

УДК 004.942

ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ВЫБОРА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Феоктистов А.Г.

ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН»,
Иркутск, e-mail: agf@icc.ru

Статья посвящена актуальным вопросам разработки и применения моделей дискретного многокритериального выбора оптимальных вариантов результатов имитационного моделирования процессов функционирования экологических установок инфраструктурных объектов (ИО), расположенных на побережье оз. Байкал. В качестве базовых правил применяются лексикографический и мажоритарный выбор, а также выбор по Парето. В статье рассматривается адаптация и специализация данных базовых правил применительно к анализу результатов имитационного моделирования. Рассматривается методика проведения оценки результатов моделирования по нескольким критериям на конечном множестве вариантов. Для каждой модели определяется информационная структура, соответствующая конкретному правилу выбора. Такая структура включает условия оптимальности критериев, ограничения на их значения, определение предпочтительности вариантов значений критериев и другую дополнительную информацию, например упорядочение критериев по важности. В качестве иллюстрации применения разработанных моделей рассматривается практическая задача выбора теплонасосных установок для частичной замены малогабаритных котлов на угле, используемых на ИО, с точки зрения максимизации сокращения выбросов углекислого газа и минимизации капитальных вложений. Разработанные модели допускают свое естественное развитие и использование в других предметных областях.

Ключевые слова: экология, теплонасосные установки, моделирование, многокритериальный выбор, дискретные модели

DISCRETE MODELS OF CHOOSING SIMULATION RESULTS OF OPERATING ENVIRONMENTAL EQUIPMENT

Feoktistov A.G.

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Irkutsk, e-mail: agf@icc.ru

The article is devoted to relevant issues of the design and usage of models for discrete multi-criteria choice of best options of simulation modeling results of operating environmental equipment of infrastructure objects on the coast of Lake Baikal. The straightforward rules are lexicographic and majority choice, as well as Pareto choice. Adaptation and specialization of these basic rules to analyze the modeling results are discussed. A technique for evaluating the modeling results according to several criteria on a finite set of options is considered. An information structure corresponding to a specific choice rule is determined for each model. Such a structure includes conditions for the optimality of criteria, restrictions on their values, determination of the preference for the criteria values options, and other additional information, for example, ordering criteria by importance. As an illustration of applying the developed models, the practical problem of choosing heat-pumping equipment to replace small-sized coal-fired boilers used at the objects partially is considered to maximize the reduction of carbon dioxide emissions and minimize capital investments. The developed models allow their effortless evolution and usage in other subject fields.

Keywords: ecology, heat-pumping equipment, modeling, multi-criteria choice, discrete models

В настоящее время пристальное внимание уделяется экологическому мониторингу Байкальской природной территории (БПТ) [1]. Одной из насущных экологических проблем является использование малогабаритных котлов на угле на ИО данной территории [2]. Как правило, большая часть котлов характеризуется достаточно изношенным состоянием. В этой связи их оснащение дополнительным специальным оборудованием, в какой-то степени снижающим вредные выбросы, видится нецелесообразным. Поэтому исследование возможности полной или частичной замены таких котлов на экологически чистые источники тепла является актуальным.

От сжигания ископаемого топлива происходит много видов вредных выбросов

[3–5]. Однако специалисты в области экологии уделяют особое внимание выбросам углекислого газа (CO_2) [6]. Поэтому в статье рассматриваются только такие выбросы и используется методология их оценки, представленная в [7].

Таким образом, одной из практических целей моделирования последствий возможной замены источника тепла является оценка уменьшения выбросов CO_2 от сжигания дизельного топлива или угля. Другим важным критерием являются затраты на теплонасосные установки, их установку и эксплуатацию. При этом существенную роль в процессе принятия решений по выбору модели теплового насоса играет оценка и сравнение вариантов значений вышеупомянутых критериев. Выбирается модель,

для которой вариант значений критериев будет наилучшим в том или ином смысле. На практике специалистами в предметных областях востребованы, как правило, наиболее простые методы выбора, не требующие сбора и анализа большого объема дополнительной информации.

Целью исследования является формализация моделей дискретного многокритериального выбора на конечном множестве вариантов критериев (результатов имитационного моделирования процессов функционирования экологических установок ИО).

Материалы и методы исследования

Пусть имеется n критериев c_1, c_2, \dots, c_n , отражающих характеристики функционирования экологической установки и ее эксплуатации. В качестве таких характеристик могут быть использованы расход энергии, обслуживаемая площадь ИО, надежность работы, сокращение объемов вредных выбросов, стоимость установки, затраты на его эксплуатацию, срок окупаемости и другие показатели. Для каждого критерия указана предпочтительность изменения его значений: $c_j \rightarrow \min$ или $c_j \rightarrow \max, j = \overline{1, n}$. В соответствии с указанной предпочтительностью изменения значений критериев задаются ограничения на допустимые величины этих критериев: $c_{j, \min}$ при $c_j \rightarrow \max, c_{j, \max}$ при $c_j \rightarrow \min$.

Варианты значений критериев c_1, c_2, \dots, c_n представлены матрицей \mathbf{A} размерности $m \times n$. Элемент матрицы a_{ij} содержит значение критерия c_j в i -м варианте, $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$. Таким образом, i -я строка матрицы $\mathbf{A}(i) = (a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n})$ соответствует i -му варианту значений критериев, а j -й столбец матрицы $\mathbf{A}(j) = (a_{1,j}, a_{2,j}, \dots, a_{m,j})$ представляет m вариантов значения j -го критерия.

Правило отбора i -го варианта:

$$\nexists k \in \overline{1, m}: (b_{k,1} = b_{i,1}) \wedge (b_{k,2} = b_{i,2}) \wedge \dots \wedge (b_{k,q} = b_{i,q}) \wedge (b_{k,(q+1)} > b_{i,(q+1)}),$$

$$a_{ij} \geq c_{j, \min} \text{ при } c_j \rightarrow \max, \quad a_{ij} \leq c_{j, \max} \text{ при } c_j \rightarrow \min, \quad i \in \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, k \neq i, q \in \overline{1, n}.$$

Модель мажоритарного выбора. В рамках данного правила выбор вариантов осуществляется по наибольшему числу критериев с наилучшими оценками их значений, содержащимися в варианте. Дополнительная информация не требуется.

Правило отбора i -го варианта:

$$\nexists k \in \overline{1, m}: \sum_{j=1}^n \text{sign}(b_{k,j} - b_{i,j}) > 0,$$

$$a_{ij} \geq c_{j, \min} \text{ при } c_j \rightarrow \max, \quad a_{ij} \leq c_{j, \max} \text{ при } c_j \rightarrow \min, \quad i \in \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, k \neq i.$$

Матрица \mathbf{B} размерности $m \times n$ содержит оценки b_{ij} значений критериев $a_{ij}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$. Данные оценки определяются путем упорядочения значений каждого критерия в разных вариантах по убыванию (возрастанию) при $c_j \rightarrow \min$ ($c_j \rightarrow \max$) и назначения полученных индексов значений в частично-упорядоченном множестве в качестве оценок. Таким образом, наибольшая оценка соответствует наилучшему значению критерия.

Известен широкий спектр традиционных моделей дискретного многокритериального выбора [8, 9]. Зачастую их применение обуславливает необходимость использования информации о важности критериев, их рангах и весах, способах агрегирования и упорядочения, а также других дополнительных сведений [10].

В рамках данного исследования представлены в [11] правила многокритериального выбора, которые характеризуются минимальным объемом дополнительной информации, адаптированы к анализу результатов имитационного моделирования работы экологических установок. В их числе лексикографический и мажоритарный выбор, а также выбор по Парето.

Ниже приведены информационные структуры, описывающие дискретные модели выбора, базирующиеся на вышеупомянутых правилах многокритериального выбора.

Модель лексикографического выбора. Применение данного правила заключается в последовательном сравнении оценок значений критериев рассматриваемого варианта с оценками значений критериев остальных вариантов. Необходимая дополнительная информация состоит в том, что критерии c_1, c_2, \dots, c_n упорядочиваются по степени их важности по убыванию.

Модель выбора по Парето. В Парето-оптимальное множество отбираются варианты, для каждого из которых выполняется следующее условие: нет другого варианта, в котором оценки значений всех критериев больше или равны оценкам значений критериев рассматриваемого варианта, и при этом оценки значений хотя бы одного критерия в сравниваемых вариантах не равны. Дополнительная информация отсутствует.

Правило отбора i -го варианта:

$$\nexists k \in \overline{1, m} : (b_{k,1} \geq b_{i,1}) \wedge (b_{k,2} \geq b_{i,2}) \wedge \dots \wedge (b_{k,n} \geq b_{i,n}) \wedge (\exists q : b_{k,q} \neq b_{i,q})$$

$$a_{ij} \geq c_{j,\min} \text{ при } c_j \rightarrow \max, \quad a_{ij} \leq c_{j,\max} \text{ при } c_j \rightarrow \min, \quad i \in \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, k \neq i, q \in \overline{1, n}.$$

Выбор единственного варианта. Если множество отобранных вариантов содержит $r > 1$ вариантов и необходимо единственное решение, то выполняется процедура сравнения отобранных вариантов с идеальным вариантом. Идеальный вариант e_1, e_2, \dots, e_n формируется из наилучших оценок для каждого критерия по всем вариантам:

$$e_j = \max_{i=1, \overline{m}} b_{i,j}, j = \overline{1, n}.$$

Сравнение реализуется с помощью декартовой метрики:

$$d_l = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e_j - b_{i,j})^2}, l = i_1, i_2, \dots, i_r.$$

Единственное решение i^* находится следующим образом:

$$i^* = \min \left\{ \arg \min_{l=i_1, i_2, \dots, i_r} d_l \right\}.$$

Методика

Основными этапами методики применения дискретных моделей многокритериального выбора являются следующие:

1. Определение критериев c_1, c_2, \dots, c_n .
2. Указание предпочтительности изменения значений критериев: $c_j \rightarrow \min$ или $c_j \rightarrow \max, j = \overline{1, n}$.
3. Задание ограничений на допустимые величины критериев: $c_{j,\min}$ при $c_j \rightarrow \max, c_{j,\max}$ при $c_j \rightarrow \min, j = \overline{1, n}$.
4. Выбор используемой модели.
5. Если указана модель лексикографического выбора, то упорядочение критериев по важности.
6. Выполнение имитационного моделирования и формирование матрицы **A** значений критериев.
7. Нахождение матрицы **B** оценок значений критериев по матрице **A**.
8. Применение модели многокритериального выбора.
9. Если множество отобранных вариантов содержит более одного варианта и необходимо единственное решение, то выпол-

нение процедуры сравнения отобранных вариантов с идеальным вариантом.

Пример

Проблема моделирования работы экологических установок (тепловых насосов) на ИО БПР и подход к процессу ее решения рассмотрены в [12]. Общие результаты расчетов, полученные в процессе изучения работы теплонасосных установок при частичном замещении ими малогабаритных котлов на угле, приведены в [13].

В данном разделе представлены оценки уточненных значений двух критериев c_1 (размер капитальных вложений) и c_2 (сокращение объемов выбросов CO_2) для двенадцати вариантов различных сочетаний моделей тепловых насосов и режимов их эксплуатации, а также результаты применения разработанных моделей дискретного многокритериального выбора по этим оценкам. В частности, в табл. 1 приведены результаты лексикографического выбора при двух способах упорядочения критериев по важности:

1) c_1 и c_2 (столбцы 4–7 табл. 1) представляют соответственно размер капитальных вложений и сокращение объемов выбросов CO_2 ;

2) c_1 и c_2 (столбцы 8–11 табл. 1), наоборот, отражают сокращение объемов выбросов CO_2 и размер капитальных вложений.

В первом случае сравнение вариантов начинается с первого критерия, оценка значения которого в двенадцатом варианте, выделенная зеленым цветом заливки ячейки таблицы, однозначно является лучшей. Во втором случае главным критерием при сравнении вариантов является второй критерий. Наилучшие оценки его значений, выделенные желтым цветом, содержатся во втором и восьмом вариантах. Поэтому для этих вариантов производится дополнительное сравнение по первому критерию, которое показывает преимущество оценки значения данного критерия в восьмом варианте. Найденная оценка выделена зеленым цветом.

Таблица 1

Результаты применения модели лексикографического выбора

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
i	Модель	Режим	$a_{i,1}$, тыс. руб.	$a_{i,2}$, Т	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	$a_{i,1}$, Т	$a_{i,2}$, тыс. руб.	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$
1	1	1	1670,01	130,96	1	5	130,96	1670,01	5	1
2	2	1	1661,30	132,59	2	6	132,59	1661,30	6	2
3	3	1	1600,30	129,90	3	4	129,90	1600,30	4	3
4	5	1	1565,45	103,29	4	2	103,29	1565,45	2	4
4	5	1	1539,31	105,77	5	3	105,77	1539,31	3	5
6	6	1	1504,45	102,68	6	1	102,68	1504,45	1	6
7	1	2	1417,44	130,96	7	5	130,96	1417,44	5	7
8	2	2	1408,73	132,59	8	6	132,59	1408,73	6	8
9	3	2	1347,73	129,90	9	4	129,90	1347,73	4	9
10	4	2	1312,88	103,29	10	2	103,29	1312,88	2	10
11	5	2	1286,74	105,77	11	3	105,77	1286,74	3	11
12	6	2	1251,88	102,68	12	1	102,68	1251,88	1	12

Таблица 2

Результаты применения моделей мажоритарного выбора и выбора по Парето

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
i	Модель	Режим	$a_{i,1}$, Т	$a_{i,2}$, тыс. руб.	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	$l = d_{12}^{i,2}$	$a_{i,1}$, Т	$a_{i,2}$, тыс. руб.	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$	$l = d_p^{i,2}$
1	1	1	130,96	1670,01	5	1	–	130,96	1670,01	5	1	–
2	2	1	132,59	1661,30	6	2	10,00	132,59	1661,30	6	2	–
3	3	1	129,90	1600,30	4	3	–	129,90	1600,30	4	3	–
4	5	1	103,29	1565,45	2	4	–	103,29	1565,45	2	4	–
4	5	1	105,77	1539,31	3	5	–	105,77	1539,31	3	5	–
6	6	1	102,68	1504,45	1	6	–	102,68	1504,45	1	6	–
7	1	2	130,96	1417,44	5	7	–	130,96	1417,44	5	7	–
8	2	2	132,59	1408,73	6	8	4,00	132,59	1408,73	6	8	4,00
9	3	2	129,90	1347,73	4	9	–	129,90	1347,73	4	9	3,61
10	4	2	103,29	1312,88	2	10	–	103,29	1312,88	2	10	–
11	5	2	105,77	1286,74	3	11	–	105,77	1286,74	3	11	3,16
12	6	2	102,68	1251,88	1	12	5,00	102,68	1251,88	1	12	5,00

В табл. 2 показаны результаты применения моделей мажоритарного выбора (столбцы 4–8) и выбора по Парето (столбцы 9–13). Здесь c_1 и c_2 представляют сокращение объемов выбросов CO₂ и размер капитальных вложений. В случае мажоритарного выбора множество отобранных вариантов включает второй, восьмой и двенадцатый варианты. Наилучшие оценки критериев c_1 и c_2 , содержащиеся в этих вариантах, выделены желтым цветом. Так как во всех трех вариантах содержится ровно по одной наилучшей оценке значений критериев, требуется про-

ведение дополнительной процедуры сравнения с идеальным вариантом ($e_1 = 12, e_2 = 6$). Расстояния трех сравниваемых вариантов до идеального представлены в восьмом столбце табл. 2. Наилучшее расстояние выделено зеленым цветом. Оно соответствует восьмому варианту.

В случае выбора по Парето при первичном сравнении отобраны восьмой, девятый, одиннадцатый и двенадцатый варианты. Содержащиеся в них оценки значений критериев показаны желтым цветом. По результатам дополнительного сравнения выбран-

ных вариантов с идеальным одиннадцатый вариант является наилучшим. Соответствующее расстояние (столбец 13 в табл. 2) выделено зеленым цветом.

Таким образом, приведенный выше простой иллюстративный пример показывает достаточную гибкость в применении разработанных дискретных моделей многокритериального выбора в зависимости от целей исследования, значимости критериев и наличия дополнительной информации.

Заключение

Предложены новые модели многокритериального выбора по результатам имитационного моделирования. Применение моделей продемонстрировано на примере выбора тепловых насосов для ИО БПТ с учетом сокращения выбросов CO₂ и финансовых затрат на размещение и эксплуатацию системы отопления с помощью теплового насоса. Возможно развитие и использование разработанных моделей в других предметных областях. Примеры употребления таких адаптированных моделей в процессе решения ряда задач, связанных с исследованием систем энергетики, приведены соответственно в [14, 15].

Исследование проведено при поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 20-47-380002-р_а «Математическое и информационное моделирование инфраструктурных объектов Байкальской природной территории», а также Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах».

Список литературы

1. Бычков И.В., Ружников Г.М., Хмельнов А.Е., Федоров Р.К., Маджара Т.И., Шигаров А.О., Попова А.К. Информационно-телекоммуникационная платформа цифрового мониторинга озера Байкал // Системный анализ и информационные технологии: Труды VIII Международной конференции. М.: Изд-во ФИЦ ИУ РАН, 2019. С. 26–32. DOI: 10.14357/SAIT2019002.
2. Saneev B.G., Ivanova I.Y., Maysyuk E.P., Izhbuldin A.K. The main directions of solving energy-related environmental

problems in the central ecological zone of the Baikal natural territory. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 381. № 1. P. 012082. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012082.

3. Huang Y., Jin B., Zhong Z., Xiao R., Tang Z., Ren H. Trace elements (Mn, Cr, Pb, Se, Zn, Cd and Hg) in emissions from a pulverized coal boiler. Fuel Processing Technology. 2004. Vol. 86. № 1. P. 23–32. DOI: 10.1016/j.fuproc.2003.10.022.

4. Tian H., Wang Y., Xue Z., Qu Y., Chai F., Hao J. Atmospheric emissions estimation of Hg, As, and Se from coal-fired power plants in China, 2007. Science of the Total Environment. 2011. Vol. 409. № 16. P. 3078–3081. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.039.

5. Монгуш Г.Р., Самойло А.С. Исследование реакционной способности углей и их газовых продуктов в процессах термоокислительной деструкции // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 12–2. С. 318–325.

6. Mardani A., Streimikiene D., Cavallaro F., Loganathan N., Khoshnoudi M. Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. Science of the total environment. 2019. Vol. 649. P. 31–49. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.229.

7. Методика расчета выбросов парниковых газов (CO₂-эквивалента). [Электронный ресурс]. URL: <https://sro150.ru/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovyykh-gazov> (дата обращения: 09.01.2022).

8. Gettinger J., Kiesling E., Stummer C., Vetschera R. A comparison of representations for discrete multi-criteria decision problems. Decision support systems. 2013. Vol. 54. № 2. P. 976–985.

9. Herva M., Roca E. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 39. P. 355–371.

10. Majumder M. Multi criteria decision making. Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations. Springer, Singapore, 2015. P. 35–47.

11. Шоломов Л.А. Логические методы исследования дискретных моделей выбора. М.: Наука, 1989. 288 с.

12. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Сидоров И.А., Горский С.А., Башарина О.Ю. Цифровые двойники процессов работы природосберегающего оборудования инфраструктурного объекта // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 1. С. 57–62.

13. Kostromin R., Basharina O., Feoktistov A., Sidorov I. Microservice-Based Approach to Simulating Environmentally-Friendly Equipment of Infrastructure Objects Taking into Account Meteorological Data. Atmosphere. 2021. Vol. 12. № 9–1217. P. 1–24.

14. Черных А.Н., Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Горский С.А., Сидоров И.А., Костромин Р.О., Еделев А.В., Зоркальцев В.И., Аветисян А.И. Смягчение неопределенности при разработке и применении научных приложений в интегрированной среде // Труды ИСП РАН. 2021. Т. 33. № 1. С. 151–172.

15. Бычков И.В., Горский С.А., Еделев А.В., Костромин Р.О., Сидоров И.А., Феоктистов А.Г., Фереферов Е.С., Федоров Р.К. Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода // Известия РАН. Теория и системы управления. 2021. № 6. С. 122–135.