

## СРАВНЕНИЕ И ВЫБОР СТРУКТУРЫ КАСКАДНЫХ САУ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов (НТИ СевКавГТУ)

*Рассмотрена методика решения многокритериальной задачи выбора рационального варианта каскадной САУ в условиях неопределенности. В основу методики положена 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 все возрастающее) число критериев и ограничений влечет за собой необходимость совершенствования методов выработки и принятия решений в задаче оценки и выбора структур САУ. 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 проектировании нельзя описать строгое предпочтение выбора какого-то из вариантов, 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 [1].

На сегодняшний день предложено достаточно много как различных схем включения регуляторов в контуры каскадной САУ, так и разнообразных законов регулирования (алгоритмов управления), вплоть до так называемых "нечетких" ПИД-регуляторов [2], 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 [3,4,5], модифицированных позиционных (релейных) регуляторов [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.

В данной работе рассмотрена многоэтапная методика 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 [1]. 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 число альтернативных вариантов очень быстро растет с увеличением числа элементов каждого уровня иерархической сети. Анализ большого числа альтернативных вариантов является одной из наиболее сложных проблем проектирования систем. В качестве пути разрешения этой проблемы рассматривается решение задачи в несколько этапов. Для этого потребовалось рассчитывать вектор приоритетов дважды: на первом этапе для выбора предпочтительной группы критериев, на втором — для оценки приоритетов каждого критерия, выделенного из выбранных групп, и глобального вектора приоритетов, количественно характеризующих сравниваемые варианты. Наилучший вариант системы определяется как вариант с максимальным значением глобального вектора приоритетов. Применяя поэтапную процедуру, можно сузить число альтернатив путем критериального отбора уже на первом этапе, определяемом требованиями к системе и содержанием рассматриваемой задачи.

С точки зрения системного подхода к процессу проектирования САУ выделим следующие группы критериев:

- Г1, характеризующих функциональные качества работы систем управления (точность, степень робастности и адаптивности, функциональная живучесть и помехозащищенность, динамические качества (устойчивость, быстродействие), возможность работы без априорного задания математической модели объекта управления, сглаживание управляющего воздействия, допустимый диапазон внешних условий, структурная надежность и т. д.);
- Г2, характеризующих технологические и производственные аспекты создания систем управления и их реализацию (аппаратное исполнение, ПО, модульность, вычислительная сложность, затраты и др.);
- Г3, характеризующих сложность реализуемых законов (алгоритмов) управления на объекте (способы настройки параметров регулятора на объекте, число настроечных параметров, возможности автоподстройки регуляторов, самонастройка, взаимное влияние настроечных параметров и др.);
- Г4, характеризующих способности системы обеспечить достижение целевой функции задачи управления (стандартная оценка качества, модифици-

Таблица 1. Числовые оценки матрицы попарных сравнений для групп критериев

Группа критериев	Группа Г1	Группа Г2	Группа Г3	Группа Г4	Группа Г5	Оценка компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
Г1	1	3	2	7	9	3,277165	0,462651
Г2	1/3	1	3	5	5	1,903654	0,268747
Г3	1/2	1/3	1	4	3	1,148698	0,162167
Г4	1/7	1/5	1/4	1	2	0,427544	0,060358
Г5	1/9	1/5	1/3	1/2	1	0,326383	0,046077
					Сумма	7,083444	

Таблица 2. Альтернативы САУ

№	Обозначение	Структура САУ
1	П-АНФ	Тип регулятора внутреннего контура – пропорциональный регулятор (П регулятор); тип регулятора внешнего контура – аппроксимированный нелинейный функциональный регулятор (АНФ-регулятор) [6].
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 $E=3 \times 10^{-9}$ .
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.
5	НСР1-НСР2	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 $E=3,98 \times 10^{-8}$ . 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 $E=4,89 \times 10^{-8}$ .

Таблица 3. 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
Возможность работы без априорного задания математической модели объекта управления (K1)	ограничена	имеется	имеется, но требуется предварительно выбрать и обучить нейронную сеть	имеется	имеется, но требуется предварительно выбрать и обучить нейронную сеть
Вычислительная сложность реализуемых законов (алгоритмов управления на объекте (K2)	минимальная	невысокая	высокая	невысокая	высокая
Степень робастности (K3)	низкая	средняя	высокая	высокая	очень высокая
Степень адаптивности (K4)	низкая	средняя	высокая	высокая	очень высокая
Сглаживание управляющего воздействия (K5)	плохое	плохое	наилучшее	плохое	хорошее

рованная (улучшенная) оценка качества, экстремум целевой функции и т.д.);

-Г5, характеризующих способность интегрируемости в действующие схемы управления (модификация действующих систем управления, построение новых систем управления, дополнение к существующим (одноконтурным) системам управления и т.д.);

-Г6, характеризующих рациональную область решаемых задач в условиях неопределенности (задача стабилизации (регулирования), программного управления, слежения, стабилизации и программного управления быстрыми процессами и т.д.);

-Г7, характеризующих технологические и производственные аспекты создания систем управления

(стоимость, время разработки, технологичность, модульность разработки и степень унификации и т. д.);

-Г8, характеризующих эксплуатационные свойства систем (способ изменения режима управления: автоматический, каскадный, ручной, удобство регулятора в обслуживании и т.д.).

Выбираем на первом этапе решения задачи первые пять групп критериев Г1-Г5 (табл. 1). При этом предполагается, что отобранные группы содержат критерии, достаточно хорошо описывающие систему, а их состав и число достаточны для принятия обоснованного решения. Пользуясь шкалой относительной важности [1], заполняем табл. 1, для чего значения из шкалы вписываем в ячейки, образованные пересече-

Таблица 4. 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
1	2	3	4	5	6	7	8
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; ОтС=2,63 %.				Сумма:	6,353955	

нием соответствующей строки и столбца. Очевидно, что диагональ этой матрицы будет заполнена значением "1", а ячейки, лежащие ниже диагонали, будут заполнены обратными значениями. Например, при выборе высококачественной САУ первая группа критериев Г1, характеризующих функциональные качества работы системы, имеет очень сильное превосходство перед группой критериев Г5, поэтому в ячейке на пересечении строки "Группа Г1" и столбца "Группа Г5" записываем цифру "9".

После заполнения матрицы необходимо проверить, насколько суждения при составлении матрицы попарных сравнений групп были непротиворечивы. Для проверки однородности суждений в методе анализа иерархий используется индекс согласованности (ИС) [1]:

$$ИС = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1),$$

где  $\lambda_{\max}$  – наибольшее собственное значение обратно симметричной матрицы;  $n$  – число столбцов и строк матрицы.

Максимальное (наибольшее) собственное значение  $\lambda_{\max}$  определяется по формуле [1]:

$$\lambda_{\max} = R_1 \cdot \sum_{i=1}^n W_{i1} + R_2 \cdot \sum_{i=1}^n W_{i2} + \dots + R_j \cdot \sum_{i=1}^n W_{ij} + \dots + R_n \cdot \sum_{i=1}^n W_{in},$$

$$R = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n W_{jj}} \times \left( \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n W_{ij}} \right)^{-1}$$

где  $i$  – индекс строки матрицы  $M$ ;  $j$  – индекс столбца матрицы  $M$ ;  $W_{ij}$  – экспертные оценки.

Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности (СС), получим отношение согласованности (ОтС) [1]

$$ОтС = ИС / СС,$$

где СС – случайная согласованность, равная 1,12 для случайным образом составленной матрицы парных

сравнений размерностью 5x5 на основе экспериментальных данных, полученных в работе [1].

Показатель ОС характеризует согласованность множества субъективных оценок, полученных способом парного сравнения и представленных в виде отношения предпочтения сравниваемых свойств. Если значение  $ОС < 10\%$  [1], то мера согласованности находится на приемлемом уровне, а по исходным данным могут быть получены решения. Если  $ОС > 10\%$ , то исходная информация недопустимо искажена лицом, принимающим решение, (противоречивость информации выше нормы). В этом случае принятые решения будут характеризоваться большой неточностью и очень низким качеством. Следовательно, требуется пересмотр исходной информации или привлечение дополнительных источников ее получения, чтобы улучшить однородность.

Рассчитаем ИС в данном случае. Используя вычисленное максимальное собственное значение  $\lambda_{\max} = 5,283136$ , имеем  $ИС = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (5,283136 - 5) / 4 = 0,070784$ . Разделив ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы пятого порядка, равное 1,12, получим  $ОтС = 6,32\%$ . Величина отношения согласованности является приемлемой ( $ОС < 10\%$ ), 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. Для той же группы критериев Г1 имеем  $3,277165 / 7,083444 = 0,462651$ . Сравнивая нормализованные оценки вектора приоритетов, можно сделать вывод (табл. 1), 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

Таблица 5. Числовые оценки матрицы попарных сравнений для критерия "Возможности работы без априорного задания модели"

	П-АНФ	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
Отс = 3,75 %	Сумма:					7,366693	

Таблица 6. 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

производственные аспекты создания систем управления (значение вектора приоритета – 0,268747).

Далее, на втором этапе из групп Г1 и Г2 выделяем наиболее существенные критерии. 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, то есть качественную информацию, с использованием которой экспертным порядком назначаются числовые коэффициенты важности (экспертные оценки  $\mathcal{E}_i$ ,  $i = 1, \dots, 9$ ). Альтернативные варианты САУ в рассматриваемой задаче и выделенные критерии качественного содержания для сравнения каскадных САУ приведены в табл. 2 и 3 соответственно. При выработке альтернатив и характеристик критериев использованы результаты собственных исследований САУ [6] и результаты работы [7].

Матрица парных сравнений, которая представляет собой второй уровень иерархии, приведена в табл. 4. Для матрицы табл. 4 были вычислены вектор приоритетов, максимальное собственное значение  $\lambda_{\max}$ , ИС и  $OmC$ :

$$\begin{aligned}
 IS &= (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = \\
 &= (5,111782 - 5) / 4 = 0,029456; \\
 OmC &= 0,029456 / 1,12 = 2,63 \%.
 \end{aligned}$$

Так как полученное  $OmC < 10 \%$ , то нет необходимости пересматривать суждения. Далее переходим к парным сравнениям на нижнем уровне.

Поскольку имеется пять критериев на втором уровне и пять САУ, получаем пять матриц суждений

размерностью 5x5, которые попарно сравниваются по каждому из критериев. Для наглядности в табл. 5 приведены числовые оценки матрицы попарных сравнений для критерия "Возможности работы без априорного задания модели". Аналогично были построены матрицы сравнений для остальных критериев.

Для обнаружения несогласованности полученных матриц третьего уровня также были рассчитаны максимальное собственное значение  $\lambda_{\max}$ , ИС и  $OmC$ . Отношение согласованности для матриц парных сравнений третьего уровня составило: по критерию К1 – 3,75 %; К2 – 6,14 %; К3 – 6,31 %; К4 – 4,13 %; К5 – 2,43 %. Полученные значения  $OmC$  приемлемы и, следовательно, пересмотра суждений для улучшения согласованности не требуется. Полученные матрицы позволяют рассчитать коэффициенты важности соответствующих элементов иерархического уровня. Для этого были вычислены собственные векторы матриц, а затем они были пронормированы. Учитывая степень важности каждого из критериев и числовые оценки САУ в отношении каждого из критериев, получаем оптимальный вариант. Для этого для каждой из альтернатив заполняем столбцы критериев значениями локальных векторов приоритета.

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 по-

следного столбца табл. 4 и значения первой строки табл. 6, 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. 6, из которой следует, что максимальное значение глобального приоритета имеет нейросетевая САУ со структурой "НСР1-НСР2". Следовательно, данная САУ превосходит остальные аналоги по оцениваемым в данной работе характеристикам. Возможность применения нейросетевых и нечетких систем управления для решения задач управления, связанных с существенными нелинейностями, высказанная во многих работах [7], наряду с другими преимуществами обеспечила для этих САУ высокие значения глобального приоритета, что подтверждено результатами данной работы.

Таким образом, предложенная методика сравнения и выбора САУ отличается простотой и дает хорошее соответствие интуитивным представлениям. 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 сравнения и выбора структуры каскад-

ных САУ сложными динамическими объектами в условиях неопределенности. Программная реализация разработанной методики осуществлена в среде табличного процессора MS Excel и может быть легко интегрирована в существующие системы информационной поддержки процесса принятия решений.

#### Список литературы

1. *Саати Т.Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1993.
2. *Макаров И.М. и др.* Новое поколение интеллектуальных регуляторов // Приборы и системы управления. 1997. № 3.
3. *Васильев В.И., Пантелеев С.В.* Нейроуправление – новый раздел теории управления сложными системами // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2005. № 5
4. *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.
5. *Jones A.H.* Genetic tuning of non-linear PID-controllers // In: Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms. Proc. of the Int. Conf. in Ales, France, 1995 / Eds. D.W. Pearson, N.C. Steele, R.F. Albrecht). Wien: Springer Verlag, 1995.
6. *Лубенцов В.Ф.* Исследование динамики систем с непрерывными аппроксимирующими функциями управления // Наука и технологии. Ч.2. М.: РАН, 2005.
7. *Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф.* Нейроуправление и его приложения. Кн. 2 / Пер. с англ. Н.В. Батина. Под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. М.: ИПРЖР. 2000.

*Лубенцов Валерий Федорович – д-р техн. наук, проф.,*

*Масюткина Галина Владимировна – аспирант каф. "Информационные системы, электропривод и автоматика" Невинномысского технологического института ГОУ ВПО "Северо-Кавказский государственный технический университет", Контактные телефоны: (86554) 7-17-32, 6-94-44. E-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru*

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА МАРКИ МАТЕРИАЛА ДЛЯ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ

**Э.В. Лазарсон (Пермский государственный технический университет)**

*Рассмотрены принципиальные вопросы автоматизированного выбора марки материала для сварной конструкции. Названы особенности задачи выбора и пути ее решения. Предлагаемые методы пояснены с помощью примера.*

*Ключевые слова: сварная конструкция, выбор материала, автоматизация.*

### Особенности задачи выбора материала для сварной конструкции

Выбор материала изделия производится на начальной стадии его проектирования и поэтому оказывает влияние на большинство принимаемых в дальнейшем проектных решений. В данном вопросе конструктор руководствуется нормативной документацией, справочной и иной литературой. Во многих источниках информации приводятся данные о различных свойствах материалов, вопросы же применения их рассматриваются недостаточно обстоятельно. Типичным, например, является указание областей применения, общих для нескольких марок, или рекомендации самого общего плана.

Большинство сварных конструкций изготавливается из сталей. Выбор марки стали для конкретного

случая затруднен рядом обстоятельств, а именно, существованием обширной номенклатуры сталей, многие из которых взаимозаменяемы; необходимостью согласованного учета свойств стали, условий производства и требований, предъявляемых к сварной конструкции.

Поскольку конструктор должен указать в документации одну определенную марку материала, он неизбежно сталкивается с проблемой выбора из нескольких альтернатив, требующего анализа и сопоставления разнообразных свойств материалов. Повышенную сложность для случая проектирования сварных конструкций создают определенные требования к свариваемости материалов. Последняя, в свою очередь, сама является комплексной характеристикой, зависящей от многих факторов.