

УДК 004.942+004.021

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**Феоктистов А.Г.***ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова» СО РАН,
Иркутск, e-mail: agf65@yandex.ru*

Рассмотрена проблема исследования динамики функционирования сложных систем и параметрического управления такими системами. Предполагается, что сложная система может быть представлена как система массового обслуживания. Для ее исследования выбран метод имитационного моделирования. Сформулирована постановка задачи управления сложной системой на основе методологии многокритериального выбора управляющих воздействий. Построена модель сложной системы, ориентированная на применение методологии многокритериального выбора. Проведен сравнительный анализ методов многокритериального выбора. Рассмотрены методы выбора по Парето и по взвешенному критерию, совокупно-экстремальный, лексикографический и мажоритарный методы. В качестве базовых методов многокритериального выбора в модели использованы лексикографический и мажоритарный методы. Представлен специализированный алгоритм, базирующийся на использовании известных методов многокритериального выбора и обеспечивающий простоту использования механизма выбора управляющих воздействий и скорость выполнения вычислений. Работа алгоритма включает четыре фазы: подготовку исходных данных, имитационное моделирование, анализ результатов моделирования и принятие решения. Приведены примеры выбора управляющих воздействий для сложных систем: логистического складского комплекса и распределенной вычислительной системы.

Ключевые слова: сложная система, имитационное моделирование, распределенные вычисления, многокритериальный выбор

THE MANAGEMENT OF COMPLEX SYSTEMS BASED ON THE METHODOLOGY OF MULTI-CRITERIA CHOICE OF CONTROL ACTIONS**Feoktistov A.G.***Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, e-mail: agf65@yandex.ru*

The study for problems of dynamics of functioning complex systems and parametric control of such systems is considered. It is assumed that a complex system can be represented as a queuing system. The method of simulation modeling is used for her study. The task statement of management of complex systems based on multi-criteria methodology for the choice of control actions is formulated. The model of a complex system oriented to usage of methodology of multi-criteria choice is developed. A comparative analysis of methods of multi-criteria choice is carried out. The following methods of multi-criteria choice are considered: the methods by Pareto and by weighted criteria, lexicographical, majority and others methods. The majority and lexicographical methods are used in the model as basic methods of multi-criteria choice. The specialized algorithm based on the use of the known methods of multi-criteria choice is represented. The algorithm provides ease of using mechanism for choice of control actions and high-speed calculation. The algorithm includes the phases of preparation of input data, the simulation modeling, the results analysis and the decision-making. The examples of the choice of control actions for such complex systems as logistics warehouse and distributed computing systems are provided.

Keywords: complex system, simulation modeling, distributed computing, multi-criteria choice

Одной из важных проблем в области системного анализа является исследование динамики функционирования сложных технических, производственных и экономических систем на различных этапах их проектирования, испытания и эксплуатации, а также управление этими системами на основе результатов проведенного исследования. При проведении математического моделирования сложной системы многие задачи связаны с выбором вариантов результатов экспериментальных расчетов, на основе которых в дальнейшем формируются управляющие воздействия с целью кор-

ректировки процесса функционирования системы. В их числе задачи определения допустимых или наилучших параметров управления этой системой в дискретные моменты времени с целью обеспечения заданных критериев (эффективности, надежности и других показателей) качества ее функционирования. Зачастую необходимость выбора значений таких параметров возникает в процессе управления в нестандартных ситуациях, а также при постановке и решении оптимизационных задач. Разработка средств поддержки многокритериального выбора для предметного специалиста

является актуальной проблемой в области ситуационного управления [3].

Важными характеристиками механизма выбора для лица, принимающего решение – специалиста предметной области, являются простота в использовании и скорость выполнения вычислений, необходимых для выработки управляющих воздействий. Простота использования механизма выбора обуславливает в свою очередь требование минимального объема входной информации, предоставляемой специалистом предметной области и необходимой для работы этого механизма.

В статье рассматривается подход к управлению сложной системы на основе методологии многокритериального выбора значений наблюдаемых переменных, получаемых в процессе имитационного моделирования этой системы. В рамках данного подхода разработан специализированный алгоритм, базирующийся на использовании известных методов многокритериального выбора и обеспечивающий вышеперечисленные характеристики механизма выбора управляющих воздействий. Сложная система рассматривается как система массового обслуживания.

Постановка задачи

Предполагается, что в процессе управления сложной системой S специалисту предметной области необходимо произвести исследование системы с помощью имитационного моделирования и определить управляющие воздействия на систему с целью повышения эффективности ее функционирования.

Модель многокритериального выбора. Пусть x и y – векторы входных и наблюдаемых переменных имитационной модели исследуемой системы S . Наблюдаемые переменные представляют показатели качества функционирования исследуемой системы. Элементы векторов x_i , $i = \overline{1, n_x}$, и y_j , $j = \overline{1, n_y}$ имеют соответственно области X_i и Y_j допустимых значений. Предполагается, что эффекты влияния входных переменных на наблюдаемые переменные исследованы с помощью факторного анализа [4] заранее – при построении и испытании имитационной модели исследуемой системы. Также предполагается, что для каждого j -го элемента вектора y задан критерий вычисления оценки \hat{y}_j качества значения этого элемента (стремление значения к минимуму или максимуму на множестве сравниваемых значений) и его предельные значения y_j^{\min} и $y_j^{\max} \in Y_j$.

Ряд элементов вектора x играют роль варьируемых переменных, образуют подмножество X^* и отождествляются с элементами вектора u управляющих воздействий:

$u_q \equiv x_i$, $q = \overline{1, n_u}$, $i \in \overline{1, n_x}$, $1 \leq n_u \leq n_x$. В качестве начальных значений варьируемых переменных используются базовые значения, соответствующие принятым по параметрам функционирования исследуемой системы. Остальные значения варьируемых переменных выбираются из соответствующих областей допустимых значений с учетом эффектов влияния варьируемых переменных на наблюдаемые переменные. Значения неварьируемых входных переменных, являющихся элементами вектора x , задаются на основе статистических числовых данных, представленных информационной подсистемой исследуемой системы.

Специалистом предметной области инициируется процесс имитационного моделирования с некоторым периодом дискретности T . В процессе моделирования выполняется имитация процесса функционирования исследуемой системы путем проведения параллельных многовариантных расчетов (прогона модели для каждого сочетания значений варьируемых переменных) и формируется множество V вариантов значений наблюдаемых переменных: значение $y_{jk} \in Y_j$ является элементом k -го варианта $v_k \in V$ для переменной y_j , $j = \overline{1, n_y}$, $k = \overline{1, n_v}$.

Таким образом, модель многокритериального выбора можно представить в виде структуры: $M = \langle x, y, u, X^*, V, Y^*, C \rangle$, где Y^* – множество оценок значений наблюдаемых переменных из V , C – механизм многокритериального выбора.

Постановка задачи многокритериального выбора. Пусть выполнено имитационное моделирование исследуемой системы S и сформировано множество V вариантов значений наблюдаемых переменных модели M . По результатам имитационного моделирования на модели M требуется с помощью механизма C сформировать вектор u управляющих воздействий путем многокритериального выбора варианта v_k значений наблюдаемых переменных из V и варьируемых переменных из X^* , отождествляемых с элементами вектора u и соответствующим значениям наблюдаемых переменных выбранного варианта v_k . Механизмы многокритериального выбора на основе лексикографического и мажоритарного методов рассматриваются в следующем разделе.

Методология многокритериального выбора

Выбор из множества V подмножества $V^* \subseteq V$ вариантов значений наблюдаемых переменных с целью дальнейшего определения значений элементов вектора u является многокритериальным. Существует широкий спектр методов принятия решений на основе многокритериальной оптимизации [7]. Из этого спектра для решения поставленной задачи наиболее подходят некоторые распространенные методы многокритериального выбора, основанные на анализе числовых значений в соответствии с заданными критериями качества и оценками этих значений. В их числе методы выбора по Парето и по взвешенному критерию, совокупно-экстремальный, лексикографический и мажоритарный методы [5]. Применение ряда методов, таких как метод выбора по взвешенному критерию, требует от специалиста предметной области больших затрат при определении рангов, весов и других характеристик критериев, что на практике бывает крайне затруднительно. В случае методов, подобных совокупно-экстремальному методу, возникает проблема интерпретации результатов выбора. При использовании метода выбора по Парето задача выбора зачастую может быть неразрешимой.

Таким образом, в рамках данного исследования выбор вариантов для подмножества V^* осуществляется либо на основе лексикографического метода, если специалист предметной области может упорядочить наблюдаемые переменные по значимости, либо, в противном случае, на основе мажоритарного метода. Лексикографический метод отбора вариантов значений наблюдаемых переменных использует следующее правило многокритериального выбора, приведенное в [5]:

$$V^* = \left\{ v_k \in V : \left(\forall v_l \in V \exists p \in \overline{1, n_y - 1} : (\hat{y}_{lk} = \hat{y}_{ll}) \wedge \dots \wedge (\hat{y}_{pk} = \hat{y}_{pl}) \wedge (\hat{y}_{(p+1)k} > \hat{y}_{(p+1)l}) \right) \right\}, \quad (1)$$

где $y_j^{\min} \leq y_{jk} \leq y_j^{\max}$; $j \in \overline{1, n_y}$, $k \in \overline{1, n_v}$, $l \in \overline{1, n_v}$, $k \neq l$.

Мажоритарный метод отбора вариантов значений наблюдаемых переменных использует следующее правило многокритериального выбора, приведенное в [5]:

$$V^* = \left\{ v_k \in V : \left(-\exists v_l \in V : \sum_{j=1}^{n_y} \text{sign}(\hat{y}_{jl} - \hat{y}_{jk}) > 0 \right) \right\}, \quad (2)$$

где $\text{sign}(0) = 0$; $y_j^{\min} \leq y_{jk} \leq y_j^{\max}$; $k \in \overline{1, n_v}$, $l \in \overline{1, n_v}$, $k \neq l$.

Для оценки значений y_{jk} , $k = \overline{1, n_v}$, j -й переменной их множество разбивается на подмножества, попарно непересекающиеся, которые упорядочиваются по возрастанию или убыванию значений наблюдаемых переменных, содержащихся в них. В соответствии с этим упорядочением каждое подмножество получает свой индекс, который используется в качестве оценки значений наблюдаемых переменных, попавших в данное подмножество. Оценка значений y_{jk} , $k = \overline{1, n_v}$ для каждой j -й переменной может выполняться параллельно.

Применение рассмотренных выше методов многокритериального выбора обусловлено тем, что они обладают наименьшей сложностью с вычислительной точки зрения по сравнению с другими известными методами решения подобной задачи, просты в реализации и требуют минимальную дополнительную информацию от эксперта.

Пусть в результате формирования множества V^* получен единственный k -й вариант v_k значений наблюдаемых переменных. Этому вектору однозначно соответствует k -й вариант значений варьируемых переменных вектора x . Выбрав из них значения x_{ik} такие, что $x_i \in X^*$, получим значения элементов вектора u . В том случае, когда полученное подмножество V^* содержит более одного варианта значений наблюдаемых переменных, окончательный выбор единственного варианта v_l осуществляется случайным образом. При $V^* = \emptyset$ задача неразрешима. В этом случае требуется вмешательство лица, принимающего решение, с целью корректировки исходных данных.

Алгоритм многокритериального выбора управляющих воздействий

Работа алгоритма многокритериального выбора значений наблюдаемых переменных, входящих в модель исследуемой системы, включает четыре фазы.

I. Фаза подготовки исходных данных

а) Проведение факторного анализа имитационной модели исследуемой системы. Построение векторов x , u и u . Определение степени влияния варьируемых переменных на наблюдаемые переменные.

б) Определение метода многокритериального выбора и задание критериев вычисления оценок \hat{y}_j качества значений элементов вектора y и их предельных значений y_j^{\min} и $y_j^{\max} \in Y_j, j = 1, n_y$. В случае лексикографического метода – упорядочение наблюдаемых переменных.

с) Задание значений исходных данных.

II. Фаза имитационного моделирования

а) Автоматическое формирование множества вариантов исходных данных на основе значений варьируемых переменных.

б) Имитация процесса функционирования исследуемой системы путем проведения параллельных многовариантных расчетов и формирование множества V вариантов значений наблюдаемых переменных.

III. Фаза анализа результатов моделирования

а) Определение оценок значений наблюдаемых переменных.

б) Решение задачи многокритериального выбора значений наблюдаемых переменных.

IV. Фаза принятия решения

а) Если задача неразрешима, то переход на один из шагов фазы I) с целью корректировки исходных данных или переход на шаг с. текущей фазы.

б) Если задача разрешима, то формирование вектора u .

с) Завершение работы алгоритма.

Операции на фазе подготовки исходных данных осуществляются специалистами предметной области: шаг (а) – разработчиком модели; шаги (б) и (с) – конечным пользователем модели. Принятие решения на шаге (а) четвертой фазы работы алгоритма также осуществляется конечным пользователем модели. Алгоритм определения оценок значений наблюдаемых переменных хорошо распараллеливается и масштабиру-

ется. При распараллеливании вычислений на n_y процессов сложность определения оценок значений наблюдаемых переменных в худшем случае можно оценить как $O(n_y \log n_y)$. При решении задачи многокритериального выбора лексикографическим или мажоритарным методами сложность не превышает $O(n_y n_v)$.

Вычислительные эксперименты

Данный алгоритм использован в инструментальных средствах автоматизации проведения вычислительных экспериментов по имитационному моделированию сложных систем [1]. Для иллюстрации работы алгоритма в табл. 1 и 2 приведены выборочные результаты вычислений.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента для задачи моделирования складского комплекса [2]. Варианты v_4 и v_5 отбрасываются, так как значения ряда наблюдаемых переменных в данных вариантах выходят за пределы областей допустимых значений этих переменных. Значения, выходящие за пределы допустимых областей, выделены красным цветом. В случае использования лексикографического метода и упорядочения наблюдаемых переменных по убыванию их значимости, согласно формуле (1) будет выбран вариант v_3 , выделенный зеленым цветом. В случае использования мажоритарного метода, согласно формуле (2) будет выбран вариант v_1 , выделенный желтым цветом.

В табл. 2 приведены результаты эксперимента для задачи моделирования распределенной вычислительной среды [6]. В случае использования лексикографического метода и упорядочения наблюдаемых переменных по убыванию их значимости, согласно формуле (1) будет выбран вариант v_2 , выделенный зеленым цветом. В случае использования мажоритарного метода, согласно формуле (2) также будет выбран вариант v_2 .

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента 1

Наблюдаемая переменная	Критерий качества	Область допустимых значений	Варианты значений наблюдаемых переменных				
			v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
y_1	$\rightarrow \max$	$\forall n > 0, n \in R$	1,04	1,06	1,09	1,09	1,11
y_2	$\rightarrow \min$	$\forall n \leq 1, n \in R$	0,81	0,88	0,94	1,08	1,18
y_3	$\rightarrow \max$	$\forall n > 0, n \in R$	0,23	0,18	0,15	0,01	-0,07
y_4	$\rightarrow \max$	$\forall n > 0, n \in R$	28,40	20,45	15,96	0,93	-5,93
y_5	$\rightarrow \min$	$\forall n \leq 0,3, n \in R$	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
y_6	$\rightarrow \min$	$\forall n \leq 5, n \in R$	4,86	2,54	2,02	1,96	1,95

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента 2

Наблюдаемая переменная	Критерий качества	Область допустимых значений	Варианты средних значений наблюдаемых переменных	
			v_1	v_2
y_1	$\rightarrow \min$	$\forall n \geq 0, n \in R$	4,10	3,20
y_2	$\rightarrow \min$	$\forall n \geq 0, n \in R$	4106,84	3208,47
y_3	$\rightarrow \min$	$\forall n \geq 0, n \in R$	89	37
y_4	$\rightarrow \min$	$\forall n \geq 0, n \in R$	23	0

Заключение

В статье рассмотрена проблема управления сложной системой, связанная с многокритериальным выбором управляющих воздействий. Для ее решения сформулирована постановка задачи и построена соответствующая модель на основе методологии многокритериального выбора. Предложен новый алгоритм многокритериального выбора управляющих воздействий, ориентированный на поддержку принятия решений в процессе управления сложной системой. Алгоритм реализует эффективные операции оценки и выбора результатов имитационного моделирования исследуемой системы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-29-07955-офи_м.

Список литературы

1. Башарина О.Ю., Дмитриев В.И., Корсуков А.С., Носков С.И., Феоктистов А.Г. Методика и инструментальные средства автоматизации проведения вычислительных экспериментов по имитационному моделированию сложных систем // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – С. 241. URL: <http://www.science-education.ru/115> (дата обращения: 20.08.2015).
2. Башарина О.Ю., Носков С.И. Решение задач складской логистики на основе применения методологии системного анализа // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 1 (41). – С. 70–75.
3. Пospelov Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
4. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
5. Шоломов Л.А. Логические методы исследования дискретных моделей выбора. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
6. Bogdanova V.G., Vychkov I.V., Korsukov A.S., Oparin G.A., Feoktistov A.G. Multiagent Approach to Controlling

Distributed Computing in a Cluster Grid System // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – Vol. 53. – № 5. – P. 713–722.

7. Hwang C.L., Masud A.S.M. Multiple Objective Decision-Making – Methods and Applications. A State-of-the-Art Survey // Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. – Berlin, Springer-Verlag, 1979. – Vol. 164. – 358 p.

References

1. Basharina O.Yu., Dmitriev V.I., Korsukov A.S., Noskov S.I., Feoktistov A.G. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014, no. 1, available at: <http://www.science-education.ru/115> (accessed 20 August 2015).
2. Basharina O.Yu., Noskov S.I. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*, 2014, no. 1 (41), pp. 70–75.
3. Pospelov D.A. *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika* [Contingency control: theory and practice]. M.: Nauka, 1986, 288 p.
4. Chernorutskiy I.G. *Metody prinyatiya resheniy* [Methods of decision-making]. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005, 416 p.
5. Sholomov L.A. *Logicheskie metody issledovaniya diskretnykh modeley vybora* [Logical research methods of discrete choice models]. M.: Nauka, 1989, 288 p.
6. Bogdanova V.G., Vychkov I.V., Korsukov A.S., Oparin G.A., Feoktistov A.G. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, Vol. 53, no. 5, pp. 713–722.
7. Hwang C.L., Masud A.S.M. *Multiple Objective Decision-Making – Methods and Applications. A State-of-the-Art Survey*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Berlin, Springer-Verlag, 1979, Vol. 164. 358 p.

Рецензенты:

Опарин Г.А., д.т.н., профессор, зам. директора, ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова» СО РАН, г. Иркутск;

Лакеев А.В., д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова» СО РАН, г. Иркутск.