

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236
УДК 621.396.6.07.019.3



Научная статья | Информатика, вычислительная техника и управление

ПРИМЕНЕНИЕ СЦЕНАРНОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ И УПРАВЛЕНИЮ РИСКАМИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

П.В. Калашиников

Введение. В работе приводится описание сценарного подхода к управлению рисками при функционировании сложных технических систем в условиях неопределенности. Под сценарием понимается оптимальное управляющее воздействие на параметры системы, позволяющее минимизировать возможные затраты, связанные с реализацией соответствующего рисковог о события.

Целью исследования является разработка эффективных методов управления рисками при функционировании сложной динамической системы в условиях неопределенности на основе сценарного подхода, позволяющего реализовать оптимальное управляющее воздействие на параметры объекта в случае угрозы возникновения аварийной ситуации.

Материалы и методы. В статье дается описание применения метода сценариев к управлению рисками, возникающими в ходе функционирования сложной динамической системы в условиях интервальной неопределенности. Данный подход основан на применении методов интервального анализа и теории ситуационного управления.

Научная новизна реализуемого подхода состоит в использовании аппарата интервального анализа, позволяющего наиболее корректно учитывать имеющие место возможные погрешности,

связанные с измерением значений параметров системы и применять оптимальные управляющие воздействия необходимые для корректировки в случае выхода допустимых показателей за пределы области работоспособности.

Обсуждение и заключение. Разработанная в ходе выполненного исследования математическая модель управления рисками в ходе процесса функционирования сложной технической системы в условиях интервальной неопределенности на основе сценарного подхода позволяет осуществлять отбор оптимальных управляющих воздействий (сценариев), позволяющих минимизировать возможные погрешности и неточности, возникающие в связи с отклонением от расчетных номинальных значений.

Ключевые слова: управление рисками; интервальная неопределенность; сложная техническая система; метод сценариев

Для цитирования. Калашников П.В. Применение сценарного подхода к анализу и управлению рисками при функционировании сложных динамических систем в условиях интервальной неопределенности // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 3. С. 224-236. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236

Original article | Informatics, Computer Science and Management

APPLICATION OF THE SCENARIO APPROACH TO THE ANALYSIS AND CONTROL OF RISKS IN THE OPERATION OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF INTERVAL UNCERTAINTY

P.V. Kalashnikov

Introduction. The paper provides a description of the scenario approach to risk control in the operation of complex technical systems under conditions of uncertainty. The scenario is understood as the

optimal control action on the system parameters, which allows minimizing the possible costs associated with the implementation of the corresponding risk event.

The aim of the study is to develop effective risk management methods for the operation of a complex dynamic system under conditions of uncertainty based on a scenario approach that makes it possible to implement the optimal control action on the parameters of an object in the event of a threat of an emergency.

Materials and methods. The article describes the application of the scenario method to the management of risks that arise during the operation of a complex dynamic system under conditions of interval uncertainty. This approach is based on the application of methods of interval analysis and the theory of situational management.

The scientific novelty of the implemented approach lies in the use of the interval analysis apparatus, which makes it possible to most correctly take into account the possible errors associated with measuring the values of the system parameters and apply the optimal control actions necessary for correction in the event that the permissible indicators go beyond the operability area.

Discussion and conclusion. The mathematical model of risk control developed in the course of the study carried out during the process of functioning of a complex technical system under conditions of interval uncertainty based on the scenario approach allows the selection of optimal control actions (scenarios) that allow minimizing possible errors and inaccuracies that arise due to deviation from the calculated nominal values.

Keywords: risk management; interval uncertainty; complex technical system; scenario method

For citation. Kalashnikov P.V. Application of the Scenario Approach to the Analysis and Control of Risks in the Operation of Complex Dynamic Systems under Conditions of Interval Uncertainty. *International Journal of Advanced Studies*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 224-236. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236

Введение

Функционирование сложных динамических систем в различных областях техники и экономики связано с наличием нестандартных ситуаций, аварий, отказов, а также нарушением нормальной работы отдельных организационных структур, отраслей производства, что в свою очередь причиняет ущерб народному хозяйству и населению. Основные подходы к теории риска в технических системах описаны в работах [1-6].

Управление рисками при функционировании сложных динамических систем в условиях неопределенности и неполноты информации требует комплексного системного подхода, ориентированного на учет множества возможных вариантов отклонения значений ее параметров от расчетных номинальных значений и реализации необходимого управляющего воздействия (сценария), направленного на коррекцию поведения системы.

Разработка сценариев включает в себя ряд следующих этапов:

- 1) Анализ внутренней структуры и параметров системы.
- 2) Взаимодействие системы и среды. Анализ внешних факторов, влияющих на систему.
- 3) Отбор параметров системы, на которые предполагается оказывать корректирующее управляющее воздействие в условиях неопределенности.

Разработка сценариев направлена в первую очередь на генерацию и упорядочение множества альтернатив управляющих воздействий на параметры системы, обеспечивающих ее функционирование в соответствии с заданными целями в пределах области работоспособности. Основные подходы к управлению рисками на основе сценарного подхода описаны в работах [7-13].

Математическая модель управления рисками на основе сценарного подхода

В дальнейшем, если не оговорено противное под сценарием будем понимать управляющее воздействие на любое конкретное

состояние системы. Разработанные сценарии собираются в единый каталог и применяются в зависимости от степени отклонения значений параметров системы от расчетных номинальных значений в различные моменты времени.

Введем следующие основные понятия и обозначения.

Состояние управляемого объекта описывается интервальным вектором вида

$$k=(s_1, s_2, \dots, s_L), \quad (1)$$

где

s_j – значение параметра состояния системы № j ;

$$\underline{s}_j \leq s_j \leq \overline{s}_j \quad (2)$$

$\underline{s}_j, \overline{s}_j$ – левый и правый конец заданного интервала;

L – размерность пространства состояний для рассматриваемого управляемого объекта

Множество состояний Z управляемого объекта представляет собой кортеж интервальных векторов Z следующего вида

$$Z=(k_1, \dots, k_N), N > 0 \quad (3)$$

где

N – общее количество возможных состояний

Состояние № n задается в форме интервального вектора следующего вида

$$k_n=(\underline{s}_{n1}, \overline{s}_{n1}, \underline{s}_{n2}, \overline{s}_{n2}, \dots, \underline{s}_{nL}, \overline{s}_{nL}) \quad (4)$$

где

$\underline{s}_{ni}, \overline{s}_{ni}$ – левый и правый концы соответствующих интервалов.
 $i=1 \dots L$

Состояние управляемого объекта в момент времени t_i имеет вид

$$k(t_i)=(s_1(t_i), (s_2(t_i), \dots, (s_L(t_i)), i=0, 1, \dots \quad (5)$$

Состояние управляемого объекта № m в момент времени t_i имеет вид интервального вектора следующего вида

$$k_m(t_i) = (\underline{s}_{m1}, \overline{s}_{m1}, \underline{s}_{m2}, \overline{s}_{m2}, \dots, (\underline{s}_{mL}, \overline{s}_{mL}), k_m(t_i) \in Z \quad (6)$$

$\underline{s}_{mi}, \overline{s}_{mi}$ – левый и правый концы соответствующих интервалов. $i=1 \dots L$

Вектор управляющих воздействий u имеет вид

$$u=(e_1, \dots, e_L) \quad (7)$$

Управление в момент t_l задается интервальным вектором вида

$$u(t_l)=(e_1(t_l), e_2(t_l), \dots, e_L(t_l)) \quad (8)$$

Управление № j в момент времени t_l имеет вид

$$u_j(t_l) = ([\underline{e_{j1}}(t_l), \overline{e_{j1}}(t_l)], [\underline{e_{j2}}(t_l), \overline{e_{j2}}(t_l)], \dots, [\underline{e_{jL}}(t_l), \overline{e_{jL}}(t_l)]), \quad (9)$$

$\underline{e_{ji}}(t_l)$, $\overline{e_{ji}}(t_l)$ – левый и правый концы интервала значений параметра управления № i в момент времени t_l

Обозначим через U – множество всех управляющих воздействий.

Данное множество имеет вид

$$U=\{u_1, \dots, u_M\} \quad (10)$$

Для любого момента времени $t_l, l=0, 1, 2, \dots$ расстояние между двумя состояниями $k_m(t_l) \in Z$ и $k_n(t_l) \in Z$ ($m \neq n$, $m, n = 1, N$) определяется по формуле

$$\text{dist}(k_m(t_l), k_n(t_l)) = (\text{dist}(k_{m1}(t_l), k_{n1}(t_l)), \dots, \text{dist}(k_{mL}(t_l), k_{nL}(t_l))) \quad (11)$$

dist – расстояние между интервалами, определяемое в соответствии с [14, 15].

Для любого момента времени $t_l, l=0, 1, 2, \dots$ расстояние между двумя управлениями $u_j(t_l) \in U$ и $u_m(t_l) \in U$ ($j \neq m$, $j, m = 1, N$) определяется по формуле

$$\text{dist}(u_j(t_l), u_m(t_l)) = (\text{dist}(u_{j1}(t_l), u_{m1}(t_l)), \dots, \text{dist}(u_{jL}(t_l), u_{mL}(t_l))) \quad (12)$$

Процесс изменения состояния управляемого объекта описывается с помощью функции W , следующим образом

$$k(t_{l+1})=W(k(t_l), u(t_l), t_l), \quad k(t_{l+1}) \in Z, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

Оптимальным управлением для объекта в состоянии $k(t_l) \in Z$ называется управление $\hat{u}(t_l)=\hat{u}(k(t_l))$, которое доставляет оптимум функции эффективности G следующего вида

$$G(u^*(t_l), k(t_{l-1}), t_l) \leq G(u_j(t_l), k(t_{l-1}), k(t_l), t_l), \quad \forall j = \overline{1, M} \quad (14)$$

Под сценарием понимается оптимальное управляющее воздействие $u^*(t_l)$ для объекта находящегося в состоянии $k(t_l)$ в момент времени t_l , применяемое на протяжении всего шага управления.

Особенность сценарного подхода к управлению рисками заключается в создании базового каталога сценариев, применяемого в зависимости от конкретного состояния объекта управления для минимизации возможного ущерба, связанного с рисками возникновения нештатных ситуаций и аварий.

Реализация метода сценариев

Для реализации метода сценариев рассмотрим множество Z_0 , содержащее P состояний из множества Z .

Множество Z_0 , имеет следующий вид

$$Z_0 = (k_{01}, \dots, k_{0P}) \quad (15)$$

Вектор базового состояния k_{0i} объекта № i

$$k_{0i} = ([\underline{s_{0i1}}, \overline{s_{0i1}}], [\underline{s_{0i2}}, \overline{s_{0i2}}], \dots, [\underline{s_{0iL}}, \overline{s_{0iL}}]) \quad (16)$$

где

$\underline{s_{0i1}}, \underline{s_{0i2}}, \underline{s_{0iL}}, \overline{s_{0i1}}, \overline{s_{0i2}}, \overline{s_{0iL}}$ – левый и правый концы для соответствующего интервала значений для параметров состояния рассматриваемого объекта.

$$k_{0i} \in Z, i=1 \dots P, P < N$$

Множеству $Z_0 \in Z$ соответствует множество управлений U_0 , применяемых для различных вариантов состояния рассматриваемой технической системы.

Множество U_0 имеет вид

$$U_0 = \{u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0M_0}\}, N \leq M_0 < M \quad (17)$$

Элементы данного множества имеют вид

$$u_{0i} = ([\underline{e_{0i1}}, \overline{e_{0i1}}], [\underline{e_{0i2}}, \overline{e_{0i2}}], \dots, [\underline{e_{0iL}}, \overline{e_{0iL}}]) \quad (18)$$

где

$\underline{e_{0ij}}, \overline{e_{0ij}}$ – левый и правый концы интервала изменений значений параметра управления № j .

Набор оптимальных управляющих воздействий имеет вид

$$u_0^* = (u_0^*(k_{01}), u_0^*(k_{02}), \dots, u_0^*(k_{0N})) \quad (19)$$

В зависимости от состояния объекта применяется необходимое управляющее воздействие, направленное на поддержание значений параметров объекта в пределах области работо-

способности и уменьшении риска возникновения нештатной ситуации.

Изменение состояния объекта в момент времени $t+1$ по сравнению с предшествующим периодом задается с использованием соотношения

$$k_0(t_{l+1})=W(k_0(t_l), u_0(k_0(t_l)), t_l) \quad (20)$$

$$k_0(t_l) \in Z_0, k_0(t_{l+1}) \in Z_0, k=0, n \quad (21)$$

Применение метода сценариев для управления рисками на практике требует решения следующих задач

- 1) Формирование конечного множества базовых состояний объекта управления $Z_0 = (k_{01}, k_{02}, \dots, k_{0P})$ путем кластеризации пространства исходных состояний. Каждый объект входит в какой-либо кластер. Состояние объекта при решении задачи управления заменяется на состояние соответствующего ему кластера.
- 2) Поиск оптимального управления для любого базового состояния Z_0 из множества и формирование множества $U_0^* = (u_0^*(k_{01}), u_0^*(k_{02}), \dots, u_0^*(k_{0N}))$. К всем объектам кластера применяется одно и то же оптимальное управление.

Кластеризация пространства состояний

Множество состояний объекта управления разбивается на ряд укрупненных формирований кластеров, каждому из которых ставится в соответствие одно базовое состояние.

Множество состояний $Z = (k_1, k_2, \dots, k_N)$ разбивается на P подмножеств $Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0P}$, для которых выполнено соотношение

$$Z = \bigcup_{i=1}^P Z_{0i}, Z_{0m} \cap Z_{0n} = \emptyset, m \neq n \quad (22)$$

Любому подмножеству Z_{0j} ставится в соответствие базовое состояние $k_{0j} = k_j, k_{0j} \in Z_{0j}$.

Любое состояние из множества базовых состояний Z_0 должно быть одним из состояний исходного множества Z . Ко всем объек-

там, входящим в кластер применяется одно и то же оптимальное управление, соответствующее этому состоянию.

Обсуждение и заключение

Выбор соответствующего сценария в форме управляющего воздействия из заранее разработанного каталога позволяет минимизировать возможные риски и проблемы, связанные с нарушением нормального функционирования.

Кластеризация пространства состояний позволяет упростить задачу поиска оптимальных управляющих воздействий, сведя к минимуму потери, связанные с реализацией соответствующего рискового события.

Реализация указанного подхода позволяет реализовать эффективную модель управления рисками при функционировании сложных технических систем в условиях неопределенности путем выбора оптимального варианта сценария (управляющего воздействия на параметры системы), дающего возможность минимизировать затраты на реализацию соответствующих систем управления рисками.

Список литературы

1. Острейковский, В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели: моногр. / В. А. Острейковский ; Сургут. гос. ун-т ХМАО-Югр. – Сургут : КЦ СурГУ, 2013. – 320 с.
2. Острейковский, В. А. Количественная оценка риска в теории техногенной безопасности сложных динамических систем / В. А. Острейковский, // Итоги науки. Т.1. Избранные труды международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – М. : РАН, 2013. – Гл. 2. – С. 12–31.
3. Муравьев, И. И. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 24–27.

4. Королев В.Ю. Математические основы теории риска: Учеб. Пособ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544 с.
5. Острейковский В.А. О некоторых классах моделей риска в теории техногенной безопасности // Надежность и качество. Тр. Междунар. Симпозиума: в 2 т. / под ред. Н.К.Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 1 т. – с.46 – 49.
6. Калашников П.В. Математическая модель управления рисками, возникающими при функционировании сложных технических систем ответственного назначения в условиях неопределенности информации о значениях параметров и фазовом состоянии // International Journal of Advanced Studies, 2022. том 12, № 3. С 22-39.
7. Маркелов, Г. Я. Метод сценариев при управлении в реальном времени. / Г. Я. Маркелов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. - СПб., 2013. - № 5 (181). - с. 23-27.
8. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Моисеев. - 2-е изд. - М.: URSS, 2012. - 488 с.
9. Николаев, В. И. Системотехника: методы и приложения / В. И. Николаев, В. М. Брук. - Л.: Машиностроение, 1985. - 199 с.
10. Перегудов Ф. И. Введение в системный анализ : учеб. пособие / Ф. И. Перегудов, Ф. Тарасенко. - М. : Высш. шк., 1989. - 368 с. 82. Петров Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю. П. Петров. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергия, 1977. - 280 с
11. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. - М. : Наука, 1986. - 288 с.
12. Berkhin, P. Survey of Clustering Data Mining Techniques / P. Berkhin // Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering / J. Kogan, C. Nicholas, M. Teboulle. - Berlin : Springer, 2006. - P. 25-71.
13. Jain, A. K. Data Clustering: A Review / A. K Jain, M. N. Murty, P. J. Flynn // ACM Computing Surveys. - 1999. - Vol. 31, N 3. - P. 264-323.
14. Kerner, B. S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory / B. S. Kerner. - Berlin: Springer, 2009. - 265 p.

15. Kerner, B. S. The Physics of Traffic. Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory / B. S. Kerner. - Berlin : Springer, 2004. - 682 p.
16. Шарый, С.П. Конечномерный интервальный анализ / С.П. Шарый. – Новосибирск.: XYZ, 2018. – 623 с.
17. Добровец, Б.С. Интервальная математика / /Б.С. Добровец. – Красноярск: Издательский центр Красноярского государственного университета, 2004. – 219 с.

References

1. Ostreykovskiy V. A. *Teoriya tekhnogenogo riska: matematicheskie metody i modeli* [Theory of technogenic risk: mathematical methods and models]: monograph. Surgut: KTs Surgu, 2013. 320 p.
2. Ostreykovskiy V. A. Kolichestvennaya otsenka riska v teorii tekhnogennoy bezopasnosti slozhnykh dinamicheskikh sistem [Quantitative risk assessment in the theory of technogenic safety of complex dynamic systems]. *Itogi nauki. V.1. Selected Proceedings of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science*. M.: RAN, 2013. Part 2. P. 12-31.
3. Murav'ev I. I. Modeli otsenki faktora vremeni v teorii tekhnogenogo riska dinamicheskikh sistem [Models for assessing the time factor in the theory of technogenic risk of dynamic systems] / I. I. Muravyov, V. A. Ostreykovskiy, E. N. Shevchenko. *Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015. Vol. 1. P. 24–27.
4. Korolev V.Yu. *Matematicheskie osnovy teorii riska* [Mathematical foundations of risk theory]: Proc. Benefit. M.: FIZMATLIT, 2007. 544 p.
5. Ostreykovskiy V.A. O nekotorykh klassakh modeley riska v teorii tekhnogennoy bezopasnosti [On some classes of risk models in the theory of technogenic safety]. *Reliability and quality. Tr. International Symposium: in 2 volumes* / ed. N.K. Yurkova. - Penza: PSU Publishing House, 2013. Vol. 1. P. 46-49.
6. Kalashnikov P.V. Matematicheskaya model' upravleniya riskami, vznikayushchimi pri funktsionirovanii slozhnykh tekhnicheskikh

- sistem otvetstvennogo naznacheniya v usloviyakh neopredelennosti informatsii o znacheniyakh parametrov i fazovom sostoyanii [Mathematical model of risk management arising from the operation of complex technical systems for responsible purposes under conditions of uncertainty of information about the values of parameters and the phase state]. *International Journal of Advanced Studies*, 2022. Volume 12, No. 3. P 22-39.
7. Markelov G. Ya. Metod stsensariiev pri upravlenii v real'nom vremeni [Scenario method for real-time control]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer science. Telecommunications. Control*. St. Petersburg, 2013. No. 5 (181). P. 23-27.
 8. Moiseev, N. N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]: textbook. allowance for universities. M. : URSS, 2012. 488 p.
 9. Nikolaev V. I. *Sistemotekhnika: metody i prilozheniya* [System engineering: methods and applications] / V. I. Nikolaev, V. M. Bruk. L.: Mashinostroenie, 1985. 199 p.
 10. Peregudov F. I. *Vvedenie v sistemnyy analiz* [Introduction to system analysis] / F. I. Peregudov, F. Tarasenko. M.: Higher school, 1989. 368 p.
 11. Pospelov D. A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika* [Situational management: theory and practice]. M.: Nauka, 1986. 288 p.
 12. Berkhin P. Survey of Clustering Data Mining Techniques. *Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering* / J. Kogan, C. Nicholas, M. Teboulle. Berlin: Springer, 2006. P. 25-71.
 13. Jain A. K. Data Clustering: A Review / A. K. Jain, M. N. Murty, P. J. Flynn. *ACM Computing Surveys*. 1999. Vol. 31, N 3. P. 264-323.
 14. Kerner B. S. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Berlin: Springer, 2009. 265 p.
 15. Kerner B. S. *The Physics of Traffic. Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory*. Berlin : Springer, 2004. 682 p.
 16. Sharyy S. P. *Konechnomernyy interval'nyy analiz* [Finite-dimensional interval analysis]. Novosibirsk: XYZ, 2018. 623 p.

17. Dobrovets B.S. *Interval'naya matematika* [Interval mathematics]. Krasnoyarsk: Publishing Center of the Krasnoyarsk State University, 2004. 219 p.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Калашников Павел Викторович, младший научный сотрудник
Федеральное государственное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. Kalashnikov, junior researcher
Institute for Automation and Control processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-5424-1635>

Поступила 09.07.2023

После рецензирования 25.07.2023

Принята 10.08.2023

Received 09.07.2023

Revised 25.07.2023

Accepted 10.08.2023