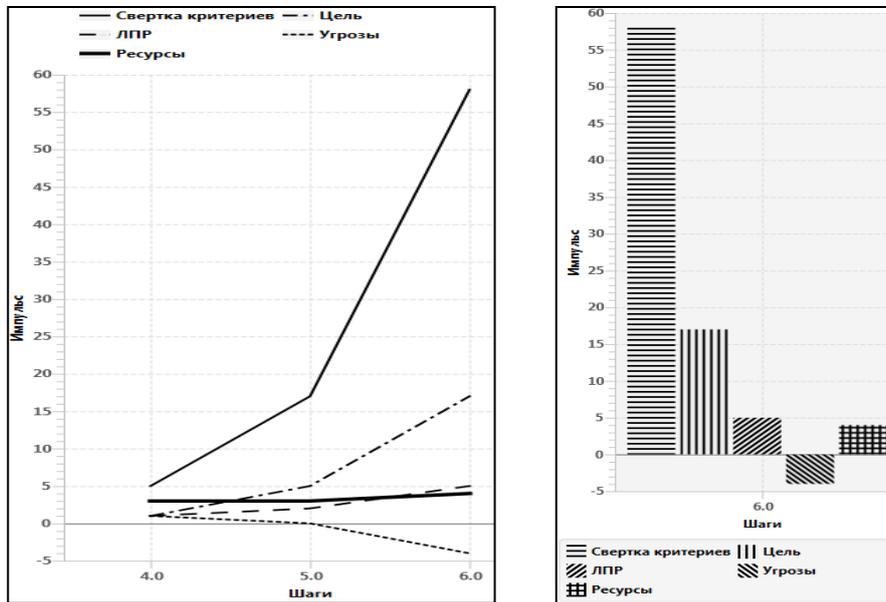


Рис. 5. Графики импульсных процессов в 6 вершинах, сценарий №2

Заключение. Процессы принятия решений в сложных организационных технических системах являются многоэтапными и многокритериальными. Для того, чтобы они были эффективными, необходимо использовать методы имитационного модели-

рования в целях предварительной разработки обоснованных управленческих решений и их оценки в условиях возможных изменений ситуаций внешней и внутренней среды ОСТС. В статье изложена в общем виде постановка задачи имитационного процесса принятия решений, в которой объединены три подхода: когнитивный, многокритериальный и вероятностной неопределенности. Упрощенный демонстрационный пример показывает возможность решения задачи в такой постановке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: учебник. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – 520 с.
2. Волкова В.Н. Эмерджентность, синергия или конвергенция? // Системный анализ в проектировании и управлении: Сб. научных трудов XXI Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 149-160.
3. Lee E.A. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. – URL: <https://citeweb.info/20150013436>.
4. Zhuge H. Cyber Physical Society, the 1st Workshop on Cyber Physical Society // in conjunction with the 6th International Conference on Semantics, Knowledge and Grids, Ningbo, China, 2010.
5. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 304 с.
6. Кини Р.П., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
7. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений. Метод достижимых целей. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
8. Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy: uchebnik. – Moscow: Exam, 2006. – 573 p.
9. Семенов С.С., Полтавский А.В., Маклаков А.В., Крянев А.В. Обзор методов принятия решений при разработке сложных технических систем // Функциональная надежность: теория и практика. – С. 72-84.
10. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: Научно-практическое издание. Серия “Информатизация России на пороге XXI века”. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
11. Svecharnik D.V. The problem of the optimum of the nominal // Proceedings of the Institute of mechanical engineering. – 1957. – No. 10. – P. 78-94.
12. Gorelova G.V., Zdor V.V., Svecharnik D.V. The method of optimum value and its application. – Moscow: Energy, 1970. – 200 p.
13. Gorelova G.V., Verba V.A. Decision making on cognitive models of complex systems // Proceedings International Scientific and Technical Conference "Intellectual and Multiprocessor Systems (IMS'2005)". – 2005. – Vol. 2. – P. 295-300.
14. Gorelova G.V., Buyanov B.S., Verba V.A. Formalization of probabilistic decision-making problems in intelligent systems based on a cognitive approach // *Iskusstvennyy intellekt – Artificial Intelligence*. – 2007. – P. 147-158.
15. Gorelova G.V. Decision adapted system for information network control // G-11A-Symposium, Bochum, DDR, 1996. – P. 121-126.
16. Горелова Г.В. Модели принятия решений при проектировании и управлении объектами в условиях вероятностной неопределенности / Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 177-188.
17. Avdeeva Zinaida K., Kovriga Svetlana V. On Governance Decision Support in the Area of Political Stability Using Cognitive Maps // 18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30. – 2018. – P. 498-503.
18. Abramova N., Portsev R. Reflexive Approach to Multi-Subject Situations in Cognitive Mapping // 18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30. – 2018. – P. 516-521.
19. Кульба В.В., Кононов Д.А., Ковалевский С.С., Косяченко С.А., Нижегородцев Р.М., Чернов И.В. Сценарный анализ динамики поведения социально-экономических систем: научное издание. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 122 с.

20. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems // 18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability. (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30. – 2018. – P. 145-149.
21. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Strategy of complex systems development based on the synthesis of foresight and cognitive modelling methodologies // Proceedings. IEEE 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing. SAIC 2018.
22. Инновационное развитие социо-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования: коллективная монография / под ред. Гореловой Г.В., Панкратовой Н.Д. – Киев: Изд-во «Наукова Думка», 2015. – 464 с.
23. Программа для когнитивного моделирования и анализа социально-экономических систем регионального уровня. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018661506 от 07.09.2018.

REFERENCES

1. Volkova V.N., Denisov A.A. Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza: uchebnik [Fundamentals of systems theory and systems analysis: textbook]. Saint Petersburg: SPbGPU, 2005, 520 p.
2. Volkova V.N. Emerzhnennost', sinerhiya ili konvergentsiya? [Emergence, synergy or convergence?], Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii: Sb. nauchnykh trudov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [System analysis in design and management: a collection of scientific papers of the XXI International scientific and practical conference], 2016, pp. 149-160.
3. Lee E.A. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. Available at: <https://citeweb.info/20150013436>.
4. Zhuge H. Cyber Physical Society," the 1st Workshop on Cyber Physical Society, in conjunction with the 6th International Conference on Semantics, Knowledge and Grids, Ningbo, China, 2010.
5. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. Sistemnyy analiz strategicheskikh resheniy v innovatsii. Matematicheskie, evristicheskie i intellektual'nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovatsiy [System analysis of strategic decisions in innovation. Mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and synthesis of innovations]. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013, 304 p.
6. Kini R.P., Rayfa Kh. Prinyaie resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya [Decision making under many criteria: preferences and substitutions]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 560 p.
7. Lotov A.V., Pospelova I.I. Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya resheniy. Metod dostizhimykh tseley [Multi-criteria decision making tasks. Achievable Goals Method]. Moscow: MAKS Press, 2008, 197 p.
8. Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy: uchebnik. Moscow: Exam, 2006, 573 p.
9. Semenov S.S., Poltavskiy A.V., Maklakov A.V., Kryanev A.V. Obzor metodov prinyatiya resheniy pri razrabotke slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Overview of decision-making methods in the development of complex technical systems], *Funktsional'naya nadezhnost': teoriya i praktika* [Functional reliability: theory and practice], pp. 72-84.
10. Trakhtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy: Nauchno-prakticheskoe izdanie. Seriya "Informatizatsiya Rossii na poroge XXI veka" [Computer decision support: Scientific and practical publication. Series "Informatization of Russia on the threshold of the 21st century"]. Moscow: SINTEG, 1998, 376 p.
11. Svecharnik D.V. The problem of the optimum of the nominal, *Proceedings of the Institute of mechanical engineering* 1957, No. 10, pp. 78-94.
12. Gorelova G.V., 3dor V.V., Svecharnik D.V. The method of optimum value and its application. Moscow: Energy, 1970, 200 p.
13. Gorelova G.V., Verba V.A. Decision making on cognitive models of complex systems, *Proceedings International Scientific and Technical Conference "Intellectual and Multiprocessor Systems (IMS'2005)*, 2005, Vol. 2, pp. 295-300.
14. Gorelova G.V., Buyanov B.S., Verba V.A. Formalization of probabilistic decision-making problems in intelligent systems based on a cognitive approach, *Iskusstvennyy intellekt – Artificial Intelligence*, 2007, pp. 147-158.

15. Gorelova G.V. Decision adapted system for information network control, *G-11A-Symposium, Bochum, DDR, 1996*, pp. 121-126.
16. Gorelova G.V. Modeli prinyatiya resheniy pri proektirovani i upravlenii ob'ektami v usloviyakh veroyatnostnoy neopredelennosti [Decision-making models in the design and management of facilities in conditions of probabilistic uncertainty], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 177-188.
17. Avdeeva Zinaida K., Kovriga Svetlana V. On Governance Decision Support in the Area of Political Stability Using Cognitive Maps, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 498-503.
18. Abramova N., Portsev R. Reflexive Approach to Multi-Subject Situations in Cognitive Mapping, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 516-521.
19. Kul'ba V.V., Kononov D.A., Kovalevskiy S.S., Kosyachenko S.A., Nizhegorodtsev R.M., Chernov I.V. Stsenarnyy analiz dinamiki povedeniya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem: nauchnoe izdanie [Scenario analysis of the dynamics of behavior of socio-economic systems: scientific publication]. Moscow: IPU RAN, 2002, 122 p.
20. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems, *18 th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability. (TECIS2018) IFAC Papers OnLine 51-30*, 2018, pp. 145-149.
21. Gorelova G.V., Pankratova N.D. Strategy of complex systems development based on the synthesis of foresight and cognitive modelling methodologies, *Proceedings. IEEE 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing. SAIC 2018*.
22. Innovatsionnoe razvitie sotsio-ekonomicheskikh sistem na osnove metodologiy predvideniya i kognitivnogo modelirovaniya: kollektivnaya monografiya [Innovative development of socio-economic systems based on foresight and cognitive modeling methodologies: collective monograph], ed. by Gorelovoy G.V., Pankratovoy N.D. Kiev: Izd-vo «Naukova Dumka», 2015, 464 p.
23. Programma dlya kognitivnogo modelirovaniya i analiza sotsial'no-ekonomicheskikh sistem regional'nogo urovnya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2018661506 ot 07.09.2018 [A program for cognitive modeling and analysis of socio-economic systems at the regional level. Certificate of state registration of computer programs No. 2018661506 of 09/07/2018].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Горелова Галина Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: gorelova-37@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89281684458; д.т.н.; профессор.

Gorelova Galina Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: gorelova-37@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79281684458; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 629.365

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-144-155

В.А. Горелов, И.В. Рубцов, А.А. Стадухин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВИЖНОСТИ МОБИЛЬНЫХ РОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обосновывается необходимость применения имитационного компьютерного моделирования для дальнейшего совершенствования подвижности мобильных робототехнических комплексов. Рассматривается такое направление работ, как исследование шасси с адаптируемой конфигурацией гусеничного обвода с применением программного комплекса автоматизированного анализа динамики систем тел. Данный подход позиционируется как наиболее подходящий для оценки профильной проходимости и выбора потребных характеристик приводов машин с нетрадиционным движителем. Также в статье рассмотрены достижения МГТУ им. Н.Э. Баумана по созданию комплекса натурно-математического