

УДК 629.76: 519.8: 623.454.244: 621.373.8: 681.7.068: 519.8

М. И. Решетников, Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева, Миасс
В. Г. Зезин, кандидат технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТИПА СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПИРОЭНЕРГОСРЕДСТВ РАКЕТЫ НА ОСНОВЕ ПРАВИЛ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИЙ

Рассматривается модель нечеткого логического вывода на основе правил нечетких продукций для выбора типа системы иницирования пиросредств ракетного комплекса.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, нечеткая продукционная система, лингвистическая переменная, система иницирования пиросредств.

В работе [1] авторами предложен метод выбора типа системы иницирования (СИ) пирознергосредств с использованием принципа нечеткого логического вывода Беллмана – Заде, который целесообразно использовать на начальной стадии разработки, когда формируется облик ракетного комплекса (РК) и технические характеристики систем могут быть оценены только качественно.

На более поздних стадиях такие характеристики систем, как масса, надежность и т. п. имеют уже в достаточной степени достоверную количественную оценку, что необходимо учитывать в алгоритме выбора. В то же время и на данном этапе имеется группа параметров, которые могут быть оценены только экспертно, например, безопасность, стойкость к внешним воздействиям. При этом критерии выбора систем и ограничения на целевую функцию могут быть сформулированы только с некоторой степенью нечеткости, так как при разработке РК происходит постоянное согласование параметров отдельных систем, уточнение предъявляемых к ним требований.

В теории нечеткой логики для решения подобных задач находят широкое применение системы правил нечеткого вывода (нечетких продукций) [2, 3, 4]. Ядром системы нечеткого вывода является система правил (база знаний), разработанная экспертом в данной предметной области,

$$(i): \mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B},$$

где i – порядковый номер правила в базе знаний; \mathcal{A} и \mathcal{B} – условие и заключение правила соответственно, представляющие собой элементарные нечеткие высказывания относительно входных и выходной лингвистических переменных, соединенные логическими связками конъюнкции и дизъюнкции.

Сам процесс нечеткого вывода представляет собой алгоритм получения нечетких заключений на основе нечетких условий. В настоящее время существуют разнообразные алгоритмы нечеткого вывода: Мамдани, Ларсена, Цукамото и др. [2, 4]. Мы в своей работе будем использовать алгоритмические разработки Inform GmbH (Германия), которые в значительной степени совпадают с алгоритмом Мамдани и реализованы в программном комплексе

fuzzyTECH [5]. Его достоинством является возможность объединять правила нечеткого вывода в блоки и формировать из них сложные логические структуры, работать с несколькими выходными лингвистическими переменными, что придает гибкость процессу разработки нечеткой модели. Основное содержание алгоритма, адаптированного для решения нашей задачи, заключается в следующем.

База правил, описывающая связь между множеством входных лингвистических переменных $V = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ системы принятия решения с выходной лингвистической переменной ω , записывается следующим образом:

$$\bigcap_{p=1}^{k_j} \bigcap_{i=1}^n (\beta_i = \tilde{B}_{i,j_p}) \left(\text{with } DoS = s_{j_p} \right) \Rightarrow \omega = \tilde{D}_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где \tilde{B}_{i,j_p} – лингвистический терм, которым оценивается входная переменная β_i в строке с номером j_p ($p = \overline{1, k_j}$); k_j – количество строк-конъюнкций; \tilde{D}_j – лингвистический терм, которым оценивается выходная переменная ω в j -м правиле; DoS (Degree of Support) – весовой коэффициент, величина которого для p -й строки конъюнкции и j -го правила равна s_{j_p} ; n – количество входных переменных; m – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходной переменной ω .

Все лингвистические термы в базе знаний (1) представляют собой нечеткие множества, заданные соответствующими функциями принадлежности на универсумах входных X_i и выходной Y переменных:

$$\mu_{B_{i,j_p}}(x_i): X_i \rightarrow [0,1], \quad x_i \in X_i;$$

$$\mu_{D_j}(y): Y \rightarrow [0,1], \quad y \in Y.$$

На этапе фаззификации подусловий для каждой входной переменной β_i с использованием нечетких величин $\beta_i = a_i$ ($a_i \in X_i$), поступающих на вход

системы, и функций принадлежности $\mu_{B_{i,j_p}}(x_i)$ находится степень принадлежности b_{i,j_p} значения a_i переменной β_i соответствующему нечеткому терму \tilde{B}_{i,j_p} , которые принимаются за степень истинности подусловий $\beta_i = \tilde{B}_{i,j_p}$.

При агрегировании определяются степени истинности условий c_j в каждом из правил по известной степени истинности соответствующих подусловий. При этом для определения результата нечеткой конъюнкции используется операция \min , а нечеткой дизъюнкции – операция граничной суммы, что позволяет не «терять» влияния малозначимых факторов на результат нечеткого вывода:

$$c_j = \min \left[\sum_{p=1}^{k_j} \left(s_{j_p} \min_{i=1,n} b_{i,j_p} \right), 1 \right], \quad j = \overline{1,m}.$$

На этапе активизации степень истинности заключений правил нечетких продукций принимается равной степени истинности условий c_j . После чего нахо-

дится функция принадлежности заключения в j -м правиле как усеченная функция принадлежности терма \tilde{D}_j :

$$\mu_{D_j}^*(y) = \min_{y \in Y} (c_j, \mu_{D_j}(y)). \quad (1)$$

На этапе аккумуляции происходит объединение нечетких множеств каждого из термов \tilde{D}_j , определяемых функциями принадлежности (1), что дает функцию принадлежности выходной лингвистической переменной ω в целом:

$$\mu_{\omega}(y) = \max_{\substack{y \in Y \\ j=1,m}} [\mu_{D_j}^*(y)]. \quad (2)$$

При дефаззификации по функции принадлежности (2), с использованием метода центра тяжести и центра максимумов [5], получается четкое значение w выходной переменной ω , соответствующей вектору входных переменных $V' = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

Перечень входных лингвистических переменных, принятых при решении задачи, приведен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень входных лингвистических переменных

Наименование переменной	Идентификатор
Баллистическая эффективность СИ	LostBallistic
Надежность СИ	Reliability
Стоимость разработки СИ	Cost
Энергопотребление СИ	PowerConsumption
Гарантийный срок эксплуатации СИ	DurabilityCommon
Срок службы СИ	DurabilityQuar
Диагностируемость линий связи СИ	Lines
Диагностируемость пирозвлов СИ	PiroNode
Диагностируемость блока команд СИ	CommandBlock
Стойкость СИ к внешним механическим воздействиям	ResistMechanics
Стойкость СИ к внешним электромагнитным воздействиям	ResistElectric
Стойкость СИ к другим внешним воздействиям	ResisOther
Стойкость СИ к внешним температурным воздействиям	ResistTemperatur
Стойкость СИ к внешним вибрационным воздействиям	ResistVibrations
Стойкость СИ к воздействию внешнего давления	ResistPressure
Безопасность СИ при изготовлении ракеты	SafeProduction
Безопасность СИ при транспортировке ракеты	SafeTransport
Безопасность СИ при эксплуатации ракеты	SafeExploitation
Безопасность СИ при пожаре	SafeFire
Безопасность СИ при нештатных воздействиях	SafeOtherNoNorm

Под лингвистической переменной LostBallistic понимается потеря баллистической эффективности ракеты, четкая величина которой определяется как

$$E = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial E}{\partial m} \right)_{0i} m_{as_i},$$

где $(\partial E / \partial m)_{0i}$ – частная производная баллистической характеристики по массе конструкции i -й ступени в базовой точке; m_{as_i} – масса СИ, размещенная на i -й ступени; N – количество ступеней ракеты.

В качестве выходной лингвистической переменной ω принято «качество СИ» (SystemQuality) –

обобщенный показатель качества системы инициирования с универсумом $Y = \{y | 0\% \leq y \leq 100\%\}$.

Лингвистические переменные задачи задавались термами: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая». Функции принадлежности термов, построенные на нормированном универсуме, показаны на рис. 1.

Структура нечеткой модели (проекта fuzzyTECH), сформированной для решения задачи, показана на рис. 2.

В модели кроме основной выходной переменной SystemQuality предусмотрено формирование дополнительных выходных лингвистических переменных DiagnozabilityWhole, SafetyWhole и ResistanceWhole,

позволяющих конструктору РК проанализировать, каким образом сказывается изменение входных переменных на таких важных характеристиках, как диагностируемость, безопасность и стойкость СИ в целом. Для сокращения объема базы правил и упрощения ее разработки входные лингвистические переменные, которые оказывают приблизительно одинаковое влияние на качество СИ, а также существенно различающиеся по степени влияния на выходную переменную, предварительно агрегировались с формированием промежуточных лингвистических переменных (см. рис. 2).

В качестве примера применения разработанной нечеткой модели проведем сравнение трех СИ: низковольтной (S_1), построенной на базе отработанных технических решений, и двух перспективных – высоковольтной (S_2) и лазерной (S_3), требующих значи-

тельных инвестиций для их реализации. Величины входных переменных, использованные в расчетах, приведены в табл. 2.

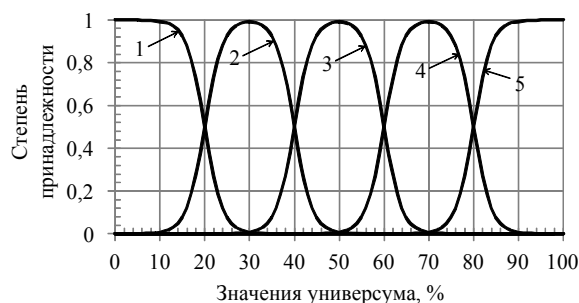


Рис. 1. Функции принадлежности термов лингвистических переменных: 1 – очень низкая; 2 – низкая; 3 – средняя; 4 – высокая; 5 – очень высокая

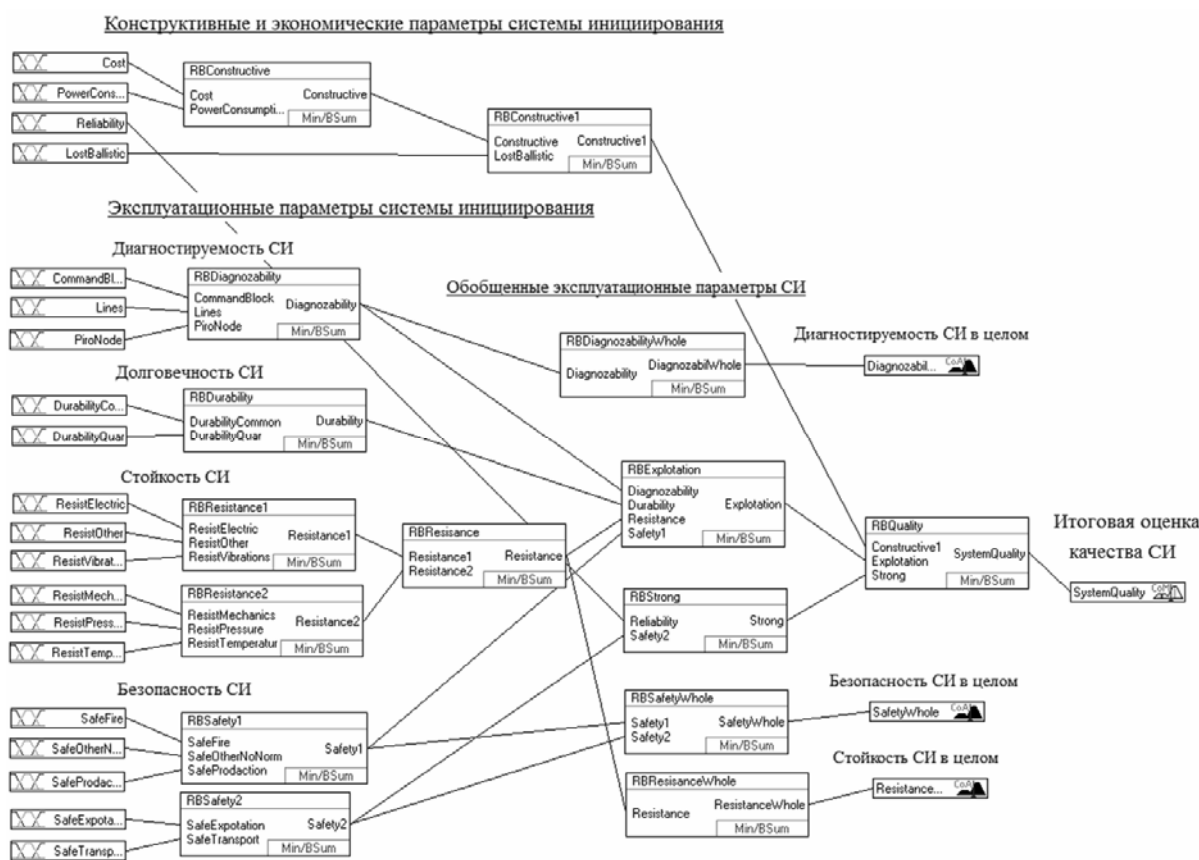
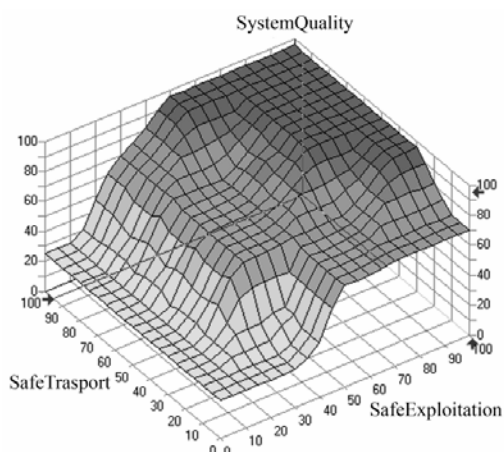


Рис. 2. Структура проекта fuzzyTECH задачи выбора системы инициирования

Таблица 2. Величины входных переменных, принятые для расчетов, %

Входная переменная	Система инициирования			Входная переменная	Система инициирования		
	S_1	S_2	S_3		S_1	S_2	S_3
LostBallistic	86,3	97,3	24,3	ResistElectric	25	80	100
Reliability	90,0	42	90	ResistOther	25	70	90
Cost	4	40	80	ResistTemperatur	30	50	80
PowerConsumption	58	80	16	ResistVibrations	50	80	80
DurabilityQuar	30	50	80	ResistPressure	90	90	90
DurabilityCommon	30	50	80	SafeProduction	40	85	100
Lines	100	33	33	SafeTransport	85	95	95
PiroNode	33	33	100	Safe Exploitation	50	70	100
CommandBlock	100	33	100	SafeFire	30	40	100
ResistMechanics	30	70	90	SafeOtherNoNorm	30	30	90

На рис. 3 в качестве примера показаны полученные в результате расчетов поверхности нечеткого вывода для системы S_3 , отражающие влияние на вы-



ходную переменную SystemQuality доминирующих и наиболее существенных входных переменных SafeTransport, SafeExploitation, Reliability и LostBallistic.

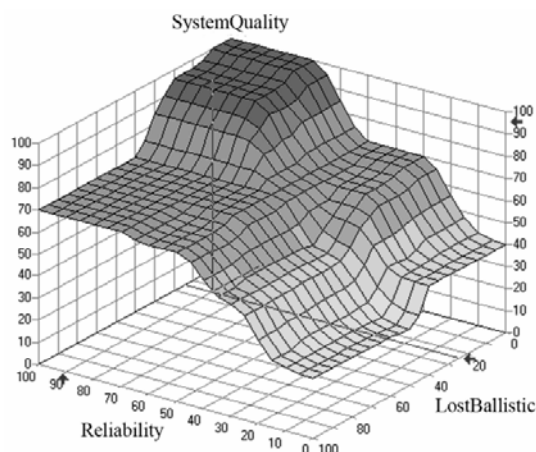


Рис. 3. Система S_3 . Поверхности нечеткого вывода для доминирующих и наиболее существенных входных переменных

Из приведенных графиков видно, что степень изменения выходной переменной «качество СИ» при варьировании указанных входных переменных соответствует интуитивно ожидаемым величинам. Аналогичная картина наблюдается и для других входных переменных и СИ. Это свидетельствует об адекватности разработанной нечеткой модели.

Итоговые показатели качества систем инициирования, полученные в результате расчетов, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Итоговые показатели качества систем инициирования, %

Наименование выходной лингвистической переменной	Система инициирования		
	S_1	S_2	S_3
Качество СИ	50,9	45,3	96
Диагностируемость СИ в целом	70,1	32,3	70,6
Стойкость СИ в целом	30	76,1	92,4
Безопасность СИ в целом	50,2	70,1	92,4

Анализ устойчивости полученной оценки качества показывает, что реально возможные вариации величин входных переменных не сказываются принципиальным образом на итоговые результаты сравнительного анализа СИ: качество системы S_3 по-прежнему значительно превышает качество систем S_1 и S_2 .

В целом полученные результаты моделирования позволяют сделать следующий вывод. В случае принятия решения о разработке новой системы иници-

рования и при наличии соответствующих активов выбор должен быть сделан в пользу системы S_3 , а не системы S_2 , так как, несмотря на существенно более высокую стоимость разработки, ожидаемый продукт инвестиций имеет неоспоримое преимущество по всем показателям качества.

Таким образом, на базе теории нечеткого логического вывода разработан метод многокритериального выбора типа системы инициирования, позволяющий учесть как количественные, так и их качественные характеристики, отражающий неопределенности, присущие разработке сложных систем, и формирующий обобщенный единый показатель качества.

Библиографические ссылки

1. Применение аппарата нечеткой логики к решению задачи выбора типа системы инициирования пирострелкового комплекса : отчет о НИР / ЮУрГУ ; рук. Зезин В. Г., исполн. Зезин В. Г., Решетников М. И. – Миасс, 2014. – 141 с. Библиогр. с. 89. – Инв. № 171249-Гит/02.
2. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с. : ил.
3. Ахрем А. А., Ашиняц М. Р., Петров С. А. Нечеткий логический вывод в системе принятия решений // Труды ИСА РАН, 2007. – Т. 29. – С. 265–275.
4. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с. : ил.
5. Программный комплекс fuzzyTECH: Демо-версия. – URL: <http://www.fuzzytech.com/?lang=e> (дата обращения: 05.05.2013).

M. I. Reshetnikov, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre
V. G. Zezin, PhD in Engineering, Associate Professor, Miass branch of South-Ural State Univeristy

Multicriteria Selection of Type of Rocket Pyrodevices Activation System Based on Rules of Fuzzy Production

Model of fuzzy logic inference based on rules of fuzzy production for selection of type of rocket pyrodevices activation system is studied.

Keywords: multicriteria analysis, rule-based fuzzy system, linguistic variable, pyrodevices activation system.