

УДК 681.5

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ КАСКАДНОЙ САУ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Масютина Г.В.

*ГОУ ВПО «Северо-Кавказский государственный технический университет»,
Ставрополь, Россия, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru*

Рассмотрена методика решения многокритериальной задачи выбора рационального варианта каскадной САУ в условиях неопределенности. В основу методики положены систематизация критериев и системных требований к САУ по различным группам и метод анализа иерархий. Для обоснованного представления альтернатив и их ранжирования составлены перечень критериев и оценочные шкалы. Программная реализация разработанной методики осуществлена в среде табличного процессора MS Excel и может быть легко интегрирована в существующие системы информационной поддержки процесса принятия решений.

Ключевые слова: многокритериальная задача выбора, каскадная система, управление, качественная и количественная информация

Повышение требований к системам автоматического управления (САУ), совершенствование принципов их построения, настоятельная необходимость учитывать большое (и всевозрастающее) число критериев и ограничений влечет за собой необходимость совершенствования методов разработки и принятия решений в задаче оценки и выбора структур САУ. Но поскольку в это число критериев входит немало факторов качественных, напрямую количественно не описываемых, то следует, во-первых, говорить о необходимости решения задачи на основе неполной, неточной и нечеткой информации, т.е. в условиях неопределенности, а во-вторых, о необходимости сужения по возможности числа рассматриваемых альтернатив.

В условиях неопределенности данная задача может быть сведена к задаче многокритериального сравнения и выбора структур систем на основе анализа содержательной (качественной и количественной) информации о перечне ранжируемых критериев и шкал. Практически всегда при проек-

тировании нельзя описать строгое предпочтение выбора какого-то из вариантов САУ, так как этот выбор зависит от очень большого числа трудно учитываемых и плохо формализуемых факторов. Но в противоположность этому можно формализовать нестрогие предпочтения, используя шкалу оценки интенсивности относительной важности [4].

Проведенный анализ схем и свойств каскадных САУ показал, что одним из наиболее эффективных средств решения задач управления сложными объектами и процессами является использование нечетких регуляторов и многослойных нейронных сетей (НС) прямого распространения в качестве регуляторов внешнего и внутреннего контуров системы. На сегодняшний день предложено достаточно много различных схем включения этих регуляторов в контуры каскадной САУ и разнообразных законов регулирования (алгоритмов управления). Примером может служить использование модифицированных позиционных регуляторов на основе аппроксимирующих нелинейных функций

(АНФ-регуляторов) [2], так называемых «нечетких» ПИД-регуляторов [3], интеллектуальных ПИД-регуляторов, настраиваемых с помощью многослойных нейронных сетей (НС) путем привнесения дополнительной гибкости в соотношение их настроечных параметров за счет использования нелинейных свойств НС [5, 6], и др. В связи с этим большое значение приобретает задача сравнения и выбора таких структур САУ, которая удовлетворяла бы комплексу требований относительно качества проектирования, реализации и функционирования.

Целью данной работы является рассмотрение многоэтапной методики сравнения, оценки и выбора рациональной структуры каскадных САУ с модифицированными позиционными, нечеткими и нейросетевыми регуляторами в контурах системы на основе последовательного применения иерархических моделей принятия решений для каждого из этапов. В основу методики положены систематизация критериев и системных требований к САУ по различным группам и метод анализа иерархий [4]. Этот метод основан на парных сравнениях альтернативных вариантов по различным критериям с использованием девятибалльной шкалы и последующим ранжированием набора альтернатив по всем критериям и целям.

Следует иметь в виду, что количество альтернативных вариантов очень быстро растет с увеличением числа элементов каждого уровня иерархической сети. Анализ большого количества альтернативных вариантов является одной из наиболее сложных проблем при проектировании систем. В качестве пути разрешения этой проблемы предлагается рассчитывать вектор приоритетов дважды: на первом этапе для выбора предпочтительной группы критериев, а затем, на втором этапе, для оценки приоритетов каждого критерия, выделенного из выбранных групп, и глобального вектора

приоритетов, количественно характеризующих сравниваемые варианты и определяющие наилучший вариант системы как вариант с максимальным значением глобального вектора приоритетов. Применяя поэтапную процедуру, можно сузить число альтернатив путем критериального отбора уже на первом этапе, определяемого требованиями к системе и содержанием рассматриваемой задачи.

С точки зрения системного подхода к процессу проектирования САУ были выделены следующие группы критериев: группа критериев Г1, характеризующих функциональные качества работы систем управления; группа критериев Г2, характеризующих технологические и производственные аспекты создания систем управления и их реализацию; группа критериев Г3, характеризующих сложность реализуемых законов (алгоритмов) управления на объекте; группа критериев Г4, группа критериев Г5, характеризующих способность интегрируемости разрабатываемых систем в действующие схемы управления, и др. Пользуясь шкалой относительной важности [4], была получена матрица попарных сравнений для отмеченных групп критериев, после чего было проверено, насколько суждения при составлении матрицы попарных сравнений групп были непротиворечивы. Для проверки однородности суждений используется индекс согласованности (ИС) [4]. Используя вычисленное максимальное собственное значение $\lambda_{\max} = 5,283136$, имеем

$$\begin{aligned} \text{ИС} &= (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (5,283136 - 5) / 4 = \\ &= 0,070784. \end{aligned}$$

Разделив ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы пятого порядка, равного 1,12, получим отношение согласованности $\text{ОС} = 6,32\%$. Величина отношения согласованности является приемлемой ($\text{ОС} < 10\%$), а значит, необходимости в пересмотре суждений нет.

Определяем оценки компонент собственного вектора. Так, для группы Г1 эта оценка составит: $(1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 9)^{1/5} = 3,277165$. Получив сумму оценок собственных векторов (7,083444), находим нормализованные оценки вектора приоритетов для каждой группы критериев, разделив значение оценки собственного вектора на эту сумму. Так, для группы критериев Г1 имеем $3,277165/7,083444 = 0,462651$. Сравнивая нормализованные оценки вектора приоритетов, можно сделать вывод, что наиболее значимыми в нашем случае являются критерии группы Г1, характеризующие функциональные качества работы систем управления (значение вектора приоритета –

0,462651). Затем следуют критерии группы Г2, характеризующие реализацию систем и технологические и производственные аспекты создания систем управления (значение вектора приоритета – 0,268747).

Далее, на втором этапе, из групп Г1 и Г2 выделяем наиболее существенные критерии. Альтернативные варианты САУ в рассматриваемой задаче и выделенные критерии качественного содержания для сравнения каскадных САУ приведены в табл. 1 и 2 соответственно. При выработке альтернатив и характеристик критериев использованы результаты собственных исследований САУ и результаты работы [5].

Таблица 1

Альтернативы САУ

№	Обозначение	Структура САУ
1	2	3
1	П-АНФ	Тип регулятора внутреннего контура – пропорциональный регулятор (П-регулятор); тип регулятора внешнего контура – аппроксимированный нелинейный функциональный регулятор (АНФ-регулятор) [2]
2	П-АНФ(НЛ) с одной базой правил	Тип регулятора внутреннего контура – пропорциональный регулятор (П-регулятор); тип регулятора внешнего контура – аппроксимированный нелинейный функциональный регулятор (АНФ-регулятор) с коррекцией настроечного параметра на основе нечеткой логики (НЛ)
3	АНФ-НСР	Тип регулятора внутреннего контура – аппроксимированный нелинейный функциональный регулятор (АНФ-регулятор); тип регулятора внешнего контура – нейросетевой регулятор (НСР): тип сети – многослойная сеть прямого распространения; число нейронов в скрытом слое – 9; активационная функция нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс; активационная функция выходного слоя – линейная. Ошибка обучения $E=3 \cdot 10^{-9}$.
4	П-АНФ(НЛ) с двумя базами правил	Тип регулятора внутреннего контура – пропорциональный регулятор (П-регулятор); тип регулятора внешнего контура – аппроксимированный нелинейный функциональный регулятор (АНФ-регулятор) с нечеткой логикой (НЛ) и переключаемыми базами правил

1	2	3
5	НСР1-НСР2	<p>Тип регулятора внутреннего контура – нейросетевой регулятор (НСР1): тип сети – многослойная сеть прямого распространения; число скрытых слоев – 2; число нейронов в скрытом слое – 4; активационная функция нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс; активационная функция выходного слоя – пороговая, ступенчатая. Ошибка обучения $E=3,98 \cdot 10^{-8}$.</p> <p>регулятор; тип регулятора внешнего контура – нейросетевой (регулятор НСР2): тип сети – многослойная сеть прямого распространения; число нейронов в скрытом слое – 11; активационная функция нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс; активационная функция выходного слоя – линейная. Ошибка обучения $E=4,89 \cdot 10^{-8}$</p>

Формирование перечня критериев дает возможность получить оценки для всех анализируемых структур САУ по каждому критерию. Заметим, что приведенные оценки учитывают кроме количественных

свойств слабоформализуемые свойства САУ, т.е. качественную информацию, с использованием которой экспертным порядком назначаются числовые коэффициенты важности (экспертные оценки $\mathcal{E}_p, p=1, \dots, 9$).

Таблица 2

Характеристика критериев сравнения структур каскадной САУ

Наименование критерия	Структура каскадной САУ «регулятор внутреннего контура-регулятор внешнего контура»				
	П-АНФ	П-АНФ(НЛ) с одной базой правил	АНФ-НСР	П-АНФ(НЛ) с двумя базами правил	НСР1-НСР2
1	2	3	4	5	6
Возможность работы без априорного задания математической модели объекта управления (К1)	ограничена	имеется	имеется, однако требуется предварительно выбрать и обучить нейронную сеть	имеется	имеется, однако требуется предварительно выбрать и обучить нейронную сеть
Вычислительная сложность реализуемых законов (алгоритмов) управления на объекте (К2)	минимальная	невысокая	высокая	невысокая	высокая
Степень робастности (К3)	низкая	средняя	высокая	высокая	очень высокая
Степень адаптивности (К4)	низкая	средняя	высокая	высокая	очень высокая
Сглаживание управляющего воздействия (К5)	плохое	плохое	наилучшее	плохое	хорошее

Матрица парных сравнений для критериев, которая представляет собой второй уровень иерархии, приведена в табл. 3. Для матрицы табл. 3 были вычислены

вектор приоритетов, максимальное собственное значение λ_{max} , индекс согласованности ИС и отношение согласованности ОС:

$$ИС = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) = (5,111782 - 5) / 4 = 0,029456;$$

$$ОС = 0,029456 / 1,12 = 2,63 \%$$

Так как полученное ОС < 10%, то нет необходимости пересматривать сужде-

ния. Далее переходим к парным сравнениям на нижнем уровне.

Таблица 3

Числовые оценки матрица попарных сравнений для критериев

Критерий	Возможности работы без априорного задания модели К1	Вычислительная сложность К2	Степень робастности К3	Степень адаптивности К4	Сглаживание управляющего воздействия К5	Оценки компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
Возможности работы без априорного задания модели К1	1	1	3	2	7	2,111786	0,332358
Вычислительная сложность К2	1	1	3	5	5	2,371441	0,373223
Степень робастности К3	1/3	1/3	1	1	3	0,802742	0,126337
Степень адаптивности К4	1/2	1/5	1	1	2	0,724780	0,114067
Сглаживание управляющего воздействия К5	1/7	1/5	1/3	1/2	1	0,343207	0,054015
$\lambda_{max} = 5,1178;$	ИС = 0,02945; ОС=2,63 % Сумма:					6,353955	

Поскольку имеется пять критериев на втором уровне и пять вариантов САУ, получаем пять матриц суждений размерностью 5x5, которые попарно сравниваются по каждому из критериев. Для наглядности в табл. 4

приведены числовые оценки матрицы попарных сравнений для критерия «Возможности работы без априорного задания модели». Аналогично были построены матрицы сравнений для остальных четырех критериев.

Таблица 4

Числовые оценки матрицы попарных сравнений для критерия «Возможности работы без априорного задания модели»

	П-АНФ	П-АНФ(НЛ) П-АНФ(НЛ) с одной базой правил	АНФ-НСР	П-АНФ(НЛ) с двумя базами правил	НСР1-НСР2	Оценки компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
П-АНФ	1	1/3	1/5	1/9	1/9	0,241593	0,032795
П-АНФ(НЛ) с одной базой правил	3	1	1/5	1/3	1/7	0,491119	0,066667
АНФ-НСР	5	5	1	1	1/3	1,528142	0,207439
П-АНФ(НЛ) с двумя базами правил	9	3	1	1	1/3	1,551846	0,210657
НСР1-НСР2	9	7	3	3	1	3,553993	0,482441
ОС = 3,75%	Сумма:					7,366693	

Для обнаружения несогласованности полученных матриц третьего уровня также были рассчитаны максимальное собственное значение λ_{\max} , индекс согласованности и отношение согласованности. Отношение согласованности для матриц парных сравнений третьего уровня составило: по критерию $K_1 - 3,75\%$; $K_2 - 6,14\%$; $K_3 - 6,31\%$; $K_4 - 4,13\%$; $K_5 - 2,43\%$. Полученные значения ОС приемлемы, и, следовательно, пересмотра суждений для улучшения согласованности не требуется.

Подсчитываем значения глобального приоритета для каждой из альтернатив как сумму произведений значения вектора приоритета для критерия и значения вектора локального приоритета этой альтернативы в отношении данного критерия.

Например, для альтернативы «НСР1-НСР2», используя значения последнего столбца табл. 3 и значения первой строки табл. 5, получаем:

$$0,332358 \cdot 0,482441 + 0,373223 \cdot 0,476283 + 0,126337 \cdot 0,496160 + 0,114067 \cdot 0,338647 + 0,054015 \cdot 0,273858 = 0,454207.$$

Полученные векторы приоритетов по каждому критерию сведены в табл. 5, из которой следует, что максимальное значение глобального приоритета имеет САУ со структурой «НСР1-НСР2». Следовательно, данная САУ превосходит остальные аналоги по основным характеристикам и является оптимальной в смысле значимости экспертных оценок.

Таким образом, проведенная систематизация критериев и выделение на ее основе характерных критериев (показателей), отражающих системные связи и закономерности функционирования классических и интеллектуальных САУ, способствуют сокращению альтернативных вариантов, обеспечивая при этом рациональное решение многокритериальной задачи

выбора структуры каскадных САУ в условиях неопределенности. Программная реализация разработанной методики осуществлена в среде табличного процессо-

ра MS Excel и может быть легко интегрирована в существующие системы информационной поддержки процесса принятия решений.

Таблица 5

Числовые значения матрицы глобальных приоритетов

Альтернативы	Критерии					Глобальные приоритеты
	Возможности работы без априорного задания модели К1	Вычислительная сложность К2	Степень робастности К3	Степень адаптивности К4	Сглаживание управляющего воздействия К5	
	Численное значение вектора приоритета					
	0,332358	0,373223	0,126337	0,114067	0,054015	
П-АНФ	0,032795	0,042174	0,030479	0,032255	0,040347	0,036349
П-АНФ(НЛ) с одной базой правил	0,066667	0,055648	0,051798	0,089085	0,074717	0,063668
АНФ-НСР	0,207439	0,228121	0,209753	0,285859	0,372671	0,233321
П-АНФ(НЛ) с двумя базами правил	0,210657	0,197774	0,211810	0,254154	0,238407	0,212455
НСР1-НСР2	0,482441	0,476283	0,496160	0,338647	0,273858	0,454207

Список литературы

1. Васильев В.И. Нейроуправление – новый раздел теории управления сложными системами / В.И. Васильев, С.В. Пантелеев // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – 2005. – №5. – С. 33-45.
 2. Лубенцов В.Ф. Исследование динамики систем с непрерывными аппроксимирующими функциями управления // Наука и технологии. Ч.2. – М.: РАН, 2005. – С. 469-476.
 3. Макаров И.М. Новое поколение интеллектуальных регуляторов // Приборы и системы управления. – 1997. – № 3. – С. 2-6.
 4. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
 5. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2 / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф.; пер. с англ. Н.В. Батина;

под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР. 2000. – 272 с.

6. Scott G.M., Shavlik J.W., Ray W.H. Refining PID controllers using neural nets // In: Advances in Neural Information Processing Systems / Eds. J.E Moody, S.J. Hanson, R.P. Lippmann.– San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1992. – P. 555-562.

Рецензенты:

Лубенцов Валерий Федорович, д.т.н., профессор кафедры «Информационные системы, электропривод и автоматика» Невинномысского технического института Министерства образования и науки РФ;
 Мочалов Валерий Петрович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ГОУ ВПО «Северо-Кавказский государственный технический университет» Минобрнауки РФ.

THE METHOD OF DECISION OF MULTICRITERION TASK OF CHOICE VARIANT OF CASCADE SAU IN THE CONDITIONS OF VAGUENESS

Masyutina G.V.

*North Caucasus State Technical University, Stavropol, Russia,
e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru*

The method of decision of multicriterion task of choice of rational variant of cascade SAU in the conditions of vagueness. In basis of method laid systematization of criteria and system requirements to SAU on different groups and method of analysis of hierarchies. For the grounded presentation of alternatives and their ranging the list of criteria and rating scales. Software implementation of the developed technique implemented in the environment table processor MS Excel and can be easily integrated into existing systems of information support for decision-making process.

Keywords: multicriterion task of choice, cascade system, control, the qualitative and quantitative information