

# Применение метода автоматического принятия решений для построения алгоритма управления многоприводными системами

Р.Б. Лобов<sup>1</sup>, И.Р. Лобов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения 2, Ростов-на-Дону, Россия, 344038

<sup>2</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, Просвещения, 132, Новочеркасск, Россия, 346428

**Аннотация.** Рассматривается возможность применения метода автоматического принятия решений для построения интеллектуальных алгоритмов автоматического управления многоприводными системами. Используется модернизированный метод последовательного сужения векторных оценок. Целью модернизации является сокращение объема вычислений. Приведён алгоритм позволяющий реализовать метод автоматического принятия решений в системе управления.

## 1. Введение

С развитием техники и технологий всё большее распространение получают объекты, имеющие в своём составе многоприводные системы. К таким объектам можно отнести как глобальные инженерные сети (например, инженерные сети жизнеобеспечения городов), так и локальные объекты (электротранспорт и электромобили). Безусловно, управление такими объектами осуществляется автоматическими системами.

В настоящее время системы управления строятся на интеллектуальных технологиях. Это объясняется тем, что только преимущества интеллектуальных технологий способны обеспечить повышение качества управления, учитывая все неопределённости воздействующие на систему. Также причиной является постоянное усложнение самих систем.

Одним из основных аспектов построения технических систем и создания систем управления ими является выбор некоторого оптимального варианта. При этом следует учитывать, что сложная техническая система – это объект, оптимальность которого очень трудно, а зачастую просто невозможно оценить каким – либо одним критерием. Это обстоятельство делает процедуры оптимального выбора вариантов нетривиальной задачей.

Такие задачи в системном анализе принято называть многокритериальными (МКЗ).

подавляющее большинство существующих методик позволяют решить вопрос оптимизации фактически по одному критерию, сводя решение задачи к определению экстремума функции цели. Такой подход не всегда дает адекватное отражение всех характеристик объекта, а значит и оптимизацию по нескольким критериям.

В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность применения методов автоматического принятия решений в системах управления многоприводными объектами, которые дают возможность находить оптимальные решения при оптимизации по нескольким критериям.

## 2. Постановка задачи

В процессе своей работы у любой многоприводной системы существует несколько вариантов действий. При этом результаты таких действий оцениваются по целому ряду критериев. То есть, если поставить целью автоматическое управление упомянутой системой, то должен быть предусмотрен какой-то механизм выбора того или иного варианта [1].

При выявлении системы предпочтений возникают серьезные практические затруднения, состоящие в том, что на практике получить ответы на многие вопросы бывает чрезвычайно трудно. Например, даже сравнительно простой вопрос о значении весовых коэффициентах важности критериев (метод ЭЛЕКТРА), не всегда вызывает адекватную реакцию у эксперта той или иной предметной области.

Попытки получить информацию приводят, как правило, к тому, что сам характер полученной информации вызывает сомнения в своей достоверности, так как мнения экспертов могут быть диаметрально противоположны.

Таким образом, ни одно из известных решающих правил не может быть признано свободным от недостатков, ограничивающих область его применения. Более того, построение универсальных решающих правил, по-видимому, невозможно в принципе. Это объясняется тем, что в зависимости от целей лица принимающего решение (ЛПР) его системы предпочтений и возможностей получения информации о ней могут быть построены различные решающие правила, приводящие к различным упорядочениям множества допустимых решений.

Все сказанное позволяет сделать вывод о том, что основной проблемой рационального выбора варианта решения при проектировании сложных технических систем является:

- наличие большого количества альтернативных решений;
- большое количество показателей качества системы (критериев);
- наличие необходимости для ЛПР задавать, в той или иной форме, свою систему предпочтений (весовые коэффициенты), что зачастую является для последнего чрезмерной нагрузкой [2].

Целью настоящей работы является:

1. Построение решающего правила, максимально свободного от участия в процессе решения системы предпочтений конкретного ЛПР.
2. Построение, эффективной человеко-машинной процедуры, использующей это решающее правило.

## 3. Метод автоматического принятия решений

Задача выбора варианта из некоторого множества возможных, при условии оценки данных вариантов по нескольким критериям, известна, как дискретная многокритериальная задача (ДМКЗ). Задачи подобного типа описаны соответствующей моделью, а именно:

$$M = (T, X, K, S, Y, P, R),$$

где  $M$  – модель задачи принятия решений;  $T$  – постановка (тип) задачи;  $X$  – множество возможных решений (альтернатив);  $K$  – множество критериев;  $S$  – множество шкал критериев;  $Y$  – множество векторных оценок;  $P$  – система предпочтений ЛПР;  $R$  – решающее правило.

Постановка задачи  $T$  определяется целями ЛПР. В зависимости от содержательной постановки задачи может потребоваться, например, найти наиболее предпочтительное решение, или линейно упорядочить множество допустимых решений, выделить множество неподчиненных решений и т.п.

Множество  $X$  представляет собой совокупность решений, которые удовлетворяют в каждой задаче определенным ограничениям и рассматриваются как возможные способы достижения поставленной цели. Множество допустимых решений может быть задано или формируется в ходе исследования.  $X$  называют также допустимыми решениями, стратегиями, альтернативами, вариантами и т.п.. Каждое решение приводит к определенному исходу, последствия которого оцениваются критериями  $k_1, k_2, \dots, k_m$ .

Множество критериев  $K$  в некоторых задачах бывает задано, но обычно оно формируется в процессе исследования. Критериями будем называть такие показатели, которые признаются

ЛПР, важными в отношении поставленной цели, являются общими для всех допустимых решений, и характеризуют общую ценность решения таким образом, что ЛПР стремится получить по ним наиболее предпочтительные решения (т.е. они не могут быть определены в виде ограничений).

Для каждого из критериев должна быть задана или построена шкала, представляющая собой множество оценок с отношением строгого порядка. Шкалы критериев, образующие множество  $S$ , могут быть числовыми и нечисловыми; числовые шкалы могут быть дискретными и непрерывными. Множество  $S$  может содержать шкалы различных типов.

Множеству альтернатив  $X$  может быть поставлено во взаимное однозначное соответствие множество векторных оценок  $Y$ :

если  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , то  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , т.е. каждому  $x$ ,  $x \in X$  соответствует векторная оценка  $y$ ,  $y \in Y$ :

$$X \leftrightarrow Y, x_i \leftrightarrow Y_i, Y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ik}\}, i = 1, \dots, n,$$

где  $y_{ij}$  - оценка  $i$ -й альтернативы по  $j$ -му критерию.

Под системой предпочтений ЛПР  $P$  будем понимать совокупность обычно не формализованных его представлений, связанных с достоинствами и недостатками сравниваемых решений. Предпочтения ЛПР формализуются обычно в ходе специального исследования. В рамках многокритериальной модели система предпочтений описывается совокупностью некоторых множеств с отношениями предпочтения.

Решающее правило  $R$  представляет собой аналитическое выражение, алгоритм или словесную формулировку, позволяющую задать на множестве векторных оценок отношение предпочтения, являющееся порядком. Упорядочение множества  $Y$  с помощью некоторого решающего правила позволяет перейти от высказывания суждения о предпочтениях на множестве  $Y$  к таким суждениям на множестве  $X$ , т.е. позволяет как-то упорядочить множество  $X$ . Решающее правило должно приводить к такому упорядочению множества допустимых решений, которое соответствует содержательной постановке задачи и согласуется с системой предпочтений конкретного ЛПР.

На сегодня известно несколько методов принятия решений:

- Метод идеального варианта,
- метод уступок,
- метод главного критерия,
- построение функции полезности,
- метод ЭЛЕКТРА,
- метод последовательного сужения исходного множества векторных оценок за счет дополнительного объективного критерия (Метод уменьшения векторных оценок). [2,3,6]

Анализ указанных методов говорит о том, что при их неоспоримых достоинствах, все методы имеют существенный недостаток. В конечном итоге принятие решения основывается на мнении ЛПР. Понятно, что такое решение априори субъективно. А значит и вероятность его оптимальности снижается. Существует, и описана [1] методика, в определенном смысле базирующаяся на методе ЭЛЕКТРА, позволяющая в существенной степени уменьшить нагрузку на ЛПР. Это метод последовательного сужения исходного множества векторных оценок за счет дополнительного объективного критерия. В данном случае понятие «объективный критерий» подразумевает совокупностью критериев улучшение по которым является общепринятым в данной предметной области, а не является точкой зрения конкретного ЛПР. В целом оценивая данную методику, можно сказать, что она вполне применима для многокритериального выбора того или иного варианта построения технической системы. Однако и она не лишена определенных недостатков. В частности таковым является большой объем вычислительной процедуры.

Мы предлагаем использовать модернизированный метод последовательного сужения векторных оценок ПСИМВО [3].

#### 4. Алгоритм метода ПСИМВО

1. Формируется таблица исходного множества векторных оценок.

Для системы управления многоприводного объекта множество альтернатив является множеством конфигураций включённого оборудования. Множество альтернатив или допустимых решений  $X$  может быть задано или формируется в ходе исследования и оцениваются критериями  $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m$ .

Как было сказано выше множеству альтернатив  $X$  может быть поставлено во взаимное однозначное соответствие множество векторных оценок  $Y$ .

Отметим, что множество  $Y$  представляется, как правило, в виде прямоугольной матрицы  $(n \times k)$ , где  $n$  – число альтернатив,  $k$  – число критериев.

Такая матрица называется таблицей векторных оценок.

2. Определяется Парето-оптимальное подмножество  $P(Y)$ .

Пусть на множестве альтернатив  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  определены  $k$  скалярных функций  $f_1(x), \dots, f_k(x)$ , представляющих собой критерии оценки качества альтернатив. Будем говорить, что альтернатива  $x_i$  доминирует по Парето альтернативу  $x_j$  если:

$$f_s(x_i) \geq f_s(x_j), s=1, \dots, k$$

и хотя бы одно из этих неравенств является строгим.

Те альтернативы, для которых не существует доминирующих их допустимых альтернатив из множества  $X$ , называются оптимальными по Парето.

Заметим, что каждой альтернативе  $X_i \in X$  ставится в соответствие ее векторная оценка  $y_i \in Y$ , а множеству  $P(X)$  взаимно и однозначно соответствует множество  $P(Y)$ .

3. На множестве  $P(Y)$  строится бинарное отношение для всех пар  $Y_i Y_j$ , т. е. определяются

$$Z_{ij} = (Y_i, Y_j), i=1, n, j=1, n, i \neq j.$$

На всем множестве векторных оценок проводятся их попарные сравнения по соответствующим критериям. Сравнения проводятся для каждой неупорядоченной пары  $Y_i, Y_j$ , т. о. можно говорить о построении на множестве  $P(Y)$  бинарного отношения. Конечным результатом сравнения каждой пары векторных оценок является дробь вида:

$$\frac{\sum q^+}{\sum q^-} \quad (1)$$

где значения весовых коэффициентов:  $q_1, q_2, \dots, q_k; q_i \geq 0, i=1, k$  ( $k$  – количество критериев).

4. На множестве  $Z_{ij}$  строится разбиение вида  $Z = Z^{(1)} + Z^{(2)} + Z^{(f)}$ .

Предположим, что для той или иной таблицы оценок имеет место ситуация вида:

$$\frac{q_{i,t}^+}{q_{i,j}^-} \equiv \frac{q_{k,l}^+}{q_{k,l}^-} \equiv \dots \equiv \frac{q_{s,t}^+}{q_{s,t}^-} \quad (2)$$

Тогда, соответственно  $Z_{ij} \equiv Z_{kl} \equiv \dots \equiv Z_{st}$ . (3)

Последнее делает возможным представить все множество  $Z = \{Z_{12}, Z_{13}, \dots, Z_{1n}, \dots, Z_{(n-1)n}\}$  разбиением вида:

$$Z = Z^{(1)} + Z^{(2)} \dots + Z^{(f)}, \quad (4)$$

где  $Z^{(p)}_{p=1,f} = \{Z_{ij} \in Z \mid Z \equiv Z_{kl} \equiv \dots \equiv Z_{st}\}$ .

При этом, если для любой пары векторных оценок не имеет место тождество вида (3), то соответствующее  $Z^{(p)}$  принимается  $Z^{(p)} = Z_{ij}$ .

Например, пусть для некоторой таблицы оценок  $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3\}$  имеет место ситуация вида  $Z_{12} \equiv Z_{13}$ , тогда множество  $Z$  представляется разбиением:

$$Z = Z^{(1)} + Z^{(2)}, \text{ где } Z^{(1)} = \{Z_{12}, Z_{13}\}, Z^{(2)} = Z_{23}.$$

5. Для разбиения  $Z = Z^{(1)} + Z^{(2)} + Z^{(f)}$  определяются, путем сравнения всех упорядоченных пар на  $Z$ , все случаи линейной зависимости вида  $Z_i > Z_j, Z_i < Z_j$ .

6. При наличии указанных выше зависимостей определяются так называемые запрещенные (невозможные) ситуации.

Например. Пусть имеет место ситуация  $Z^{(1)} > Z^{(2)}$ , тогда при  $Z^{(1)} < 1$  невозможно, чтобы  $Z^{(2)}$  было, например, больше ( $>$ ) 1.

7. По результатам п. 6 настоящего алгоритма строится таблицы бинарных отношений.

В данном случае символы больше, меньше, эквивалентно ( $>$ ,  $<$ ,  $\sim$ ) употребляются в следующем смысле:

$$\begin{aligned} & \text{больше } (>), \text{ когда } Z > 1, \\ & \text{меньше } (<), \text{ когда } Z < 1, \\ & \text{эквивалентно } (\sim), \text{ когда } Z = 1, \end{aligned} \quad (5)$$

8. Далее, к рассмотренной паре  $Z^{(1)}, Z^{(2)}$  добавляется любой элемент из разбиения  $Z^{(1)} + Z^{(2)} \dots + Z^{(f)}$ , например,  $Z^{(3)}$  и идет возврат к п.6 настоящего алгоритма. При этом, что очень важно, соблюдается описанный выше принцип поэтапности. А именно, определяя возможные и невозможные ситуации в тройке  $Z^{(1)}, Z^{(2)}, Z^{(3)}$  нет необходимости вести этот процесс «с нуля», т.е. анализировать все, в данном случае, двадцать семь ситуаций вида  $Z^{(1)} > 1, Z^{(2)} > 1, Z^{(3)} > 1$  и т. п., а сразу брать за основу таблицу, полученную в пункте 7.

9. Рассматривается следующий элемент из  $Z^{(1)} + Z^{(2)} \dots + Z^{(f)}$ , возврат к п. 6, и т. д., до тех пор, пока таблица 3 п. 7 не будет содержать все элементы  $Z^{(1)}, Z^{(2)}, Z^{(f)}$ .

Тогда, с учетом выражений (5), такая таблица однозначно определяет множество возможных бинарных отношений  $W''$ .

10. Для полученного указанным образом множества  $W''$  строится множество орграфов  $G''$  и для каждого из этих орграфов определяется ядро.

11. На всем множестве  $G''$  проверяется условие  $G_j \subset G_i$  с последующим исключением каждой  $j$ -й оценки из рассмотрения.

Описанная здесь процедура позволяет, таким образом, исключать из рассмотрения отдельные векторные оценки по некоторому безусловному (не зависящему от той или иной системы предпочтений) критерию. Причем делается это с учетом условий вида  $Z^{(3)} < Z^{(1)}, Z^{(3)} < Z^{(2)}$ , и за минимальное число шагов.

## 5. Практическое применение

В качестве практического применения метода ПСИМВО рассмотрим систему водоснабжения населённого пункта.

Для упрощения понимания технологических процессов предположим, что система водоснабжения состоит из головной станции ВНС 1 и подкачивающей станции ВНС 2. Такая конфигурация сети водоснабжения в настоящий момент самая распространённая. На каждой станции установлены по три насосных агрегата различной мощности. Потребители включены на магистрали между станциями и после подкачивающей станции ВНС 2.

В связи с тем, что потребление воды в системе водоснабжения величина постоянно меняющаяся, задача системы управления состоит в поддержании некоего заданного давления в целях обеспечения потребителей и недопущения аварийных ситуаций.

Эта задача решается путём своевременного включения и выключения насосного оборудования на ВНС 1 и ВНС 2. Обычно решение по включению и выключению принимает оператор насосной станции. Далеко не всегда принятые решения оптимальны либо своевременны. Это обусловлено многими факторами объективными и субъективными. Одним из них является достаточно большое количество решений. В частности для конфигурации по три насоса на двух станциях, при исключении заведомо не возможных, существует 55 решений. Последствия ошибочных решений – аварии на сети водоснабжения, приносящие существенные потери. Очевидно, человек не в состоянии адекватно, своевременно принимать оптимальные решения по включению или выключению оборудования при наличии такого количества вариантов.

Рассмотрим таблицу исходного множества векторных оценок при описанной выше конфигурации системы (таблица 1). Здесь критериями для сравнения вариантов технических решений являются:

K1 - количество затраченной электроэнергии; K2 - количество включённого оборудования;

K3 - разность максимального и минимального давлений в сети водоснабжения; K4 - время восстановления заданного давления.

Соответственно рейтинговые оценки выставлены с учётом необходимости минимизации этих критериев, причем чем выше оценка, тем лучше решение по данному критерию.

Оценки по критериям давлений в точке «а» и «б» выставлены согласно мнения группы экспертов.

Таблица 1. Исходное множество векторных оценок.

Технические решения			Оценки критериев							
№ п/п	Насосная станция ВНС2			Насосная станция ВНС1			К1	К2	К3	К4
	Н3д	Н2р	Н1о	Н3д	Н2р	Н1о				
1						вкл	12	1	9	4
2					вкл		12	1	9	4
3					вкл	вкл	8	2	17	2
4				вкл			14	1	5	5
5				вкл		вкл	10	2	13	3
6				вкл	вкл		10	2	13	3
7				вкл	вкл	вкл	6	3	21	1
8			вкл			вкл	10	2	7	6
9			вкл		вкл		10	2	7	6
10			вкл		вкл	вкл	6	3	15	4
11			вкл	вкл			12	2	3	7
12			вкл	вкл		вкл	8	3	11	5
13			вкл	вкл	вкл		8	3	11	5
14			вкл	вкл	вкл	вкл	4	4	19	3
15		вкл				вкл	10	2	7	6
16		вкл			вкл		10	2	7	6
17		вкл			вкл	вкл	6	3	15	4
18		вкл		вкл			12	2	3	7
19		вкл		вкл		вкл	8	3	11	5
20		вкл		вкл	вкл		8	3	11	5
21		вкл		вкл	вкл	вкл	4	4	19	3
22		вкл	вкл			вкл	8	3	5	8
23		вкл	вкл		вкл		8	3	5	8
24		вкл	вкл		вкл	вкл	4	4	13	6
25		вкл	вкл	вкл			10	3	1	9
26		вкл	вкл	вкл		вкл	6	4	9	7
27		вкл	вкл	вкл	вкл		6	4	9	7
28		вкл	вкл	вкл	вкл	вкл	2	5	17	5
29	вкл					вкл	10	2	8	5
30	вкл				вкл		10	2	8	5
31	вкл				вкл	вкл	6	3	16	3
32	вкл			вкл			12	2	4	6
33	вкл			вкл		вкл	8	3	12	4
34	вкл			вкл	вкл		8	3	12	4
35	вкл			вкл	вкл	вкл	4	4	20	2
36	вкл		вкл			вкл	9	3	6	7
37	вкл		вкл		вкл		9	3	6	7
38	вкл		вкл		вкл	вкл	5	4	14	5
39	вкл		вкл	вкл			11	3	2	8
40	вкл		вкл	вкл		вкл	7	4	10	6
41	вкл		вкл	вкл	вкл		7	4	10	6
42	вкл		вкл	вкл	вкл	вкл	3	5	18	4
43	вкл	вкл				вкл	9	3	6	7
44	вкл	вкл			вкл		9	3	6	7
45	вкл	вкл			вкл	вкл	5	4	14	5
46	вкл	вкл		вкл			11	3	2	8
47	вкл	вкл		вкл		вкл	7	4	10	6
48	вкл	вкл		вкл	вкл		7	4	10	6
49	вкл	вкл		вкл	вкл	вкл	3	5	10	4
50	вкл	вкл	вкл			вкл	7	4	18	9
51	вкл	вкл	вкл		вкл		7	4	4	9
52	вкл	вкл	вкл		вкл	вкл	3	5	12	7

53	вкл	вкл	вкл	вкл		вкл	5	5	8	8
54	вкл	вкл	вкл	вкл	вкл		5	5	8	8
55	вкл	вкл	вкл	вкл	вкл	вкл	1	6	16	6

Результат работы программы по описанному алгоритму ПСИМВО представлен в таблице 2.

**Таблица 2.** Конечное множество векторных оценок.

Технические решения						Оценки критериев				
№ п/п	Насосная станция ВНС2			Насосная станция ВНС1			К1	К2	К3	К4
	Н3д	Н2р	Н1о	Н3д	Н2р	Н1о				
1						вкл	12	1	9	4
4				вкл			14	1	5	5
25		вкл	вкл	вкл			10	3	1	9
50	вкл	вкл	вкл			вкл	7	4	4	9
55	вкл	вкл	вкл	вкл	вкл	вкл	1	6	16	6

Как видно в данном случае найдено пять оптимальных решений. Принятие окончательного решения осуществляется в режиме диалога оператора с ЭВМ, либо путем моделирования каждого из полученных решений на имеющейся виртуальной системе водоснабжения и определения решения, обеспечивающего минимальное отклонение давления в сети от заданного значения.

## 6. Заключение

В заключении можно сказать, что созданы все предпосылки для использования метода ПСИМВО в системах управления многоприводных объектов. А доведение полученных результатов до уровня готового программного продукта, позволит использовать последний в реальной системе управления.

## 7. Литература

- [1] Лобов, Б.Н. Метод равнозначных критериев и его применение для выбора конструкции дугогасительного устройства / Б.Н. Лобов, С.Л.Белокопытов, Р.А. Ким // Известия вузов. Северо- кавказский регион. Технические науки. – 2004. – Т. 1. – С. 32-36.
- [2] Белокопытов, С.Л. Сужение множества Парето-оптимальных решений с помощью безусловного критерия в задачах векторной оптимизации // Изв. СКНЦ ВШ. Техн. науки. – 1988. – Т. 1. – С. 48-51.
- [3] Абдуллазянов, Э.Ю. Автоматизация выбора технических решений при построении алгоритмов управления системами водоснабжения и водоотведения // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Матер. Всерос. науч.-практ. конф. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – С.403-412.
- [4] Макаров, И.М. Теория выбора и принятия решений: Учебное пособие / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский, В.Б. Соколов – М.: Наука. Главная редакция физико- математической литературы, 1982. – 328 с.
- [5] Аксенов, К.А. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 104 с.
- [6] Макаров, И.М. Интеллектуальные системы автоматического управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
- [7] Шишмарёв, В.Ю. Основы автоматического управления: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 352 с.

# Application of the method of automatic decision-making for the construction of the control algorithm for multi-drive systems

R.B. Lobov<sup>1</sup>, I.R. Lobov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rostov state University of Railways, square of the Rostov Rifle Regiment of the People's Militia 2, Rostov-on-Don, Russia, 344038

<sup>2</sup>Southern Russian state Polytechnic University named after M.I. Platov, Prosveshcheniya str. 132, Novocherkassk, Russia, 346428

**Abstract.** The possibility of using the method of automatic decision-making for the construction of intelligent algorithms for automatic control of multi-drive systems is considered. A modernized method of sequential narrowing of vector estimates is used. The goal of the upgrade is to reduce the amount of computing. The algorithm allowing to implement the method of automatic decision-making in the control system is given.