УДК 519.8

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

В. А. Зеленцов,
доктор техн. наук, профессор
А. Н. Павлов,
канд. техн. наук, доцент
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Предлагается метод решения задачи многокритериального анализа критичности отказов элементов сложной системы, основанный на комбинированном использовании метода нечеткого логического вывода и методов теории планирования эксперимента. Результирующий показатель критичности отказа элемента представляется в виде полинома, учитывающего влияние как отдельно взятых показателей, так и их совокупностей (по два, три и т. д.).

Ключевые слова *— геном структуры, критичность отказа, сложный объект, многокритериальный анализ, теория планирования эксперимента, лингвистические переменные.*

Введение

Современные технические системы и объекты содержат, как правило, большое число элементов. В этих условиях обеспечить требуемые характеристики работоспособности системы путем улучшения качества одновременно всех элементов вряд ли возможно, прежде всего, по экономическим причинам. Однако очевидно, что различные элементы в системе играют далеко не одинаковые роли, их отказы могут приводить к разным по степени влияния на состояние системы последствиям. Поэтому естественным является стремление сосредоточить усилия на совершенствовании элементов, играющих в обеспечении работоспособности системы наиболее важную роль. С целью выявить роль конкретных элементов (и их различных комбинаций) в обеспечении работоспособности всей системы применяются специальные показатели. Наиболее широко распространены два из них – структурная важность элемента и критичность отказов элемента [1, 2]. Но они не могут быть полностью определены только свойствами элемента и должны определяться в рамках сложной системы (СС), содержащей данный элемент.

В статье рассматриваются новые подходы к оцениванию данных показателей.

Показатель структурной важности элемента

К основным методам повышения надежности современных сложных систем относятся:

— технические методы, предполагающие улучшение надежности элементов СС;

— структурные методы, предполагающие изменение структурно-логического построения СС.

В состав современных СС, как правило, входят высоконадежные элементы. Показатель надежности всей системы практически нечувствителен к изменению показателей надежности отдельных элементов в реализуемом диапазоне значений. Это обуславливает важность использования структурных методов анализа влияния отказов элементов на работоспособность системы. Для исследования надежности СС, связанной с ее структурным построением (структурной надежности), используют структурные функции: надежности, безопасности, живучести, работоспособности, минимальных сечений отказов — путем ортогонализации монотонных и немонотонных функций алгебры логики, замещения логических аргументов в этих функциях вероятностями их истинности и соответствующих логических операций арифметическими.

В работах [3–5] введено понятие генома структуры, представляющего собой вектор $\boldsymbol{\chi} = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, ..., \chi_n)$, компонентами которого являются коэффициенты полинома функции минимальных сечений отказов структуры, составленной из однородных элементов. Помимо того, что геном структуры содержит информацию о топологических свойствах СС, с его помощью можно вычислять интегральные оценки значимости и вкладов отдельных элементов в структурную надежность СС с использованием вероятностного и нечетко-возможностного подходов, причем как для монотонных, так и для немонотонных структур. Вычисляемые характеристики вкладов элементов СС в структурный отказ (надежность) имеют самостоятельное значение и, кроме того, их можно рассматривать как один из показателей критичности отказов элементов.

Показатели критичности отказов

Критичность отказов элемента СС является векторным свойством, для оценивания которого используется целый ряд частных показателей, таких как [2]: степень тяжести последствий отказа; вероятность отказа; устойчивость элемента к воздействию внешних неблагоприятных факторов; степень резервирования; контролируемость состояния элемента; продолжительность существования риска отказа; возможность локализации отказа, а также рассмотренный выше показатель структурной надежности.

Перечисленные показатели критичности отказов могут иметь как количественный, так и качественный характер, и для их измерения могут использоваться различные виды шкал [2].

В самом общем случае критичность отказа элементов СС оценивается набором показателей $F = \{f_i, i = 1, ..., m\}$, каждый из которых представляет собой лингвистическую переменную и термы которых могут задаваться интервалами, нечеткими числами и т. п. Проведенные исследования [3–5] структурной надежности элементов показывают, что вклады элементов СС в структурную надежность (отказ) также представляют собой интервальные оценки.

Пример лингвистической шкалы применительно к одному из частных показателей приведен в табл. 1.

■ ***Таблица 1.*** *Лингвистическая шкала показателя*

Показатель	Шкала	Терм
Контроль состояния элемента	1. Состояние элемента не контролируется	1. Низкий
	2. Осуществляется периодический контроль	2. Ниже среднего
	3. Осуществляется постоянный контроль без прогнозирования	3. Средний
	4. Осуществляется периодический контроль с прогнозированием	4. Выше среднего
	5. Осуществляется постоянный контроль с прогнозированием	5. Высокий

Способ разрешения многокритериальной неопределенности при анализе критичности отказов

Выявление критичных элементов на основе их ранжирования по степени критичности отказов представляет собой задачу многокритериального выбора. Для разрешения многокритериальной неопределенности разработаны различные методы [6–10], обычно связанные со скаляризацией векторного критерия выбора за счет использования сверток различного вида. Использованием сверток обусловлены и основные недостатки данных методов:

— определение используемых в свертках весовых коэффициентов отдельных показателей сопряжено с серьезными трудностями получения и обработки экспертной информации, в результате весовые коэффициенты слабо связаны с действительной ролью частных показателей критичности при обобщенной оценке свойства критичности элементов объекта;

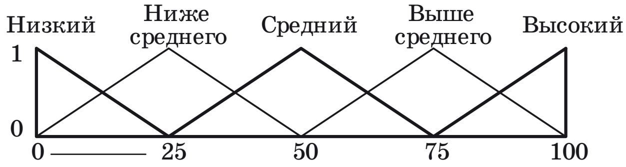
— не учитывается нелинейный характер влияния показателей друг на друга и на обобщенный показатель критичности отказа элементов СС;

— при построении интегрального показателя происходит выравнивание (сглаживание) значений частных показателей критичности элементов.

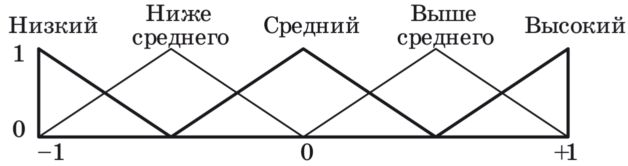
В данной статье предлагается комбинированный метод решения задачи многокритериального оценивания критичности отказов элементов СС, свободный от перечисленных недостатков. Он базируется на использовании метода нечеткого логического вывода [11, 12] и метода теории планирования эксперимента [12–15].

Сущность предлагаемого метода анализа критичности отказов

Рассмотрим лингвистическую переменную f_i = «Контроль состояния элемента СС». Она может принимать значения из множества простых и составных термов $T(f_i) = \{$«низкий», «ниже среднего», «средний», «выше среднего», «высокий»$\}$ (см. табл. 1).



■ ***Рис. 1.*** *Значения показателя «Контроль состояния элемента СС»*



■ ***Рис. 2.*** *Кодирование показателя «Контроль состояния элемента СС»*

Для формального представления термов лингвистических переменных можно использовать нечеткие числа (L-R)-типа. Тогда значения показателя «Контроль состояния элемента СС» можно представить по некоторой 100-балльной шкале (рис. 1).

Аналогично можно описать возможные значения других частных показателей.

Обобщенный взгляд лица, принимающего решение, на оцениваемую критичность отказа элемента СС формируется на основе анализа одновременно нескольких показателей с соответствующими значениями термов.

Введем для результирующего показателя лингвистическую переменную «Критичность отказа элемента СС», которая может принимать следующие значения: $T(f_{рез}) = \{$«низкая», «ниже среднего», «средняя», «выше среднего», «высокая»$\}$. Мнения экспертов о влиянии частных показателей критичности отказа элемента на результирующую оценку критичности в общем виде описываются следующими продукционными правилами:

P_j: «Если $f_1 = A_{1j}$ и $f_2 = A_{2j}$ и ... и $f_m = A_{mj}$, то $f_{рез} = A_{резj}$», где $A_{ij} \in T(f_i)$, $A_{резj} \in T(f_{рез})$.

Результирующий показатель критичности отказа элемента можно представить в виде полинома

$$f_{рез} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{m}\lambda_i f_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\lambda_{ij} f_i f_j + \ldots + \\ + \lambda_{12\ldots m} f_1 f_2 \ldots f_m ,$$

учитывающего влияние как отдельно взятых показателей (через значения коэффициентов λ_i), так и совокупностей по два (λ_{ij}), три (λ_{ijk}) и т. д. показателей.

Для построения результирующего показателя необходимо перевести значения всех частных показателей f_i в шкалу [–1, +1]. С этой целью возможные крайние значения лингвистической переменной f_i маркируют как –1 и +1, при этом точка «0» соответствует середине шкалы (в соответствии с физическим смыслом данного показателя). Кодирование текущего значения лингвистической переменной f_i осуществляется по формулам

$$\breve{f}_i = (f_i - f_{ср}) / h,$$

где f_i — значение показателя на шкале лингвистической переменной; $f_{ср} = (f_{i\max} + f_{i\min}) / 2$ — средняя точка шкалы переменной; $h = (f_{i\max} - f_{i\min}) / 2$ — интервал варьирования; $f_{i\max}$, $f_{i\min}$ — крайние значения переменной. Результат кодирования представлен на рис. 2.

Далее необходимо построить матрицу опроса на профессиональном языке эксперта в крайних значениях показателей f_i. Матрица опроса для случая $m = 3$ представлена в табл. 2.

Так, например, во второй строке таблицы представлено следующее суждение эксперта: «Если показатель f_1 имеет значение “высокий”, показатель f_2 имеет значение “низкий”, показатель f_3 имеет значение “низкий”, то результирующий показатель $f_{рез}$ оценивается как “ниже среднего”».

Затем формируется ортогональный план экспертного опроса [11–15], который для случая m=3 представлен в табл. 3.

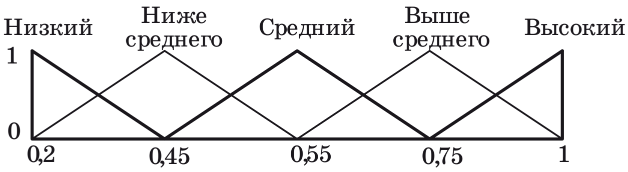
Пусть $f_{рез}$ может принимать значения, представленные на рис. 3.

■ ***Таблица 2.*** *Матрица опроса эксперта*

Высказывание	f_1	f_2	f_3	$f_{рез}$
1	Низкий	Низкий	Низкий	Низкий (Н)
2	Высокий	Низкий	Низкий	Ниже среднего (НС)
3	Низкий	Высокий	Низкий	Низкий (Н)
4	Высокий	Высокий	Низкий	Средний (С)
5	Низкий	Низкий	Высокий	Ниже среднего (НС)
6	Высокий	Низкий	Высокий	Выше среднего (ВС)
7	Низкий	Высокий	Высокий	Средний (С)
8	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий (В)

■ ***Таблица 3.*** *Ортогональный план экспертного опроса*

	f_0	f_1	f_2	f_3	$f_1 f_2$	$f_1 f_3$	$f_2 f_3$	$f_1 f_2 f_3$	$f_{рез}$
1	1	–1	–1	–1	1	1	1	–1	Н
2	1	1	–1	–1	–1	–1	1	1	НС
3	1	–1	1	–1	–1	1	–1	1	Н
4	1	1	1	–1	1	–1	–1	–1	С
5	1	–1	–1	1	1	–1	–1	1	НС
6	1	1	–1	1	–1	1	–1	–1	ВС
7	1	–1	1	1	–1	–1	1	–1	С
8	1	1	1	1	1	1	1	1	В



■ ***Рис. 3.*** *Значения интегрального показателя*

Для построения интегрального показателя с вещественными коэффициентами проведем операцию дефаззификации значений лингвистической переменной $f_{рез}$, для чего каждому терму поставим в соответствие моду его нечеткого числа («низкая» — 0,2; «ниже среднего» — 0,45; «средняя» — 0,55; «выше среднего» — 0,75; «высокая» — 1).

Расчет коэффициентов полинома производится по правилам, принятым в теории планирования эксперимента [11–15], для чего вычисляются усредненные скалярные произведения соответствующих столбцов ортогональной матрицы на вектор дефаззифицируемых значений результирующего показателя. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таким образом, свертка показателей в нашем случае имеет следующий вид:

$$f_{рез} = 0{,}5125{+}0{,}175f_1{+}0{,}0625f_2{+}0{,}1625f_3{+}\\ {+}0{,}025f_1f_2{+}0{,}025f_1f_3{+}0{,}0375f_2f_3.$$

Если же не проводить дефаззификацию значений результирующего показателя, приведенная методика позволяет осуществлять построение функциональной зависимости интегрального показателя критичности отказов от f_i с нечеткими коэффициентами λ_0, λ_1, λ_2, ..., $\lambda_{12\ldots m}$. Однако в данном случае следует воспользоваться арифметическими операциями над нечеткими трапецеидальными числами, введенными в работе [11].

Иллюстративный пример

Для исследования предложенного подхода рассмотрим небольшой пример [2] и сравним результаты ранжирования элементов СС по степени критичности предлагаемым методом и методом выделения паретовских слоев [2].

В качестве вектора критичности выберем двухкомпонентный вектор $\mathbf{f} = (f_1, f_2)$. Требуется проранжировать 10 элементов $X = \{x_i, i = 1, ..., 10\}$, имеющих следующие оценки критичности: $\mathbf{f}(x_1) = (0{,}1; 0{,}1)$, $\mathbf{f}(x_2) = (0{,}6; 0{,}1)$, $\mathbf{f}(x_3) = (0{,}8; 0{,}1)$, $\mathbf{f}(x_4) = (1{,}0; 0{,}1)$, $\mathbf{f}(x_5) = (0{,}1; 0{,}4)$, $\mathbf{f}(x_6) = (0{,}4; 0{,}4)$, $\mathbf{f}(x_7) = (0{,}6; 0{,}4)$, $\mathbf{f}(x_8) = (0{,}1; 0{,}6)$, $\mathbf{f}(x_9) = (0{,}8; 0{,}6)$, $\mathbf{f}(x_{10}) = (0{,}1; 0{,}8)$. Результаты выделения паретовских слоев с использованием классического отношения доминирования по Парето на множестве $X = \{x_i, i = 1, ..., 10\}$ представлены на рис. 4.

Здесь паретовские слои состоят из следующих элементов:

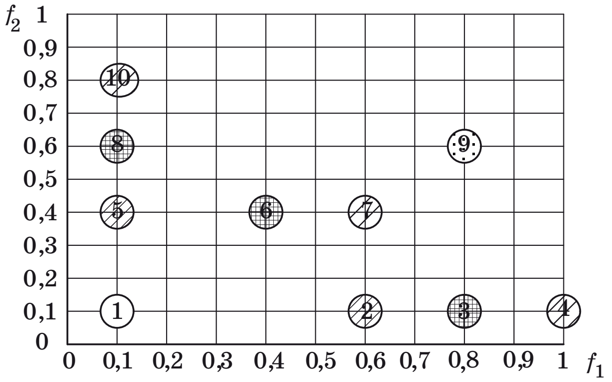
$$X_1^{nd} = \{x_1\},\ X_2^{nd} = \{x_2, x_5\},\ X_3^{nd} = \{x_3, x_6, x_8\},\\ X_4^{nd} = \{x_4, x_7, x_{10}\},\ X_5^{nd} = \{x_9\}.$$

Для ранжирования элементов по степени критичности в каждом слое использовалась [5] линейная свертка показателей вида $f_{рез}(x_i) = \lambda_1 f_1(x_i) + \lambda_2 f_2(x_i)$. Пусть коэффициенты важности показателей критичности одинаковы: $\lambda_1 = \lambda_2 = 0{,}5$. Тогда результат ранжирования элементов множества $X = \{x_i, i = 1, ..., 10\}$ следующий: $x_1 < x_5 < x_2 < x_8 < x_6 < x_3 < x_{10} < x_7 < x_4 < x_9$ (рис. 5).

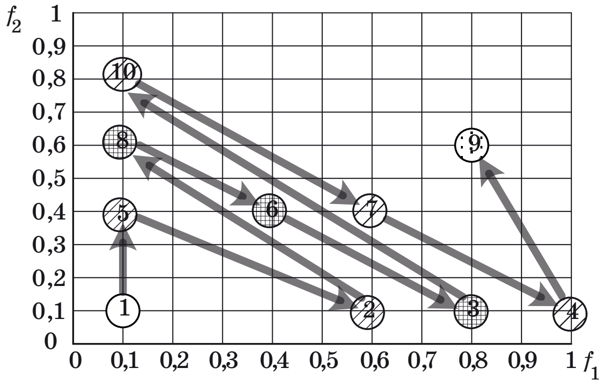
Несложно заметить, что в случае применения данного метода элементы x_6, x_7 в соответствующих паретовских слоях $X_3^{nd} = \{x_3, x_6, x_8\}$,

■ ***Таблица 4.*** *Результаты вычислений*

$f_0 f_{рез}$	$f_1 f_{рез}$	$f_2 f_{рез}$	$f_3 f_{рез}$	$f_1 f_2 f_{рез}$	$f_1 f_3 f_{рез}$	$f_2 f_3 f_{рез}$	$f_1 f_2 f_3 f_{рез}$	Значения полинома
0,2	–0,2	–0,2	–0,2	0,2	0,2	0,2	–0,2	0,20
0,45	0,45	–0,45	–0,45	–0,45	–0,45	0,45	0,45	0,45
0,2	–0,2	0,2	–0,2	–0,2	0,2	–0,2	0,2	0,20
0,55	0,55	0,55	–0,55	0,55	–0,55	–0,55	–0,55	0,55
0,4	–0,4	–0,4	0,4	0,4	–0,4	–0,4	0,4	0,40
0,75	0,75	–0,75	0,75	–0,75	0,75	–0,75	–0,75	0,75
0,55	–0,55	0,55	0,55	–0,55	–0,55	0,55	–0,55	0,55
1	1	1	1	1	1	1	1	1,00
$\lambda_0 = 0{,}5125$	$\lambda_1 = 0{,}175$	$\lambda_2 = 0{,}0625$	$\lambda_3 = 0{,}1625$	$\lambda_{12} = 0{,}025$	$\lambda_{13} = 0{,}025$	$\lambda_{23} = 0{,}0375$	$\lambda_{123} = 0$	—



■ *Рис. 4. Разбиение элементов СС на паретовские слои*



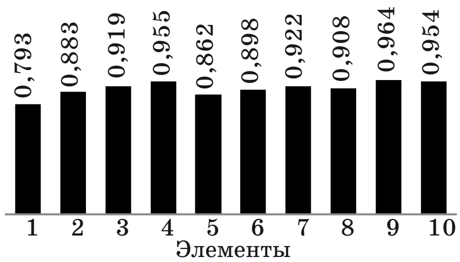
■ *Рис. 5. Результаты ранжирования элементов СС по методике работы [5]*

$X_4^{nd} = \{x_4, x_7, x_{10}\}$ при различных комбинациях коэффициентов важности λ_1, λ_2 в результате их ранжирования всегда будут доминироваться элементами данных слоев. Это означает, что при решении задач ранжирования и определения критичных элементов на паретовских слоях элементы x_6, x_7 ни при каких условиях не будут признаны наиболее или наименее критичными.

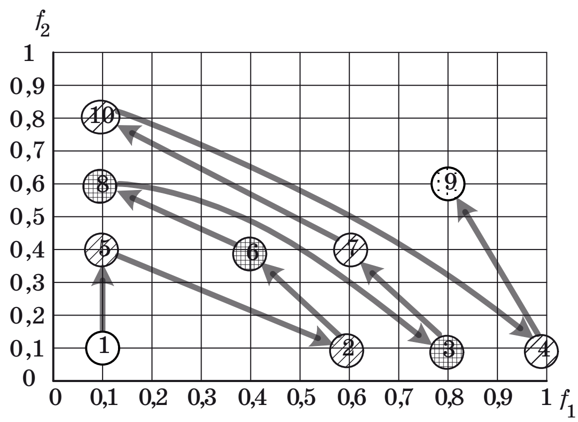
Проведем ранжирование элементов СС по степени их критичности предлагаемым комбинированным методом. Покажем, что из паретовских слоев можно выделять элементы x_6, x_7 так же, как и любые другие. Ортогональный план экспертного опроса представлен в табл. 5.

Обработав данные экспертного опроса по изложенной выше методике, получим следующее уравнение, описывающее мнение эксперта: $f_{\text{рез}} = 0{,}75+0{,}2f_1+0{,}25f_2-0{,}2f_1f_2$. Результаты вычисления интегрального показателя критичности отказов элементов показаны на рис. 6 и 7.

Полученные результаты ранжирования элементов СС по степени их критичности схожи с вышепредставленной ранжировкой (см. рис. 5). При этом элементы x_6, x_7 в соответствующих паретовских слоях $X_3^{nd} = \{x_3, x_6, x_8\}$, $X_4^{nd} = \{x_4,$



■ *Рис. 6. Значения интегрального показателя критичности отказов для элементов*



■ *Рис. 7. Результаты ранжирования элементов СС по предлагаемой методике*

■ ***Таблица 5.*** *Вычисление значений коэффициентов полинома*

f_0	f_1	f_2	$f_{\text{рез}}$	f_1f_2
1	–1	–1	0,1	1
1	1	–1	0,9	–1
1	–1	1	1	–1
1	1	1	1	1
$f_0f_{\text{рез}}$	$f_1f_{\text{рез}}$	$f_2f_{\text{рез}}$	$f_1f_2f_{\text{рез}}$	Значения полинома
0,1	–0,1	–0,1	0,1	0,100
0,9	0,9	–0,9	–0,9	0,900
1	–1	1	–1	1,000
1	1	1	1	1,000
$\lambda_0 = 0{,}75$	$\lambda_1 = 0{,}2$	$\lambda_2 = 0{,}25$	$\lambda_{12} = -0{,}2$	–

$x_7, x_{10}\}$, по мнению эксперта, оказались наименее критичными.

Заключение

Использование вместе с количественной также и качественной (нечеткой, неточной, интервальной) информации о влиянии отказов элементов на функционирование СС существенно повышает достоверность выводов и принимаемых решений при проектировании и управлении СС.

В рамках предложенного метода осуществляется формализация экспертной информации, представленной на естественном для эксперта языке, путем введения лингвистических переменных, которые позволяют адекватно отобразить приблизительное словесное описание предметов и явлений даже в тех случаях, когда детерминированное описание отсутствует или невозможно в принципе.

Предложенный метод анализа критичности отказов позволяет формализовать опыт эксперта (группы экспертов) в виде прогностических моделей в многомерном пространстве и учесть комплексное влияние одновременно нескольких факторов на результирующий показатель критичности СС. За счет этого выявляется нелинейный характер влияния частных показателей на интегральный показатель критичности отказов и повышается достоверность принимаемых решений.

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-08-00346, 08-08-00403, 09-08-00259, 10-08-90027, 10-07-05019), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № О–2.3/03).

Литература

1. **Ефремов А. С., Зеленцов В. А., Миронов А. Н., Холоименко К. А.** Критерии предельного состояния координатных АТС // Вестник связи. 2004. № 2. С. 71–76.
2. **Афанасьев В. Г., Зеленцов В. А., Миронов А. Н.** Методы анализа надежности и критичности отказов сложных систем / МО. — СПб., 1992. — 99 с.
3. **Павлов А. Н., Соколов Б. В., Сорокин М. В.** Анализ структурной динамики комплексной системы защиты информации // Информация и безопасность. 2009. Т. 12. № 3. С. 389–396.
4. **Павлов А. Н.** Логико-вероятностный и нечетко-возможностный подходы к исследованию монотонных и немонотонных структур // Кибернетика и высокие технологии XXI века: Тез. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 12–14 мая 2010 г. / НПФ «САКВОЕЕ». Воронеж, 2010. С. 483–492.
5. **Павлов А. Н.** Исследование немонотонных систем: анализ «мостиковой» структуры // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Тр. X Междунар. науч. школы МА БР-2010, Санкт-Петербург, 6–10 июля 2010 г. СПб.: ГУАП, 2010. С. 85–93.
6. **Соколов Б. В.** и др. Военная системотехника и системный анализ: учебник / МО. — СПб., 1999. — 408 с.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. — М.: Наука, 1986. — 312 с.
8. **Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П.** Принятие решений на основе нечетких моделей. — Рига: Зинанте, 1990. — 184 с.
9. **Павлов А. Н., Соколов Б. В.** Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2006. — 72 с.
10. **Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н.** Анализ, синтез, планирование решений в экономике: учебник. — М.: Финансы и статистика, 2000. — 368 с.
11. **Спесивцев А. В.** Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. — 238 с.
12. **Павлов А. Н.** Методика построения псевдоуниверсальных сверток лингвистических показателей на основе теории планирования эксперимента: сб. докл. // XI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008), РФ, Санкт-Петербург, 23–25 июня 2008 г. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. Т. 1. С. 169–172.
13. **Налимов В. В., Чернова Н. А.** Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Наука, 1965. — 382 с.
14. **Налимов В. В.** Теория эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 208 с.
15. **Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 280 с.