УДК 681.3.06 (075.32)

DOI: 10.15827/0236-235X.124.723-727

Дата подачи статьи: 10.09.18

2018. Т. 31. № 4. С. 723–727

Методика оценки качества гетерогенных робототехнических комплексов моделью Banker-Charnes-Cooper

Д.Е. Селиверстов ¹, к.т.н., преподаватель, seliverstov_dmitriy@rambler.ru

К.Д. Русаков ², младший научный сотрудник, rusakov.msk@yandex.ru

С.Ш. Хиль ³, к.т.н., доцент, skhill@mail.ru

С.Б. Савилкин ⁴, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник, Savilkin@mail.ru

¹ Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Балашиха, 143900, Россия

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 117997, Россия

³ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, 125993, Россия

⁴ Центр визуализации и спутниковых информационных технологий ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, 117218, Россия

В статье предложена методика оценки и определения направлений повышения качества гетерогенных робототехнических комплексов, состоящая из частных методик и основанная на разработанном на базе методологии анализа среды функционирования комплексе математических моделей. Одной из особенностей методологии анализа среды функционирования по оценке эффективности систем является то, что исследуемый объект обладает множеством входных и выходных разнородных параметров и решение задачи осуществляется в условиях этой разнородности, что имеет особое значение при гетерогенности комплекса. Посредством сложных математических преобразований моделирование на базе анализа среды функционирования дает возможность «сравнивать несравнимое». Методика оценки качества гетерогенных робототехнических комплексов предполагает определенный ряд факторов, описанных в статье, и строится на основе разработанных математических моделей оценки качества гетерогенных робототехнических комплексов и теоретических положений о критериях качества исследуемого объекта.

В статье показано: если в соответствии с ограничениями необходимо добиться максимального уровня значений выходных показателей при фиксированных значениях показателей входа, выбирается разработанная модель анализа гетерогенных робототехнических комплексов, основанная на выходной модели Banker-Charnes-Cooper методологии анализа среды функционирования. Данная математическая модель позволяет проводить анализ качества гетерогенных робототехнических комплексов в условиях возможности сокращения затрат при фиксированных значениях выходных характеристик. Если определение направлений повышения качества гетерогенных робототехнических комплексов осуществляется в условиях возможности одновременного изменения значений как входных, так и выходных параметров, выбирается модель синтеза, основанная на аддитивной модели методологии анализа среды функционирования.

Ключевые слова: гетерогенные робототехнические комплексы, анализ среды функционирования, оценка качества, технический уровень, Banker-Charnes-Cooper.

В процессе моделирования экстремальных задач гетерогенной робототехники особое внимание уделяется оценке качества таких сложных и новых систем. Для анализа и синтеза гетерогенных робототехнических комплексов (ГРТК) необходимо использовать современные эффективные математические модели, учитывающие все многообразие показателей их характеристик. В настоящее время методология анализа среды функционирования (АСФ) представляет собой продуктивный инструмент для анализа деятельности сложных систем. Одна из особенностей методологии АСФ по оценке эффективности сложных систем – исследуемый объект обладает множеством входных и выходных разнородных параметров и решение задачи осуществляется в условиях этой разнородности, что имеет особое значение при гетерогенности комплекса. Посредством сложных математических преобразований АСФ-моделирование дает возможность сравнивать несравнимое.

Данный подход был впервые предложен в работах [1, 2]. Методология АСФ представляет собой

результат междисциплинарных исследований, проводимых последние десятилетия в области экономики, системного анализа и исследования операций [3]. Она основывается на фундаментальных положениях математической экономики – теории производственных функций, модели производства Леонтьева, оптимальности Парето, определении эффективности в моделях Фаррела [4]. При этом АСФ-подход реализован в математическом программировании, исследовании операций, теории оптимизации, ПО [5, 6]. В России методология АСФ мало известна. Тем не менее, применение предложенного математического аппарата для оценки эффективности функционирования сложных систем способно обеспечить решение сложно формализуемых технических задач, в частности, по объективной комплексной оценке качества ГРТК.

Оценка и определение направлений повышения качества

В рамках разработки информационно-математического обеспечения (ИМО) оценки и определе-

ния направлений повышения качества в работах [7–10] авторами предложен комплекс математических моделей решения данной задачи. Для расширения практической реализации разработанных математических моделей необходимо разработать комплексное методическое обеспечение оценки и определения направлений повышения качества ГРТК. Структурная схема методики показана на рисунке 1.

Разработанная методика включает частные методики – оценки качества ГРТК и определения направлений повышения качества ТК.

Методика оценки качества ГРТК предполагает:

- определение качества ГРТК в условиях ограничений, накладываемых на значения входных и выходных показателей, то есть состояния исследуемого объекта (X_0, Y_0) в n -мерном пространстве значений $m + r$ входов и выходов;

- определение необходимости увеличения (уменьшения) значений показателей качества некачественных (относительно качественных) объектов.

Исследуется множество объектов (ГРТК) $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, представленных совокупностью входных и выходных показателей качества $K = \{K_1, \dots, K_m, \dots, K_r\}$, в которых все входные и выходные данные линейно независимы (в том числе определяемые по порядковой шкале).

Методика строится на основе разработанных математических моделей оценки качества комплексов [8, 9] и теоретических положений о критериях качества исследуемого объекта [3, 11]. Алгоритм, реализующий методику оценки качества ГРТК, представлен на рисунке 2.

Из условий задачи анализа ГРТК следует: если в соответствии с ограничениями необходимо добиться максимального уровня значений выходных показателей при фиксированных значениях показателей входа $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{const}$, то выбирается разработанная модель анализа ГРТК, основанная на выходной модели ВСС методологии АСФ [3].

Для оценки качества ГРТК в условиях ограничений, накладываемых на значения показателей вектора выходных переменных $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) = \text{const}$, и возможности изменения значений показателей входа выбирается модель анализа ГРТК, основанная на входной модели ВСС методологии АСФ [3, 12]. Данная математическая модель позволяет проводить анализ качества ГРТК в условиях возможности сокращения затрат при фиксированных значениях выходных характеристик.

Результатом является перевод исследуемого объекта (X_0, Y_0) из состояния $\langle T, K \rangle$ в состояние θ при $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) = \text{const}$. Если оценка качества ГРТК осуществляется в условиях возможности одновременного изменения значений как входных, так и выходных показателей качества ТК, выбирается математическая модель анализа ГРТК, основанная на аддитивной модели методологии АСФ [3]. В этом случае проводится оценка качества ГРТК с ориентацией на последующее решение задачи синтеза по входным и выходным показателям качества ГРТК одновременно [13]. Результатом является перевод исследуемого объекта (X_0, Y_0) из состояния $\langle T, K \rangle$ в состояние z .

Если в результате решения задач анализа качества ТК установлено, что оптимальное значение искомого функционала равно единице, исследуемый ТК является качественным. При этом значения оптимальных дополнительных переменных равны нулю $(S^* = S^{+*} = 0)$.

Если исследуемый объект является некачественным (относительно качественным), на основании результатов решения задачи оценки качества ТК осуществляется переход к решению задачи определения направлений повышения его качества.

Методика определения направлений повышения качества ТК предполагает определение значений оптимальных дополнительных переменных S^- , S^+ для некачественного (относительно качественного) объекта в условиях ограничений, накладываемых на значения входных или выходных показателей (отсутствия ограничений), то есть выбор направлений увеличения (уменьшения) значений показателей качества ГРТК в n -мерном пространстве значений $m+r$ входов и выходов.

Исследуется множество объектов $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$, представленных совокупностью входных и выходных показателей качества $K = \{K_1, \dots, K_m, \dots, K_r\}$, в которых все входные и выходные данные линейно независимы (в том числе определяемые по порядковой шкале).

Методика строится на основе разработанных математических моделей определения направлений повышения качества ГРТК [3, 9] и теоретических положений о критериях качества исследуемого объекта (X_0, Y_0) [12]. Алгоритм, реализующий методику определения направлений повышения качества ГРТК, представлен на рисунке 3.

На основании результатов оценки качества ГРТК осуществляется поиск направлений движения в n -мерном пространстве входных и выходных параметров, позволяющих осуществить перевод объекта из состояния некачественного в состояние

качественного. Из условий задачи определения направлений повышения качества ГРТК следует: если в соответствии с требованиями необходимо добиться максимального уровня значений выходных показателей при фиксированных значениях показателей входа $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) = const$, выбирается модель синтеза, основанная на выходной модели ВСС методологии АСФ [3]. Результатом является перевод исследуемого объекта (X_0, Y_0) из состояния $\langle T, K, \eta^* \rangle$ в состояние $(X_0 - S^-, \eta^* Y_0 + S^+)$ при $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) = const$.

Для решения задачи в условиях ограничений, накладываемых на значения показателей вектора выходных переменных $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) = const$, и возможности изменения значений показателей входа выбирается модель, основанная на входной модели ВСС методологии АСФ [3, 9]. Результатом является перевод исследуемого объекта (X_0, Y_0) из состояния $\langle T, K, \theta^* \rangle$ в состояние $(\theta^* X_0 - S^-, Y_0 + S^+)$ при $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) = const$.

Если определение направлений повышения качества ГРТК осуществляется в условиях возможности одновременного изменения значений как входных, так и выходных параметров, выбирается модель синтеза, основанная на аддитивной модели методологии АСФ [3, 7]. Результатом является перевод исследуемого объекта (X_0, Y_0) из состояния (T, K) в состояние (S_k^-, S_i^+) .

Рис. 3. Алгоритм определения направлений повышения качества ГРТК на основе математических моделей методологии АСФ

Fig. 3. The algorithm for determining the ways of improving the quality of heterogeneous robotic systems based on mathematical models of the data envelopment analysis methodology

Заключение

Разработанная методика построена на ранее проведенных исследованиях и разработанных математических моделях по оценке и определению направлений повышения качества ГРТК. Данная методика позволяет проводить оценку качества ГРТК и определять направления его повышения в условиях ограничений, накладываемых на значения вектора входных переменных, вектора выходных переменных, а также отсутствия ограничений.

Литература

1. Banker R.D., Chang H. and Cooper W.W. Equivalence and implementation of alternative methods for determining returns to scale in data envelopment analysis. *Europ. J. of Operation Research*, 1995, vol. 89, pp. 473–481.
2. Banker R.D., Charnes A., and Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 1984, vol. 30, pp. 1078–1092.
3. Кривоножко В.Е., Лычев А.В. Моделирование и анализ деятельности сложных систем М.: Ленанд, 2013. 256 с.
4. Кривоножко В.Е., Пропой А.И., Сеньков Р.В., Родченков И.В., Анохин П.М. Анализ эффективности функционирования сложных систем // *Автоматизация проектирования*. 1999. № 1. С. 2–7.
5. Сухов А.В., Решетников В.Н., Савилкин С.Б. Мониторинг частотного ресурса геостационарных спутников-ретрансляторов с использованием энтропии покрытия // *Программные продукты и системы*. 2017. № 1. С. 119–123. DOI: 10.15827/0236-235X.117.119-123.

6. Rozhnov A.V., Lobanov I.A. Investigation of the joint semantic environment for heterogeneous robotics. *Proc. 10th Intern. Conf. MLSD*, 2017. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8109678/> (дата обращения: 09.09.2018). DOI: 10.1109/mlsd.2017.8109678.

7. Баландин А.Е., Звезков С.Г., Селиверстов Д.Е. Применение технологии анализа среды функционирования при подготовке операторов БПЛА // *Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: сб. докл. X Всерос. науч.-технич. конф.* 2015. С. 28–32.

8. Рожнов А.В., Антиох Г.М., Селиверстов Д.Е., Кублик Е.И. Системная интеграция направлений научной деятельности в условиях формирования прединтеллектуальной инфраструктуры // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2014. Т. 12. № 11. С. 59–63.

9. Селиверстов Д.Е., Князев В.В. Модель оценки эффективности подготовки операторов робототехнических комплексов военного назначения // *Информатика, вычислительная техника и управление: сб. науч. тр.* 2015. С. 180–184.

10. Шукшунов В.Е., Циблев В.В., Потоцкий С.И., Безруков Г.В., Душенко А.Г., Жук Е.И., Зубов Н.Е., Макаров А.М., Наумов Б.А., Фоменко В.В. Тренажерные комплексы и тренажеры. Технологии разработки и опыт эксплуатации. М.: Машиностроение, 2005. 384 с.

11. Каляев А.И., Рубцов И.В. Боевым роботам нужна программа // *Национальная оборона*. 2012. № 8. С. 34–48.

12. Charnes A., Cooper W.W. and Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *Europ. J. of Operation Research*, 1978, vol. 2, pp. 429–444. DOI: 10.1007/BF02282039.

13. Генов А.А., Русаков К.Д., Хиль С.Ш. Идентификация состояния сложной технической системы в условиях неопределенности измерительной информации // *Программные продукты и системы*. 2017. Т. 30. № 3. С. 373–377. DOI: 10.15827/0236-235X.119.373-377.

Evaluating the quality of heterogeneous robotic systems using the Banker-Charnes-Cooper model

D.E. Seliverstov¹, Ph.D. (Engineering), Lecturer, seliverstov_dmitriyy@rambler.ru

K.D. Rusakov², Junior Researcher, rusakov.msk@yandex.ru

S.Sh. Hill³, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, skhill@mail.ru

S.B. Savilkin⁴, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher, Savilkin@mail.ru

¹ Military Academy of Strategic Rocket Troops named after Peter the Great, Balashikha, 143900, Russian Federation

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 117997, Russian Federation

³ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

⁴ Center of Visualization and Satellite Information Technologies SRISA, Moscow, 117218, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a method for evaluating and determining the ways for improving the quality of heterogeneous robotic systems that consists of private methods. It is based on the developed complex of mathematical models that is based on the methodology of the data envelopment analysis.

One of the features of the data envelopment analysis by evaluating complex system effectiveness is the fact that the object under study has a variety of input and output heterogeneous parameters. In this case, the solution of the problem is carried out under conditions of heterogeneity of the parameters, which is of particular importance in the case of system heterogeneity. After complex mathematical transformations, modeling based on the data envelopment analysis makes it possible to “compare something noncomparable”. The method for evaluating the quality of heterogeneous robotic systems supposes a certain number of factors described in the paper. It is based on the developed mathematical models for evaluating the quality of heterogeneous robotic systems and theoretical provisions on the quality criteria the object under study.

The paper shows that if the constraints make it necessary to achieve the maximum level of the output indices at fixed values of the entry indicators, then we should choose the developed model for the analysis of heterogeneous robotic systems based on the Banker-Charnes-Cooper output model of the data envelopment analysis. This mathematical model allows analyzing the quality of heterogeneous robotic systems in conditions of possible cost reduction with fixed values of output characteristics.

If the determination of the ways of improving the quality of heterogeneous robotic systems is carried out under conditions of possible simultaneous changing of the values of both input and output parameters, then we choose a synthesis model based on the additive model of methodology of the data envelopment analysis.

Keywords: heterogeneous robotic systems, data envelopment analysis, quality evaluation, technical level, Banker-Charnes-Cooper model.

References

1. Banker R.D., Chang H., Cooper W.W. Equivalence and implementation of alternative methods for determining returns to scale in data envelopment analysis. *European J. of Operation Research*. 1996, vol. 89, pp. 473–481.
2. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*. 1984, no. 30, pp. 1078–1092.
3. Krivonozhko V.E., Lychev A.V. Modeling and Analysis of Complex Systems. Moscow, LENAND Publ., 2013, 256 p.
4. Krivonozhko V.E., Propoy A.I., Senkov R.V., Rodchenkov I.V., Anokhin P.M. Analysis of the performance of complex systems. *Design Automation*. 1999, no. 1, pp. 2–7 (in Russ.).
5. Sukhov A.V., Reshetnikov V.N., Savilkin S.B. Monitoring of frequency resource of geostationary repeater satellites using cover entropy. *Software & Systems*. 2017, no. 1, pp. 119–123 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.117.119-123.
6. Rozhnov A.V., Lobanov I.A. Investigation of the joint semantic environment for heterogeneous robotics. *Proc. 10th Intern. Conf. “Management of Large-Scale System Development” (MLSD)*. 2017. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8109678/> (accessed September 9, 2018). DOI: 10.1109/mlsd.2017.8109678.
7. Balandin A.E., Zvekov S.G., Seliverstov D.E. Using the data envelopment analysis when training UAV operators. *The Problems of Improvement of Robotic and Intelligent Aircraft Systems: Proc. 10th All-Russ. Sci. and Tech. Conf.* Moscow, 2015, pp. 28–32.
8. Rozhnov A.V., Antiokh G.M., Seliverstov D.E., Kublik E.I. System integration directions of the scientific activity provided creation of “presmart” infrastructure. *J. Information-Measuring and Control Systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014, vol. 12, no. 11, pp. 59–63 (in Russ.).
9. Seliverstov D.E., Knyazev V.V. A model for evaluating the effectiveness of training operators of military robotic systems. *Proc. “Computer Science, Computer Engineering and Management”*. Moscow, ITM i VT RAN Publ., 2015, no. 330, pp. 180–184 (in Russ.).
10. Shukshunov V.E., Tsibliev V.V., Pototsky S.I., Bezrukov G.V., Dushenko A.G., Zhuk E.I., Zubov N.E., Makarov A.M., Naumov B.A., Fomenko V.V. *Training Complexes and Simulators. Development Technologies and Operating Experience*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 384 p.
11. Kalyaev A.I., Rubtsov I.V. Military robots need a program. *National Defence*. 2012, no. 8, pp. 34–48.
12. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *European J. of Operation Research*. 1978, no. 2, pp. 429–444. DOI: 10.1007/BF02282039.
13. Genov A.A., Rusakov K.D., Hil S.Sh. Identification of a complex technical system functional state under conditions of measurement data ambiguity. *Software & Systems*. 2017, no. 3, pp. 373–377 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.119.373-377.