
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 19.8, 004.942
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

С. Н. МАСАЕВ

*Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия
E-mail: faberi@list.ru*

Исследуется проблема формализации контура децентрализованного управления сложными многомерными объектами с использованием различных методов. Рассмотрен многомерный объект как динамическая система с дискретным временем. Формализованы: пространства (состояния объекта, управляющих воздействий, целей, наблюдаемых значений, аналитических оценок). Рассчитаны аналитические оценки через интегральные показатели. Выполнен расчет интегральных показателей с выбираемой глубиной анализа временных рядов для каждого из исследованных шестнадцати режимов управления. Для этих режимов сформировано оптимальное поле при выборе оптимального управления. Формализация сложного многомерного объекта позволяет перейти от общего представления системы к ее подсистемам. Приведены методы и задачи, которые возможно решить после предлагаемой формализации объекта: фильтр Калмана, нейросетевой прогноз, рекуррентное уравнение, балансы.

Ключевые слова: теория управления, динамическая система, интегральные показатели, режим, глубина анализа

Введение. Существуют сложные многомерные объекты [1], управление которыми выполняется децентрализованно из независимых центров принятия решений. Проблемой также является то, что планирование деятельности центрами принятия решений не формализовано по классическим требованиям теории управления и на разных объектах происходит по-разному. В этой связи цель настоящей статьи — формализация объекта с децентрализованным управлением в виде динамической системы с дискретным временем и выбираемой концепцией построения структуры управления.

Под концепцией построения структуры управления подразумевается набор режимов управления, где каждый режим имеет свое описание наблюдаемых, анализируемых и управляемых показателей.

Методика исследования. Рассмотрим систему

$$S = \{T, X, U, Y, J, V, \varphi, \psi, \xi\}, \quad (1)$$

где

ξ — сигналы внешней среды;

$T = \{t / t = 0, 1, 2, \dots\}$ — дискретное множество моментов времени (моменты учета показателей системы);

X — фазовое пространство системы, $x(t) = [x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t)]^T \in X$ — n -вектор фазовых переменных, определяющих состояние системы, а $x^*(t) = [x^{*1}(t), x^{*2}(t), \dots, x^{*n}(t)]^T \in X^*$ — n -вектор фазовых переменных, определяющих требования к состоянию системы при распределении ресурсов посредством экспертизы или по методу Беллмана [2]; в качестве фазовых переменных системы $x^n(t)$ выступают показатели поступления или расхода ресурсов, вектор n включает в себя положительные и отрицательные последовательности, которые характеризуют поступление и расход ресурса системой (в условных единицах);

U — пространство управления системой, $u(t) = [u^1(t), u^2(t), \dots, u^m(t)]^T \in U$ — m -вектор управления;

Y — пространство наблюдаемых параметров при оперативном учете показателей системы, $y(t) = [y^1(t), y^2(t), \dots, y^q(t)]^T \in Y$ — q -вектор параметров оперативного учета;

J — пространство целей управления, $J(t) = [j^1(t), j^2(t), \dots, j^c(t)]^T \in J$ — c -вектор целевой работы системы при оперативном управлении;

$V = v^+ \cup v^-$ — пространство аналитических оценок, $V(t) = [v^1(t), v^2(t), \dots, v^s(t)]^T \in V$ — s -вектор аналитических оценок;

$\varphi: T \times X \times U \rightarrow X$ — переходные функции системы, которые можно представить как

$$x(t+1) = \varphi(x_0(t), x(t), u(t)),$$

где $x_0 = x(0)$;

$\psi: T \times X \rightarrow Y$ — функция наблюдения, определяющая параметры, доступные для наблюдения:

$$y(t) = \psi(x(t));$$

$v^-: T \times X \rightarrow V^-$ — функция анализа деятельности системы в прошлые периоды времени:

$$v^-(t) = \xi^-(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-k)),$$

где k — параметр глубины анализа, регулирующий количество состояний фазовой переменной: если $k=2$, то фазовая переменная анализируется по двум точкам наблюдения, если $k=8$, то по восьми точкам; выбор подходящего параметра k для анализа подробно рассмотрен в работе [3];

$v^+: T \times X^* \rightarrow V^+$ — функция анализа деятельности системы в будущие моменты времени:

$$v^+(t) = \xi^+(x_0(t+1), x_0(t+2), \dots, x_0(t+k)).$$

Управление $\varphi(x_0, x(t), u(t))$ можно задать векторным уравнением

$$x(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + \xi(t), \quad (2)$$

где $A(t)$ — $n \times n$ -матрица, определяющая внутреннюю структуру системы; $B(t)$ — $n \times m$ -матрица, определяющая структуру управления; $\xi(t)$ — шум, случайные помехи.

Для аналитической оценки используются значения функции $x(t)$ за k единиц глубины анализа. Параметр k ограничивает фазовое пространство X , используемое для анализа с помощью матрицы $X_k(t)$. Выполнив центрирование и нормирование ее элементов $\overset{\circ}{X}_k(t)$, вычисляем корреляционную матрицу

$$R_k^-(t) = \frac{1}{k-1} X_k^o(t) X_k^{oT}(t) = \|r_{ij}^-(t)\|, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$r_{ij}^-(t) = \frac{1}{k-1} \sum_{l=1}^k x^i(t-l) x^j(t-l), \quad (4)$$

где $r_{ij}^-(t)$ — коэффициент корреляции переменных $x^i(t)$ и $x^j(t)$ в момент времени t ; l — лаг, смещение по моментам времени t фазового пространства X с учетом глубины анализа k .

Далее по $R_k^-(t)$ рассчитываем интегральные показатели деятельности системы.

$$G_i^{c.обш}(t) = \sum_{j=1}^n |r_{ij}^-(t)| : (|r_{ij}^-(t)| \geq r_{кр}); \quad (5)$$

$$G_i^{c.п}(t) = \sum_{j=1}^n r_{ij}^-(t) : (|r_{ij}^-(t)| \geq r_{кр}) \cap (r_{ij} > 0); \quad (6)$$

$$G_i^{c.отр}(t) = \sum_{j=1}^n r_{ij}^-(t) : (|r_{ij}^-(t)| \leq r_{кр}) \cap (r_{ij} < 0); \quad (7)$$

$$G_i^p(t) = G_i^{c.п}(t) + G_i^{c.отр}(t), \quad (8)$$

где $r_{кр}$ — критическое значение коэффициента корреляции; $G_i^{c.обш}(t)$ — сумма коэффициентов корреляции, взятых по модулю; $G_i^{c.п}(t)$ — сумма положительных коэффициентов корреляции; $G_i^{c.отр}(t)$ — сумма отрицательных коэффициентов корреляции; $G_i^p(t)$ — сумма коэффициентов корреляции с учетом их знаков.

Проверка значимости коэффициента корреляции (4) выполняется путем сравнения с критерием Стьюдента t_α для $k-2$ единиц глубины анализа при доверительной вероятности α ; в технических расчетах в основном используется значение $\alpha = 0,95$. Параметр $r_{кр}$ задается таким образом, чтобы в формулы (5)—(8) попадали коэффициенты корреляции в границах доверительного интервала. В зависимости от полноты описания фазового пространства X значение $r_{кр}$ можно выбирать произвольно.

Значения $G_i(t)$ рассчитываются на заданном временном интервале t и характеризуют связность каждой функции, что целесообразно отразить корреляционным графом (рис. 1).

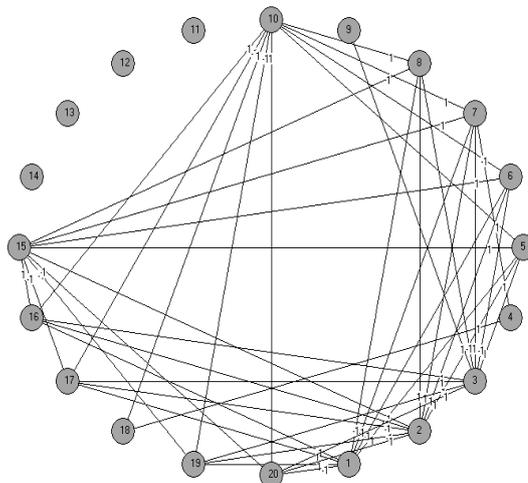


Рис. 1

Полное описание изучаемой системы $S = \{T, X, U, Y, J, V, \varphi, \psi, \xi\}$ приведено, чтобы показать возможность управления подобными системами по назначаемым целям, но в данной работе управление по целям на каждом такте не выполняется и рассчитывается интегральный показатель G по прогнозируемому состоянию объекта X^* . Выбирается объект со сформированным планом X^* и целями J . Цели J остаются неизменными при изменении X^* .

Объект исследования. Полагаем, что цифровая копия объекта имеет следующие характеристики: $X^*(T) = 5\,675\,805$ (в условных единицах), $\Delta X^*(T)$ — отклонение от характеристик цифровой копии объекта, $k=6$, $n=1,2$ млн фазовых переменных, $T=57$, $t=1$ месяц. Использована концепция, определяющая структуру матрицы B и характеризующаяся шестнадцатью режимами (табл. 1). Подробное описание подобной концепции представлено в докладах на конференции КомТех 2020 и в других источниках: четвертый — двенадцатый режимы — в работах [4—11] соответственно, четырнадцатый и пятнадцатый режимы — в работе [12], шестнадцатый режим — в [13].

Таблица 1

Режим	$\Delta X^*(T)$	Режим	$\Delta X^*(T)$
1	0	9	4 475
2	33 666	10	15 228
3	34 363	11	64 700
4	31 427	12	44 716
5	1 554	13	13 511
6	6 155	14	20 579
7	12 162	15	6 751
8	14 539	16	9 060

Значение интегрального показателя G (5) в обычном режиме (№ 1) динамической системы показано на рис. 2.

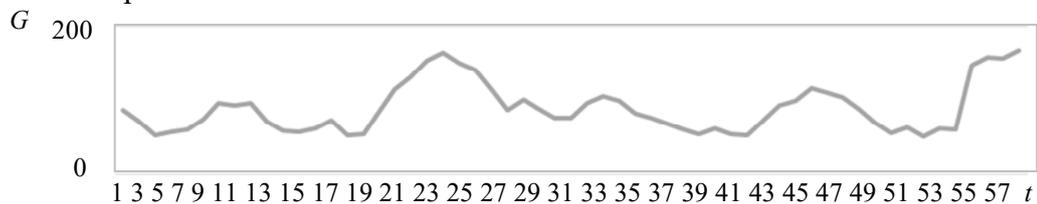


Рис. 2

Далее выполняется расчет интегрального показателя в других режимах в зависимости от выбранной структуры и концепции управления.

Результаты исследований (моделирования). Результаты расчета интегрального показателя, в зависимости от разных режимов планирования состояния динамической системы, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Режим	G^*	ΔG^*	Режим	G^*	ΔG^*
1	5 069,93	0	9	5 089,80	20
2	5 224,44	155	10	5 490,80	421
3	5 491,30	421	11	5 490,13	420
4	5 491,17	421	12	5 490,08	420
5	5 491,18	421	13	5 089,91	20
6	5 491,28	421	14	5 089,93	20
7	5 490,54	421	15	5 089,90	20
8	5 089,91	20	16	5 491,17	421

На основании проведенных расчетов сформировано оптимальное поле режимов (рис. 3, а) для управления динамической системой по значениям G : чем меньше параметр G , тем лучше метод (режим) подходит для управления, т.е. он оптимальный; более наглядно минимальные области значений G представлены на рис. 3, б. Условие оптимальности следует из условий полифакторности параметров процесса; более подробно о полифакторности см. работу [14].

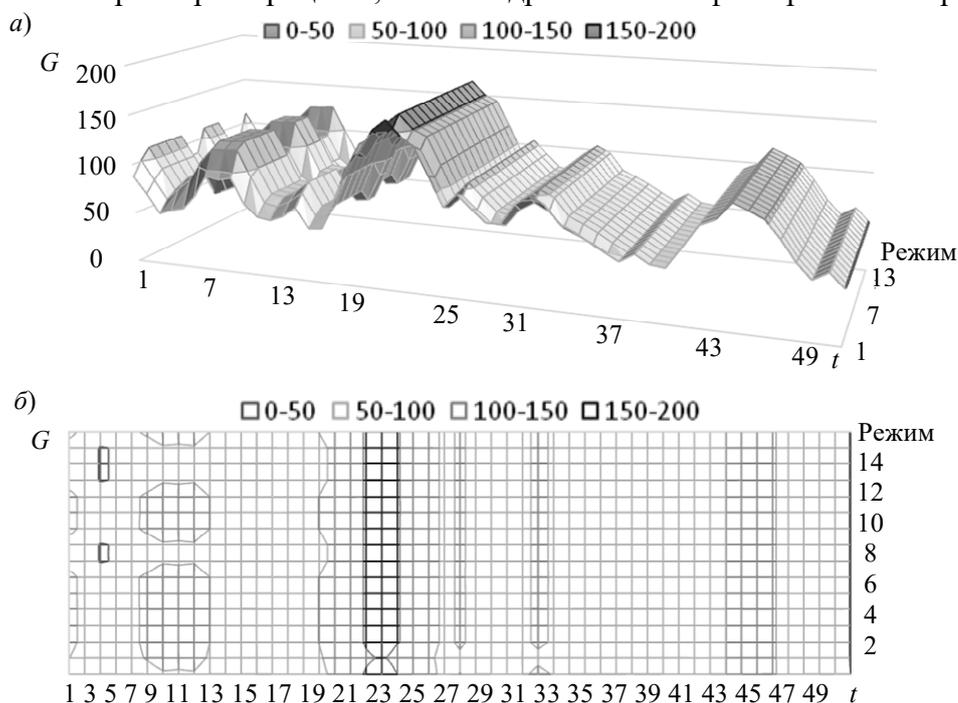


Рис. 3

С помощью уравнения (2) также можно: а) задавать оптимальное управленческое решение через фильтр Калмана [15]; б) перейти к классической задаче прогнозирования нейросетью состояния многомерной динамической системы с анализом локальных функций на каждом такте; в) перейти к формальному решению функции Кобба — Дугласа для прогнозирования с помощью рекуррентного уравнения состояния многомерной динамической системы [16]; г) перейти к решению балансовых моделей Леонтьева [17]; д) решать классические математические модели оптимальных управляемых процессов и достаточных условий их оптимальности [18]; е) применять другие оптимизационные методы с дискретным временем.

Заключение. Работа сложного многомерного объекта представлена как динамическая дискретная система. Рассчитаны интегральные оценки по режимам выбираемой концепции построения структуры управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кротов В. Ф. Основы оптимального управления. М.: Высш. школа, 1990. 430 с.
2. Bellman R. Dynamic Programming. New Jersey: Princeton Univ. Press, 1957.
3. Masev S. Depth of planning the state of a dynamic discrete system by autocorrelation function // Proc. Intern. Russian Automation Conf. (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2020. P. 989—993. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208187.
4. Совет Европы: Симпозиум по теме „Ключевые компетенции для Европы“: Докл. DECS / SC / Sec. (96) 43. Берн, 1996.
5. Anderson J. W., Krathwhol D. R., Airasia P. W. A Taxonomy for Learning, Teaching and Assessing: a Revision of Bloom’s Taxonomy of Education. N. Y., 2003. 336 p.

6. Shared “Dublin” descriptors for Short Cycle, First Cycle, Second Cycle and Third Cycle Awards // A Report from a Joint Quality Initiative Informal Group. 18 Oct. 2004 [Электронный ресурс]: <http://www.nva0.net/page/downloads/Dublin_Descriptors.pdf>.
7. Der europäische Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (EQR). Luxemburg, 2008 [Электронный ресурс]: <http://ec.europa.eu/dgs/education_culture/publ/pdf/eqf/broch_de.pdf>.
8. ISO Guide 73:2002. Risk management — Vocabulary — Guidelines for Use in Standards.
9. Адизес И. Управление жизненным циклом корпорации. СПб: Питер, 2007. 384 с.
10. DMarco T. Controlling Software Projects. N. Y.: Yourdon Press, 1982.
11. Сейфу Т. Ф., Бакаев В. И., Скворцов Т. П. Производственные основы надежности. М.: Изд-во стандартов, 1966.
12. Каплан Р., Нортон Д. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию: Пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2003. 304 с.
13. BS 7799-3:2006. Information Security Management Systems – Part 3: Guidelines for Information Security Risk Management.
14. Gorban A. N., Tyukina T. A., Smirnova E. V., Pokidysheva L. I. Evolution of adaptation mechanisms: adaptationenergy, stress, and oscillating death // J. of Theoretical Biology. 2016. P. 127—139.
15. Kalman R. E. A New approach to linear filtering and prediction problems // Trans. of the ASME Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, ser. D. P. 35—45.
16. Cobb C. W., Douglas P. H. A theory of production // Amer. Economic Rev. 1928. Dec. P. 139—165.
17. Leontief W. W. The Structure of American Economy, 1919—1939. Cambridge: Harvard Univ. Press, 1941.
18. Masaev S. N., Dorrer G. A., Cyganov V. V. Acceptable area of optimal control for a multidimensional system // J. of Physics: Conf. Series. Krasnoyarsk. 2020. P. 22091. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022091.

Сведения об авторе

Сергей Николаевич Масаев

— канд. техн. наук; Сибирский федеральный университет; Институт нефти и газа; доцент; E-mail: faberi@list.ru

Поступила в редакцию
26.08. 2020 г.

Ссылка для цитирования: Масаев С. Н. Концепция построения структуры управления динамической системой // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 40—46.

THE CONCEPT OF CREATING A DYNAMIC SYSTEM CONTROL STRUCTURE

S. N. Masaev

Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: faberi@list.ru

The problem of the circuit formalization of decentralized control of complex multidimensional objects using various methods is investigated. A multidimensional object is considered as a dynamic system with discrete time. The spaces of the object states, control actions, goals, observed parameters, and analytical estimates are formalized. Analytical estimates are calculated using the integral indicators. Evaluation of the integral indicators with selectable depth analysis of time series for each of sixteen studied control modes is carried out. For these modes, the optimal field is formed when selecting the optimal control. The formalization of a complex multidimensional object allows to turn from general representation of the system to its subsystems. The problems that can be solved with the proposed formalization of the object and corresponding methods are considered: the Kalman filter, neural network forecast, recurrent equation, and balances.

Keywords: control theory, dynamic system, integral indicators, mode, analysis depth

REFERENCES

1. Krotov V.F. *Osnovy optimal'nogo upravleniya* (Optimal Control Basics), Moscow, 1990, 430 p. (in Russ.)

2. Bellman R. *Dynamic programming*, Princeton University Press, NJ, 1957.
3. Masaev S. *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russia, 2020, pp. 989–993, DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208187.
4. *Council of Europe: Symposium on Key Competencies for Europe*: Doc. DECS/SC/Sec. (96)43. Bern, 1996.
5. Anderson J.W., Krathwhol D.R., Airasia P.W. *A Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of education*. NY, 2003, 336 p.
6. *Shared 'Dublin' descriptors for Short Cycle, First Cycle, Second Cycle and Third Cycle Awards. A report from a Joint Quality Initiative informal group (contributors to the document are provided in the Annex)*, 18 October 2004, http://www.nvao.net/page/downloads/Dublin_Descriptors.pdf.
7. *Der europäische Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (EQR)*, Luxemburg, 2008, http://ec.europa.eu/dgs/education_culture/publ/pdf/eqf/broch_de.pdf.
8. *ISO Guide 73:2002. Risk management - Vocabulary - Guidelines for use in standards*.
9. Adizes I. *Managing Corporate Lifecycles*, 2004, 460 p.
10. DMarco T. *Controlling Software Projects*, NY, USA, Yourdon Press, 1982.
11. Seyfi T.F., Bakayev V.I., Skvortsov T.P. *Proizvodstvennyye osnovy nadezhnosti* (Manufacturing Basics of Reliability), Moscow, 1966. (in Russ.)
12. Kaplan R.S. and Norton D.P. *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*, Harvard Business Press, 1996.
13. BS 7799-3:2006 "Information security management systems – Part 3: Guidelines for information security risk management".
14. Gorban A.N., Tyukina T.A., Smirnova E.V., Pokidysheva L.I. *Journal of Theoretical Biology*, 2016, pp. 127–139.
15. Kalman R.E. *Trans. of the ASME—Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, ser. D, pp. 35–45.
16. Cobb C.W., Douglas P.H. *A Theory of Production. American Economic Review*, December 1928, pp. 139–165.
17. Leontief W.W. *The Structure of American Economy, 1919-1939*, Cambridge, Harvard University Press, 1941.
18. Masaev S.N., Dorrer G.A., Cyganov V.V. *Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020, pp. 22091, DOI:10.1088/1742-6596/1679/2/022091.

Data on author

Sergey N. Masaev

— PhD; Siberian Federal University, School of Petroleum and Gas Engineering; Associate Professor; E-mail: faberi@list.ru

For citation: Masaev S. N. The concept of creating a dynamic system control structure. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 1. P. 40—46 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46