При использовании материалов статьи необходимо использовать данную ссылку:
Баранов Д.А., Басотин Е.В., Шестопалова О.Л. Оценивание степени доступности закупки компонентов изделий ракетно-космической техники в условиях санкционных ограничений на основе нечеткой информации о комплексе факторов морального устаревания элементной базы // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 1 (59). С. 72-91

УДК 004.023:[504.054+504.064.2]

ОЦЕНИВАНИЕ СТЕПЕНИ ДОСТУПНОСТИ ЗАКУПКИ КОМПОНЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ САНКЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ О КОМПЛЕКСЕ ФАКТОРОВ МОРАЛЬНОГО УСТАРЕВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

Баранов Д.А., Басотин Е.В., Шестопалова О.Л.

В статье обоснована необходимость учета в информационно-аналитических системах поддержки принятия решений по эксплуатации изделий ракетно-космической техники нового показателя, характеризующего возможность приобретения изделия с учетом информации о комплексе факторов морального устаревания и ограничений, обусловленных введением международных санкций на приобретение иностранных комплектующих - коэффициента оперативной доступности. Определение значения коэффициента оперативной доступности позволяет повысить обоснованность управленческих решений по недопущению неустранимых отказов оборудования, связанных с отсутствием отказавших элементов в комплекте запасных частей, инструментов и принадлежностей. Предложен подход к определению количественного значения коэффициента оперативной доступности на основе нечеткой продукционной модели. Реализован прямой метод построения базы правил модели и пространственно-геометрический способ представления базы правил, в своей совокупности упрощающие процедуры обеспечения полноты, связности, непротиворечивости и совместности базы правил. Приведены рекомендации по построению нечетких продукционных моделей, рассмотрены основные понятия, представлены основные расчетные соотношения. Разработан алгоритм расчета и рассмотрен практический пример вычисления коэффициента оперативной доступности.

Ключевые слова: нечеткая информация, лингвистическая переменная, нечеткое множество, доступность для приобретения, моральное устаревание, санкционные ограничения, нечеткая продукционная модель, база правил

Введение

Прогрессирующее моральное устаревание изделий ракетно-космической техники (РКТ), введение санкционных ограничений в отношении предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) и предприятий, входящих в состав Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», усугубляют проблему, связанную с возможностью приобретения специализированных изделий, их комплектующих и составных частей для поддержания требуемого уровня надежности

Баранов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» Самара
Басотин Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент, докторант, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского Санкт-Петербург
Шестопалова Ольга Львовна, кандидат технических наук, доцент, декан филиала «Восход» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в г. Байконуре Байконур

образцов РКТ, выполняющих важнейшие задачи в интересах государства.

Особое внимание проблеме доступности изделий для приобретения стало уделяться лишь десятилетие назад, когда стало очевидно, что сроки морального устаревания эксплуатируемого оборудования сокращаются, стоимость и сроки разработки нового оборудования существенно возрастают, возможность поставки зарубежных комплектующих в любой момент может быть ограничена международными санкциями.

С развитием вычислительной техники и технологий сопровождения жизненного цикла изделий, в систему эксплуатации РКТ интегрируются автоматизированные информационно-аналитические системы поддержки принятия решений по управлению эксплуатацией, основной задачей которых является своевременное обеспечение заинтересованных лиц актуальной и достоверной информацией, позволяющей повысить обоснованность решений по поддержанию требуемого уровня надежности космических средств.

Анализ понятия доступности компонентов РКТ и показателей ее оценивания

В основе алгоритма работы информационно-аналитической системы поддержки принятия решений по эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры (далее по тексту - систем), в части обеспечения требуемого уровня долговечности, лежит процедура построения вероятностной функции работоспособности через логическую функцию работоспособности, которая представляет собой такую функцию алгебры логики, полученную на основе анализа дерева отказов, которая связывает состояние элементов системы и выполнение некоторых заданных условий с работоспособным состоянием системы. Работоспособное состояние системы зависит от возможности восстановления ее работоспособности в течении резервного времени. Вероятность восстановления работоспособности в течение резервного времени t_B может быть определена по выражению:

$$P_B(t_B) = 1 - e^{-\frac{t_B}{\overline{T}_B}},$$

где $\overline{T}_B = \dfrac{\overline{T}_{ЗИП}}{P_{ЗИП}}$ - среднее время восстановления работоспособности; $\overline{T}_{ЗИП}$ - среднее время устранения отказа при наличии отказавшего оборудования в комплекте запасных частей, инструментов и принадлежностей, предназначенных для обеспечения эксплуатации системы (ЗИП); $P_{ЗИП}$ - вероятность наличия отказавшего оборудования в комплекте ЗИП.

В настоящее время, как правило, вероятность наличия отказавшего оборудования в комплекте ЗИП определяется путем присвоения значений 1; 0,75; 0,5; 0,25; 0 дискретной шкалы [0,1], соотнесенных с гипотетической возможностью устранения определенной доли возникающих отказов в зависимости от номенклатуры и численности имеющихся в наличии элементов.

Наземные космические средства относятся к категории восстанавливаемых, обслуживаемых объектов непрерывного длительного применения конкретного целевого назначения с выполнением многократных циклических функций, переход в предельное состояние которых приводит к последствиям катастрофического (критического) характера [6]. Для данного класса объектов в качестве основного показателя надежности рекомендуется рассматривать коэффициент оперативной готовности, определяемый по выражению:

$$K_{ОГ} = K_Г \times P(t_{зад}),$$

где $K_Г = \varphi(k_{Г1}, k_{Г2}, ..., k_{Гn})$ - коэффициент готовности; $P(t_{зад})$ - вероятность безотказной работы системы в течении заданного времени $t_{зад}$.

Коэффициент готовности *i* -го элемента системы рассчитывается по формуле:

$$k_{Г1} = \frac{\overline{T}_i}{\overline{T}_i + \overline{\tau}_i},$$

где $\overline{T}_i$ - значение оценки средней наработки на отказ *i* -го элемента системы; $\overline{\tau}_i$ - оценка среднего времени восстановления *i* -го элемента системы.

Среднее время восстановления работоспособности *i* -го элемента системы определяется по выражению:

$$\overline{\tau}_i = \frac{\overline{\tau}_i^{ЗИП}}{P_i^{ЗИП}}$$

где $\overline{\tau}_i^{ЗИП}$ - среднее время восстановления работоспособности *i* -го элемента системы (устранения отказа) при его наличии в комплекте ЗИП; $P_i^{ЗИП}$ - вероятность наличия в комплекте ЗИП *i* -го элемента системы.

Событие, заключающееся в отсутствии какого-либо элемента в комплекте ЗИП при его востребованности (для устранения отказа) трактуется как отказ комплекта ЗИП [7]. В качестве показателя, характеризующего степень наличия в комплекте ЗИП элементов заданной номенклатуры и в заданном количестве, рекомендуется использовать коэффициент готовности комплекта ЗИП как вероятность того, что в произвольный момент времени при принятых стратегиях пополнения запаса, отказ комплекта ЗИП не произойдет. Очевидно, что наличие какого-либо изделия в комплекте ЗИП определяется возможностью его приобретения и своевременностью доставки, однако, при выборе стратегии пополнения комплекта ЗИП, оценке и расчете достаточности и норм расхода не рассматриваются показатели, характеризующие доступность изделия для приобретения.

Доступность изделий для приобретения рассматривается только в рамках процедуры управления номенклатурой устаревающих изделий, которая, при определенных условиях, может рассматриваться в качестве одного из правил, определяющих стратегию пополнения запаса (трактовке [7]). Доступность изделий для приобретения определяется возможностью его приобретения у оригинального производителя и осуществлением сервисных функций по обслуживанию в процессе эксплуатации. Считается, что изделие перешло в стадию устаревания после опубликования информации об окончании его производства или окончании его продаж [3, 4, 5].

Таким образом, в настоящее время, в системе восстановления технического ресурса изделий РКТ отсутствует показатель, характеризующий степень доступности для приобретения изделий, имеющий однозначную трактовку для всех заинтересованных лиц, количественное значение которого может быть использовано в информационном контуре мониторинга долговечности систем с целью снижения вероятности отказа комплекта ЗИП и, как следствие, недопущения неустранимых отказов оборудования, связанных с отсутствием в комплекте ЗИП отказавших элементов.

В настоящее время в космической отрасли доступность рассматривается как частное понятия ремонтопригодности в контексте удобного для ремонта (Р) и технического обслуживания (ТО) размещения составных частей и может характеризоваться коэффициентом доступности к элементам конструкции изделия при устранении отказов, повреждений и проведении ТО и Р. Семантически такая трактовка никак не связано с понятием, описывающим возможность приобретения (в смысле покупки) изделий, их комплектующих и расходных материалов, а коэффициент доступности (как и коэффициент готовности комплекта ЗИП) не может выступать в качестве показателя, определяющего степень доступности изделия для приобретения.

В качестве показателя, характеризующего доступность для приобретения изделия РКТ будем рассматривать коэффициент оперативной доступности - вероятность того, что изделие будет доступно для приобретения (покупки) в произвольный момент времени и будет оставаться доступным для приобретения в течении заданного интервала времени.

Особенности оценивания коэффициента оперативной доступности изделия в условиях неопределенности исходной информации

Исходными данными для определения коэффициента оперативной доступности изделия могут являться прямые (например, прекращение производства оригинальным производителем) и косвенные (например, неоригинальные комплектующие) признаки морального устаревания, а так же уровень зависимости изделия от комплектующих иностранного производства. Информация, на основе которой можно сделать вывод о степени доступности имеет различные источники, носит разнородный характер для формализации и обработки которой необходимо применение не стандартных подходов.

Исходные данные целесообразно представить в виде лингвистических переменных (ЛП), описываемых набором $(x, T(x), U, G, M)$, где *x* - название переменной; *T(x)* - терм-множество переменной *x* (совокупность ее лингвистических значений); *U* - универсальное множество базовой переменной в виде нечеткой лингвистической шкалы (НЛШ); *G* - синтаксическое правило, порождающее термы множества *T(x)*; *M* - семантическое правило, сопоставляющее *X* с её смыслом *M(X)* [8].

Процедура построения НЛШ подразумевает определение множества значений ЛП и размещение их на универсальной шкале [0,1] (*U* = [0; 1]).

Процедуры построения синтаксического правила *G,* выбора числа лингвистических термов множества *T(x)* и их названий выполняется, как правило, на эвристическом уровне ввиду слабой формализуемости данной задачи. На практике число термов задается не более 6, что позволяет не усложнять процесс формирования предпочтений при выборе конкретного значения ЛП и не понижать чувствительность модели. Названия термов выбираются исходя из условий их однозначного толкования. Как правило, названия термов отражают качественную, приближенную относительную оценку уровня *ЛП*, например, «*низкий*» или «*высокий*».

Задание семантического правила, сопоставляющего название *X* лингвистической переменной *x* с её смыслом *M(x)* подразумевает построение функции принадлежности термов множества *T(x).* Для решения практических задач наиболее широкое применение нашли треугольные симметричные функции принадлежности с двух сторонним ограничением диапазона изменения параметра, удовлетворяющие условию разбиения единицы, вид которых представлен на рисунке 1. К достоинствам таких функций принадлежности относятся малый объем данных для их задания, простота модификации параметров функции. В процессе адаптации модели могут быть использованы иные подходы к построению функции принадлежности лингвистических термов [1].

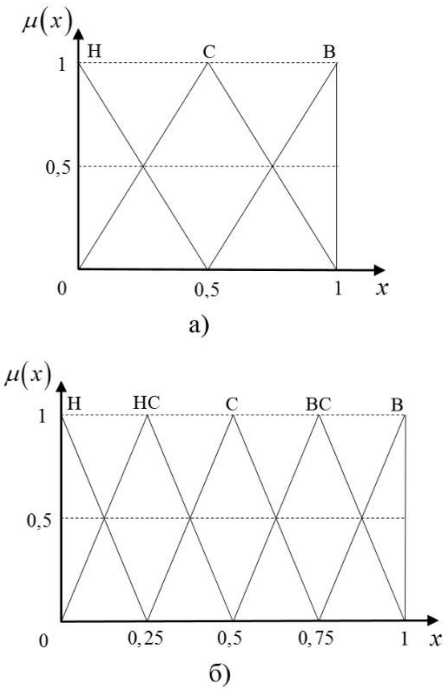

Рисунок 1. Треугольные симметричные функции принадлежности с двух сторонним ограничением диапазона изменения параметра, удовлетворяющие условию разбиения единицы

Исходные данные для расчета могут иметь вид, представленный в таблице 1. Процедуры построения синтаксических правила, выбора числа лингвистических термов множеств и их названий выполнены на эвристическом уровне, на основе анализа нормативно-технической документации [3-7] с учетом особенностей современного этапа развития космической отрасли.

Как видно из таблицы 2, для ЛП (X_C), (X_K), ($X_{ОП}$) функции принадлежности будут иметь вид, представленный на рисунке 1 а), а для ЛП ($X_И$) и ($X_П$) функции принадлежности будут иметь вид, представленный на рисунке 1 б).

Для определения степени доступности изделий предлагается использовать подход, основанный на построении нечеткой продукционной модели (НПМ), позволяющий найти количественное значение коэффициента оперативной доступности. Под (НПМ) будем понимать согласованное множество отдельных нечетких продукционных правил вида: «*если A, то B*» где *A* - предпосылка (антецедент) и *B* - заключение (консеквент) данного правила в виде нечетких высказываний, предназначенных для определения степени истинности заключений нечетких продукционных правил, на основе предпосылок с известной степенью истинности соответствующих правил [2].

Построение НПМ состоит из нескольких этапов, структура и содержание этапов построения модели представлены на рисунке 2.

Основные этапы построения НПМ, рекомендации, расчетные соотношения

В блок формирования исходных данных (БФИД) НПМ заносятся функции принадлежности (ФП) входных переменных $(\mu(x_1), \mu(x_2),\ldots,\mu(x_n))$ и выходной переменной ($\mu(x_R)$), подаются числовые значения входных переменных, которые в общем случае, могут быть определены экспертным путем либо вычислены по отдельным методикам, вычисляются степени принадлежности числовых значений входных переменных нечетким множествам.

Для удобства вычислений опишем ФП НМ, изображенные на рисунке 1 следующим образом:

- для ФП НМ, изображенного на рисунке 1 а):

$$\mu(x)=\begin{cases}\mu_H(x)=1-2x,\ если\ 0\le x\le 0{,}5\\ \mu_C(x)=\begin{cases}2x,\ если\ 0\le x\le 0{,}5\\ 2-2x,\ если\ 0{,}5\le x\le 1\end{cases}\\ \mu_B(x)=2x-1,\ если\ 0{,}5\le x\le 1\end{cases};\quad (1)$$

- для ФП НМ, изображенного на рисунке 1 б):

$$\mu(x)=\begin{cases}\mu_H(x)=1-4x, & если\ 0\le x\le 0{,}25\\ \mu_{HC}(x)=\begin{cases}4x, & если\ 0\le x\le 0{,}25\\ 2-4x, & если\ 0{,}25\le x\le 0{,}5\end{cases}\\ \mu_C(x)=\begin{cases}4x-1, если\ 0{,}25\le x\le 0{,}5\\ 3-4x, если\ 0{,}5\le x\le 0{,}75\end{cases}\\ \mu_{BC}(x)=\begin{cases}4x-2, & если\ 0{,}5\le x\le 0{,}75\\ 4-4x, если\ 0{,}75\le x\le 1\end{cases}\\ \mu_H(x)=4x-3, & если\ 0{,}75\le x\le 1\end{cases};\quad (2)$$

Таблица 1

Исходные данные

№	Лингвистическая переменная (обозначение)	Терм-множество $T(x)$	Синтаксическое правило, порождающее терм-множество $T(x)$ переменной *x*
1.	Импортонезависимость и унификация изделия ($x_И$)	В *(высокий)*	Изделие, его комплектующие и расходные материалы являются продукцией общепромышленного назначения отечественного производства, имеются аналоги, использование которых не требует изменений смежных узлов системы, не содержат импортные
		ВС *(выше среднего)*	Изделие является общепромышленной продукцией, до 25% комплектующих и расходных материалов уникальны или производятся за рубежом, имеются аналоги в случае использования которых не требуется значительное изменение смежных узлов системы.
		С *(средний)*	Изделие уникально, до 50% комплектующих и расходных материалов уникальны или производятся за рубежом, имеются аналоги в случае использования которых не требуется значительное изменение смежных узлов системы
		НС *(ниже среднего)*	Изделие уникально, до 75% его комплектующих и расходных материалов уникальны или импортируются, аналоги отсутствуют или требуют значительных изменений смежных узлов системы.
		Н *(низкий)*	Изделие, его комплектующие и расходные материалы полностью уникальны или импортируются, аналоги отсутствуют.
2.	Производство изделия ($x_П$)	В *(высокий)*	Изделие выпускается оригинальным производителем.
		ВС *(выше среднего)*	Изделие выпускается не оригинальным производителем.
		С *(средний)*	Изделие не выпускается, но при необходимости выпуск может быть возобновлен по документации оригинального производителя.

		НС *(ниже среднего)*	Изделие не выпускается, выпуск может быть возобновлен (начат) возобновление производства связано со значительными затратами финансовых, временных, материальных и трудовых ресурсов.
		Н *(низкий)*	Выпуск изделия прекращен.
3.	Наличие изделия в сети поставок (X_C)	В *(высокий)*	Изделие имеется в наличии в сети поставок и может быть приобретено.
		С *(средний)*	Изделие может быть канибализировано (в терминах [4]) с другого объекта.
		Н *(низкий)*	Изделие отсутствует в сети поставок и не эксплуатируется на других объектах.
4.	Комплектующие и расходные материалы для ремонта и технического обслуживания изделия (X_K)	В *(высокий)*	Доступны оригинальные комплектующие и расходные материалы для ремонта и обслуживания изделия.
		С *(средний)*	Доступны не оригинальные (частично) комплектующие и расходные материалы для ремонта и обслуживания изделия.
		Н *(низкий)*	Не доступны комплектующие и расходные материалы для ремонта и обслуживания изделия.
5.	Сервисное обслуживание изделия ($X_{ОП}$)	В *(высокий)*	Обслуживающий персонал имеет соответствующую квалификацию и опыт работы для ремонта и обслуживания изделия.
		С *(средний)*	Обслуживающий персонал не имеет соответствующей квалификации и опыта работы для ремонта и обслуживания изделия.
		Н *(низкий)*	Обслуживающий персонал отсутствует.
6.	Коэффициент оперативной доступности изделия (X_R)	В *(высокий)*	Вероятность того, что изделие будет доступно для приобретения в произвольный момент времени и будет оставаться доступным в течении заданного интервала времени составляет более 0,75.
		ВС *(выше среднего)*	Вероятность того, что изделие будет доступно для приобретения в произвольный момент времени и будет оставаться доступным в течении заданного интервала времени составляет 0,5 – 0,75.
		С *(средний)*	Вероятность того, что изделие будет доступно для приобретения в произвольный момент времени и будет оставаться доступным в течении заданного интервала времени составляет 0,25 – 0,5.
		НС *(ниже среднего)*	Вероятность того, что изделие будет доступно для приобретения в произвольный момент времени и будет оставаться доступным в течении заданного интервала времени составляет менее 0,25.
		Н *(низкий)*	Изделие не доступно для приобретения.

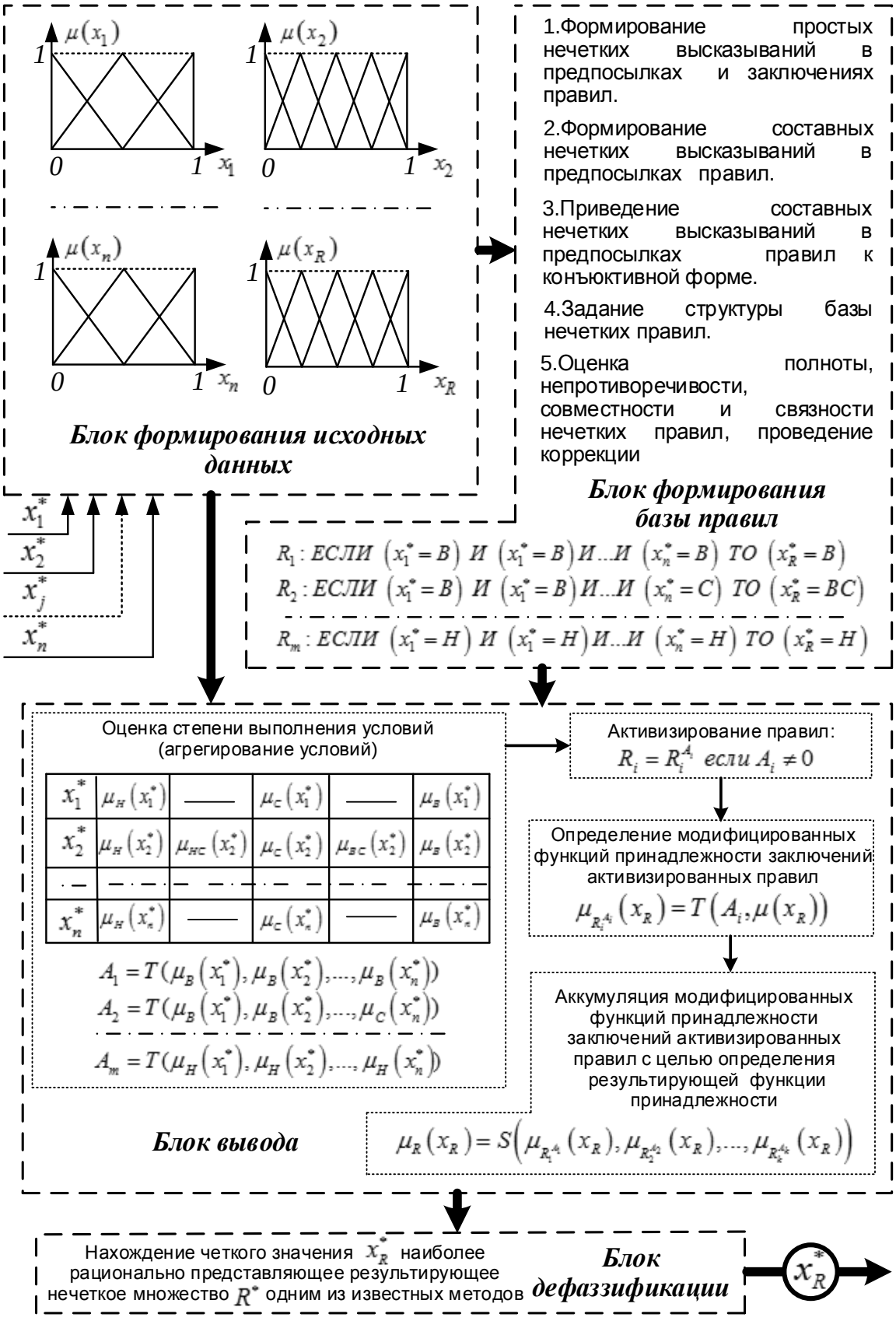

Рисунок .2. Структура и содержание этапов построения НПМ модели

Пример вычисления степени принадлежности числовых значений входной переменной нечетким множествам (процесс фаззификации) представлен на рисунке 3

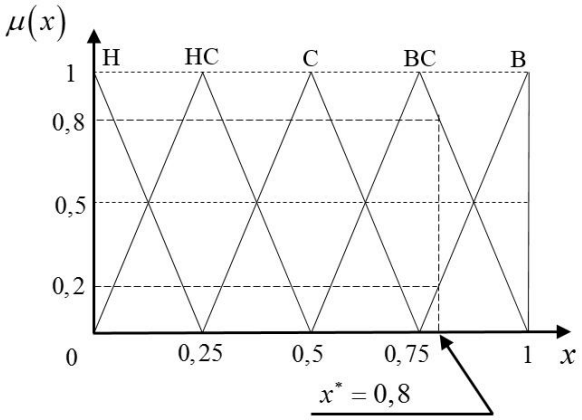

Рисунок 3. Пример вычисления степени принадлежности числовых значений входной переменной нечетким множествам (процесс фаззификации)

При $x^* = 0{,}8$ видно, что входное числовое значение в некоторой степени принадлежит нечетким множествам «*высокий*» и «*выше среднего*». По выражению (2) находим:

$$\mu_{BC}\left(x^*\right) = 4 - 4x^* = 0{,}8 \quad ;$$

$$\mu_{B}\left(x^*\right) = 4x^* - 3 = 0{,}2 .$$

Интерпретируется полученный результат следующим образом: утверждение, что входное значение x^* принадлежит НМ «*выше среднего*» является истинным со степенью 0,8; утверждение, что входное значение x^* принадлежит НМ «*высокий*» является истинным со степенью 0,2. Степень принадлежности входного значения x^* остальным НМ равна нулю.

База правил представляет собой совокупность продукционных правил в основе которых лежат эвристические предпочтения, описанные естественным языком в форме «*если - то*». Отдельное правило представляет собой нечеткое составное высказывание, образованные из простых, для комбинирования которых использованы нечеткие логические операторы конъюнкции «*И*» и дизъюнкции «*ИЛИ*», которые отражают причинно-следственные отношения между нечеткими значениями входных величин и выходной величиной, и соответствующее этому высказыванию нечеткое заключение, иными словами, правило есть некоторая совокупность предпосылок (антецедентов) обуславливающее некоторое заключение правила (консеквент).

Известно [2, 9], что база правил НПМ должна быть не избыточной, полной, связной, непротиворечивой и совместной. Можно выделить три основных подхода к формированию базы правил нечетких моделей с одним выходом и несколькими входами: обобщенный, прямой и обратный. Обобщенный подход подразумевает генерацию всех возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках правил и нечетких заключений. Недостатком обобщенного подхода является заведомая избыточность и противоречивость базы правил и необходимость привлечения дополнительных ресурсов для устранения этих недостатков. В основе прямого подхода лежит генерация множества правил исходя из всех возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках и определение соответствующих этим сочетаниям нечетких заключений. Обратный подход подразумевает определение соответствия каждому нечеткому заключению совокупности возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках. Недостатком обратного подхода является невозможность обеспечения полноты базы правил без дополнительной коррекции. Наиболее предпочтительным является прямой подход, так как позволяет уже на начальном этапе формирования базы правил обеспечить ее полноту и не избыточность.

Конъюнктивная форма предпосылок является наиболее предпочтительной, так как для конъюнктивной формы правил (при условии, что для определения степени выполнения условий правил используется оператор *t*-нормы *PROD*), может быть сформулировано условие полноты и совместности: база правил считается полной и совместной если сумма степеней выполнения условий всех правил R_i, $i = 1,\ldots,m$ для любого входного состояния $x^* = \left(x_1^*,\ldots,x_n^*\right)$ равна единице [9]:

$$\sum_{i=1}^{m} \mu_{R_i}\left(x^*\right) = 1, \forall x^* \in X \ , \qquad (3)$$

где $X = X_1 \times \ldots \times X_n$ - пространство входных значений модели.

Оценка степени выполнения условий каждого из *m* правил осуществляется по выражению:

$$A_1 = T\left(\mu_B\left(x_1^*\right), \mu_B\left(x_2^*\right), \ldots, \mu_B\left(x_n^*\right)\right);$$

---;

$$A_i = T\left(\mu_C\left(x_1^*\right), \mu_C\left(x_2^*\right), \ldots, \mu_C\left(x_n^*\right)\right); \quad (4)$$

---;

$$A_m = T\left(\mu_H\left(x_1^*\right), \mu_H\left(x_2^*\right), \ldots, \mu_H\left(x_n^*\right)\right),$$

где A_i, ($i = 1,\ldots,m$) – степень выполнения условий i-ого правила; T - какой-либо оператор t-нормы. Наиболее часто применяемым является оператор *PROD*, в ходе настройки модели может быть использован иной оператор.

Активизирование правил осуществляется исходя из условия:

$$R_i := R_i^{A_i}, \text{если } A_i \neq 0. \quad (5)$$

Правило считается активизированным, если степень выполнения условия правила не равна нулю. В случае несоблюдения условия (5) правило исключается из дальнейшего рассмотрения.

Построение модифицированной функций принадлежности заключения осуществляется с использование активизированных правил по выражению:

$$\mu_{R_i^{A_i}}\left(x_R\right) = T\left(A_i, \mu\left(x_R\right)\right); \quad (6)$$

где T - какой-либо оператор t-нормы.

Для аккумуляции модифицированных функций принадлежности заключений активизированных правил и определение результирующей функции принадлежности используется выражение:

$$\mu_R\left(x_R\right) = S\left(\mu_{R_1^{A_1}}\left(x_R\right), \mu_{R_2^{A_2}}\left(x_R\right), \ldots, \mu_{R_k^{A_k}}\left(x_R\right)\right); \quad (7)$$

где S - какой-либо оператор s-нормы.

Из всего многообразия методов дефаззификации наиболее универсальным и широко применяемым является метод высот, который отличается высокой чувствительностью и относительной простотой вычислений (позволяет исключить из алгоритма расчета выражения (6) и (7)).

Сущность метода высот заключается в замене нечетких множеств выходной лингвистической переменной синглетонами, которые представляют собой одноэлементные множества, совпадающие с модальными значениями соответствующих НМ. Синглетоны в каждом правиле активизируются аналогично нечетким множествам. При использовании данного подхода нахождение четкое значения выходной переменной осуществляется по выражению:

$$x_R^* = \frac{\sum_{i=1}^{m^{A_i}} x_{R_i} \mu_{R_i^{A_i}}\left(x_R\right)}{\sum_{i=1}^{m^{A_i}} \mu_{R_i^{A_i}}\left(x_R\right)}, \quad (8)$$

где m^{A_i} - число активизированных правил; x_{R_i} - значение синглетона (модальное значение НМ); $\mu_{R_i^{A_i}}\left(x_R\right)$ степень выполнения i-ого активизированного правила.

Схема алгоритма расчета представлена на рисунке 4.

Настройка (обучение) модели может быть осуществлена с использованием обучающей выборки, сформированной, например, на основе имеющихся опытных данных или экспертным путем. Обучающая выборка должна состоять из множества примеров, каждый из которых включает в себя набор входных значений и соответствующее эталонное значение выходной переменной. Для каждого примера обучающей выборки на основе построенной модели определяется значение выходной переменной и вычисляются ошибки для всех примеров обучающей выборки:

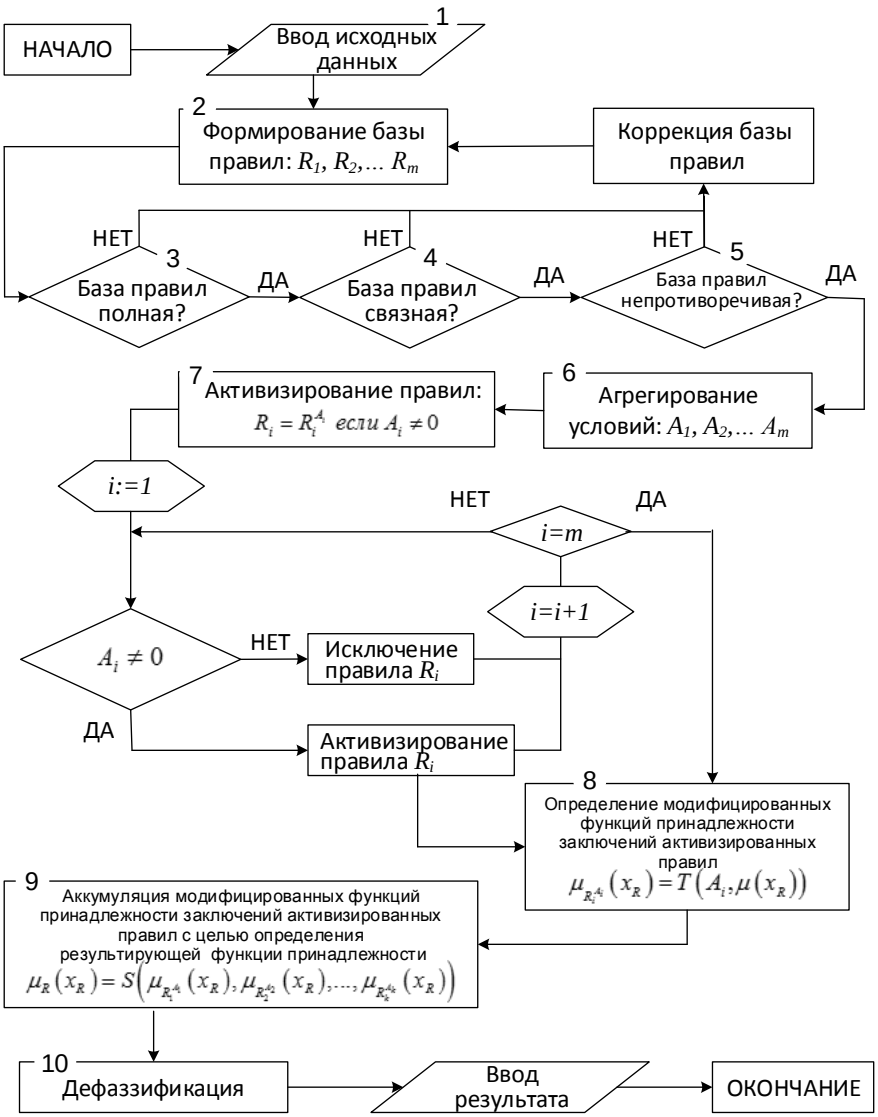

Рисунок 4. Схема алгоритма расчета

$$E_k = \frac{\left(x^*_{R_k} - x^*_{Э_k}\right)^2}{2},$$

где $x^*_{R_k}$ - значение выходной переменной, определенное на основе построенной модели в k - м примере обучающей выборки; $x^*_{Э_k}$ - эталонное значение выходной переменной в k – м примере обучающей выборки.

Процедура коррекции модели повторяется итерационно до того момента, когда значение ошибки по каждому примеру обучающей выборки не будет превышать некоторое установленное пороговое значение:

$$E_k \le \varepsilon, k = 1,\dots,K,$$

где K - общее количество примеров в обучающей выборке.

В ряде случаев можно использовать оценку средней суммарной погрешности модели с учетом всех примеров обучающей выборки:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^{K}\left(x^*_{R_k} - x^*_{Э_k}\right)^2}{K} < \varepsilon.$$

В ходе настройки модели изменениям и модификациям могут подвергаться вид, форма, количество нечетких множеств, описывающих входные и выходные ЛП, смещение их модальных значений, введение в модель коэффициентов влияния входных переменных на итоговое значение искомой переменой, декомпозиция модели с несколькими входными переменными на несколько простых моделей с последующим их агрегированием, а также выбор различных операторов *s*-нормы и *t*-нормы, выбор метода дефаззификации.

Пример расчета

Исходные данные для расчета представлены в таблице 1. Предварительный анализ структуры и состава модели указывает на необходимость проведения ряда преобразований. Число продукционных правил базы правил модели экспоненциально зависит от числа входов модели и числа имеющихся в ней нечетких множеств. В рассматриваемом случае количество правил, полученных в виде всех возможных комбинаций функций принадлежности всех входных переменных и определенных соответствующих этим сочетаниям нечетких заключений столь велико, что делает задачу формирования полной, непротиворечивой, совместной и связной базы правил практически не выполнимой.

Необходимо выполнить декомпозицию модели по какому-либо логическому правилу, приведя ее к блочному виду, на модели (модель № 1 и модель № 2, рисунок 5) с числом входных переменных не более трех с последующим их объединением в однородную структуру (модель № 3, рисунок 5). Данный подход позволит значительно сократить общее количество правил и обеспечить построение баз правил приемлемого качества.

База нечетких правил с предпосылками конъюнктивного вида в модели с числом входов больше трех представляет собой решетку нечетких гиперкубов, расположенных параллельно осям координат, что значительно усложняет процесс формирования полной, совместной, непротиворечивой и связной базы правил, ее коррекции в процессе настройки модели и значительно увеличивает объем вычислений. Ограниченность тремя входными переменными позволит наглядно проиллюстрировать прямой геометрический способ построения базы правил и уменьшить объем вычислений.

Рассмотрим последовательно каждую из моделей, изображенных на рисунке 5 в соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 4.

Модель №1

Шаг 1. Исходными данными для модели являются функции принадлежности $\mu(x_И)$ и $\mu(x_П)$ входных ЛП $(x_И)$ и $(x_П)$ соответственно. Зададим четкие значения входных переменных $x_И^* = 0{,}8$, $x_П^* = 0{,}6$. Обозначим результирующую ЛП как (x_B), вид ФП которой представлена на рисунке 5.

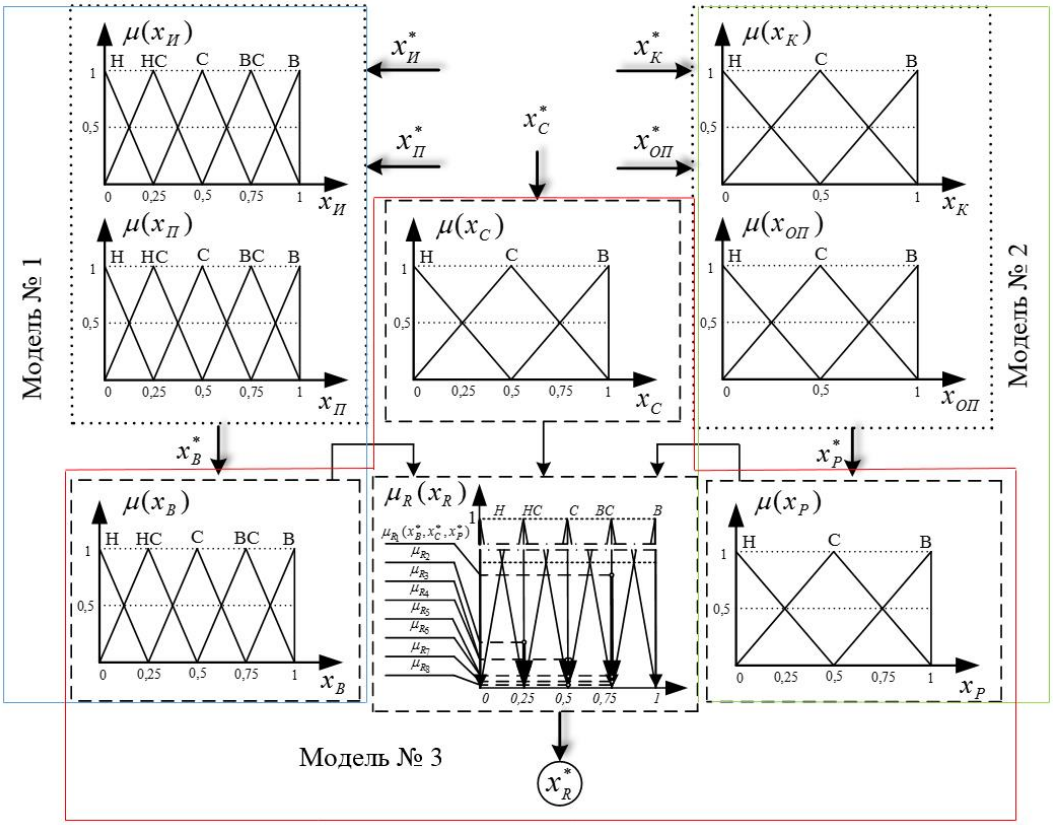

Рисунок 5. Декомпозиция модели

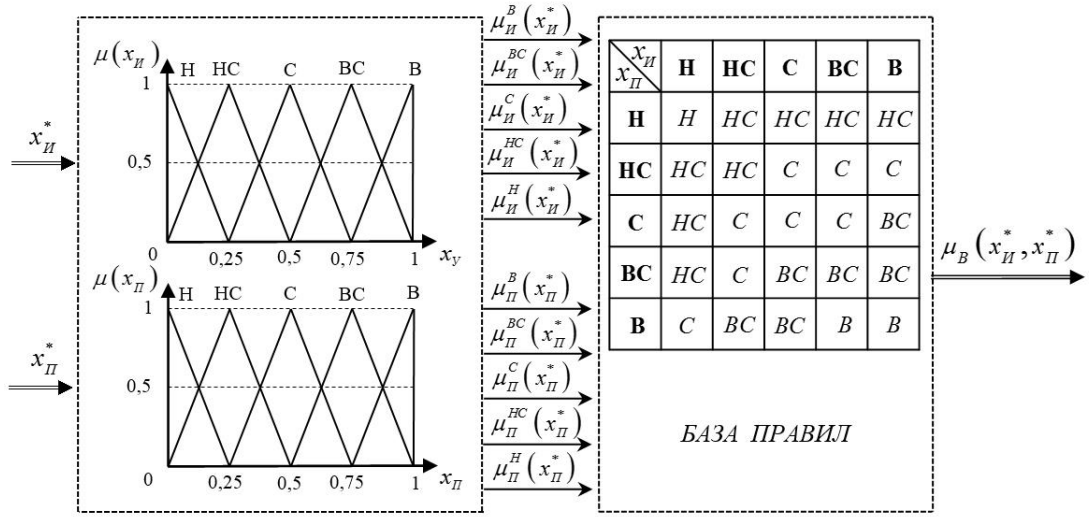

Рисунок 6. Построение базы правил конъюнктивного типа путем генерации всех возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках и определение соответствующих этим сочетаниям нечетких заключений

Шаг 2. Построение базы правил конъюнктивного типа путем генерации всех возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках и определение соответствующих этим сочетаниям нечетких заключений в виде, представленном на рисунке 6. Количество правил - 25.

Шаг 3. Базы правил является полной, так как заданы все нечеткие заключения относительно всех предпосылок, область входных значений заполнена.

Шаг 4. База правил является связной, так как в ней отсутствуют смежные правила (задаваемые в смежных ячейках таблицы правил), пересечение содержащихся в них заключений нечетких множеств является пустым. Связность базы правил повышает гладкость поверхности модели (рисунок 7), а несвязность обусловливает появление на ней участков резкого подъема (крутого спуска).

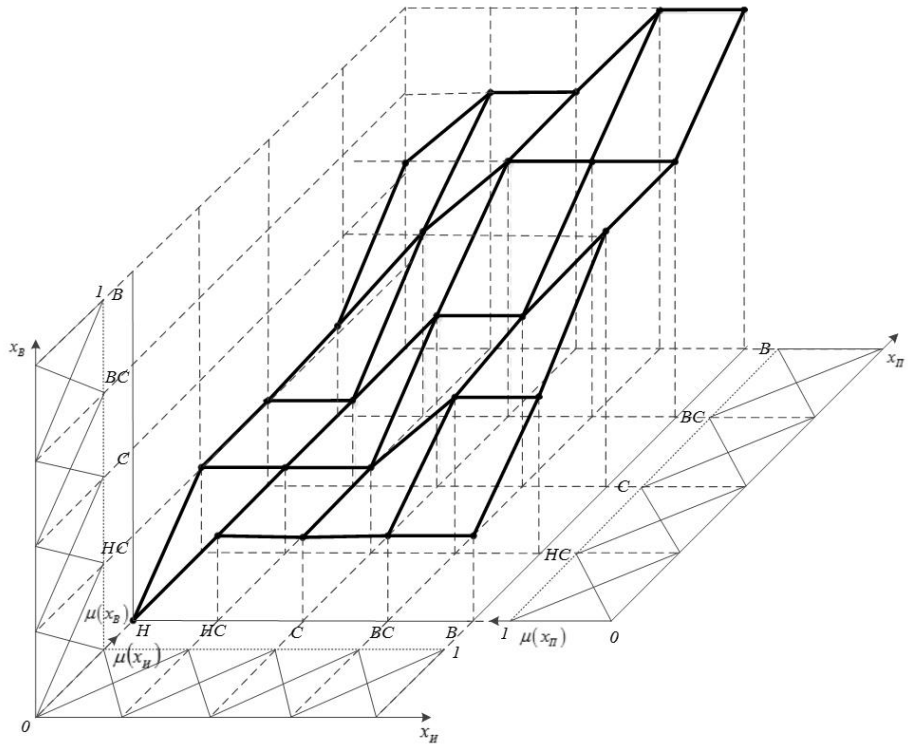

Рисунок 7. Связность базы правил повышает

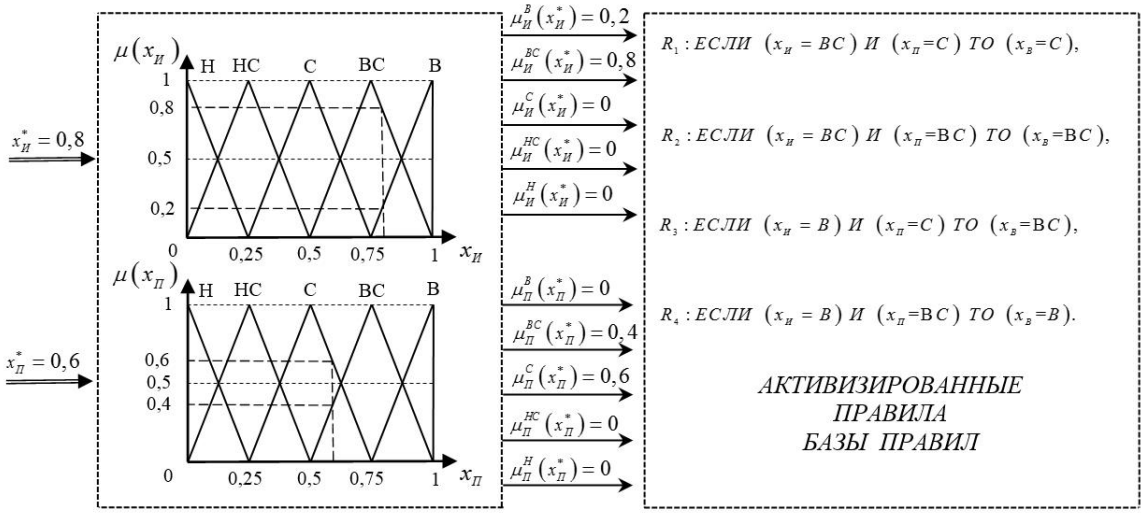

Рисунок 8. Схема активизирования правил

Таблица 2

Активизированные правила и степени выполнения условий в модели №1

Активированное правило	Степень выполнения условия правила
ЕСЛИ $(x_И = ВС)$ И $(x_П = С)$ ТО $(x_В = С)$	$\mu_{R_1}(x_И^*, x_П^*) = \mu_{ВС \cap С}(x_И^*, x_П^*) = T(\mu_И^{ВС}(x_И^*), \mu_П^С(x_П^*)) = 0,48$
ЕСЛИ $(x_И = ВС)$ И $(x_П = ВС)$ ТО $(x_В = ВС)$	$\mu_{R_2}(x_И^*, x_П^*) = \mu_{ВС \cap ВС}(x_И^*, x_П^*) = T(\mu_И^{ВС}(x_И^*), \mu_П^{ВС}(x_П^*)) = 0,32$
ЕСЛИ $(x_И = В)$ И $(x_П = С)$ ТО $(x_В = ВС)$	$\mu_{R_3}(x_Н^*, x_П^*) = \mu_{В \cap С}(x_И^*, x_П^*) = T(\mu_И^В(x_И^*), \mu_П^С(x_П^*)) = 0,12$
ЕСЛИ $(x_И = В)$ И $(x_П = ВС)$ ТО $(x_В = В)$	$\mu_{R_4}(x_И^*, x_П^*) = \mu_{В \cap ВС}(x_И^*, x_П^*) = T(\mu_И^В(x_Н^*), \mu_И^{ВС}(x_П^*)) = 0,08$

Шаг 5. База правил является непротиворечивой (согласованной), так как она не содержит несовместные правила, т. е. правила, имеющие одинаковые условия, но разные заключения.

Шаг 6. Оценка степени выполнения условий каждого правила при заданных значениях входных переменных по выражению (4) с использованием оператора t-нормы PROD. Схема оценки степени выполнения условий (агрегирование условий) представлена на рисунке 8. Механизм определения степени принадлежности входных значений нечетким множествам рассмотрен выше (рисунок 3).

Шаг 7. Активизирование правил по условию (5). Схема активизирования правил представлена на рисунке 8. Активизированные правила и степень выполнения условий правил представлены в табл. 2 и для удобства размещены в порядке убывания степени выполнения условий. Условие (3) выполняется, следовательно, база правил полная и совместная.

Шаг 8. Не рассматривается.

Шаг 9. Не рассматривается.

Шаг 10. Дефаззификация - вычисление четкого значения выходной переменой с использованием метода высот по выражению (8). Схема процесса дефаззификации представлена на рисунке 9.

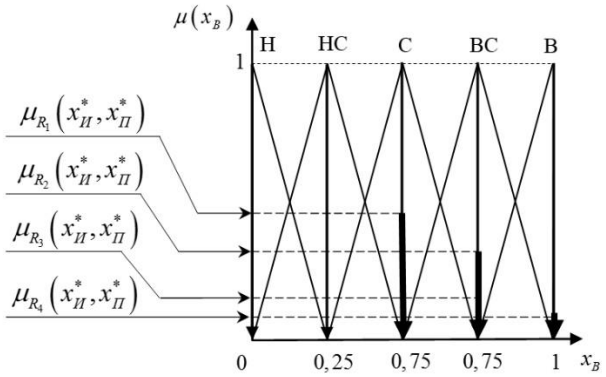

Рисунок 9. Схема процесса дефаззификации

Вывод результата. Применяя формулу (8) получим значение искомой величины:

$$x_B^* = \frac{1\cdot 0,08 + 0,75\cdot 0,12 + 0,75\cdot 0,32 + 0,5\cdot 0,48}{0,08 + 0,12 + 0,32 + 0,48} = 0,65$$

Модель №2

Шаг 1. Исходными данными для модели являются функции принадлежности $\mu(x_K)$ и $\mu(x_{ОП})$ входных ЛП (x_K) и $(x_{ОП})$ соответственно. Зададим четкие значения входных переменных $x_K^* = 0,9$, $x_{ОП}^* = 0,7$. Обозначим результирующую *ЛП* как (x_P), ФП которой представлена на рисунке 8.

Шаг 2. Построение базы правил конъюнктивного типа путем генерации всех возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках и определение соответствующих этим сочетаниям нечетких заключений в виде, представленном на рисунке 10. Количество правил - 9.

Шаг 3. Базы правил является полной, так как заданы все нечеткие заключения относительно всех предпосылок и область входных значений заполнена.

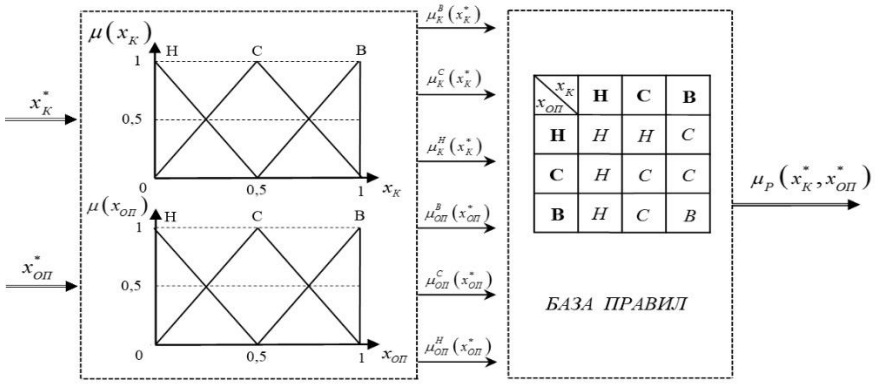

Рисунок 10. Построение базы правил конъюнктивного типа путем генерации всех возможных сочетаний нечетких высказываний в предпосылках и определение соответствующих этим сочетаниям нечетких заключений в виде

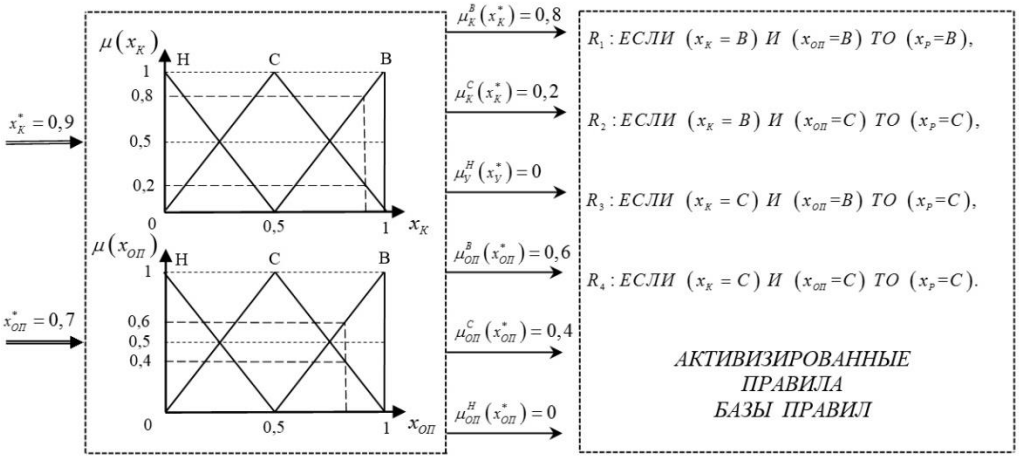

Рисунок 11. Схема активизирования правил

Таблица 3

Активированные правила и степени выполнения условий в модели №2

Активированное правило	Степень выполнения условия
ЕСЛИ $(x_K = B)$ и $(x_{ОП} = B)$ ТО $(x_P = B)$	$\mu_{R_1}(x_K^*, x_{ОП}^*) = \mu_{B \cap B}(x_K^*, x_{ОП}^*) = T(\mu_K^B(x_K^*), \mu_{ОП}^B(x_{ОП}^*)) = 0,48$
ЕСЛИ $(x_K = B)$ и $(x_{ОП} = C)$ ТО $(x_P = C)$	$\mu_{R_2}(x_K^*, x_{ОП}^*) = \mu_{B \cap C}(x_K^*, x_{ОП}^*) = T(\mu_K^B(x_K^*), \mu_{ОП}^C(x_{ОП}^*)) = 0,32$
ЕСЛИ $(x_K = C)$ и $(x_{ОП} = B)$ ТО $(x_P = C)$	$\mu_{R_3}(x_K^*, x_{ОП}^*) = \mu_{C \cap B}(x_K^*, x_{ОП}^*) = T(\mu_K^C(x_K^*), \mu_{ОП}^B(x_{ОП}^*)) = 0,12$
ЕСЛИ $(x_K = C)$ и $(x_{ОП} = C)$ ТО $(x_P = C)$	$\mu_{R4}(x_K^*, x_{ОП}^*) = \mu_{C \cap C}(x_K^*, x_{ОП}^*) = T(\mu_K^C(x_K^*), \mu_{ОП}^C(x_{ОП}^*)) = 0,08$

Шаг 8. Не рассматривается.

Шаг 9. Не рассматривается.

Шаг 10. Дефаззификация - вычисление четкого значения выходной переменой с использованием метода высот по выражению (8). Схема процесса дефаззификации представлена на рисунке 12.

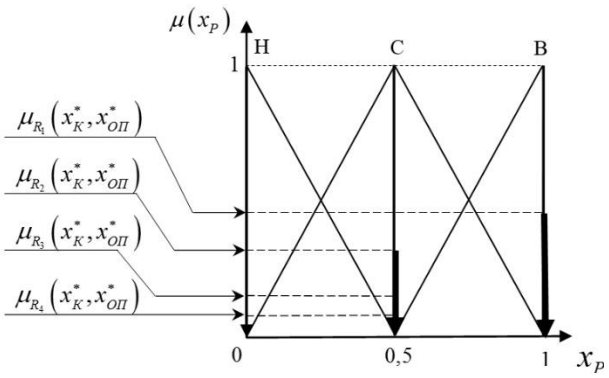

Рисунок 12. Схема процесса дефаззификации

Вывод результата. Применяя формулу (8) получим значение искомой величины:

$$x_P^* = \frac{1 \cdot 0,32 + 0,5 \cdot 0,48 + 0,5 \cdot 0,08 + 0,5 \cdot 0,12}{0,08 + 0,12 + 0,32 + 0,48} = 0,65$$

Модель № 3.

Шаг 1. Исходными данными для модели являются: $\mu(x_B)$ - функция принадлежности *ЛП* (x_B) и ее значение $x_B^* = 0,6$ (см. модель №1); $\mu(x_P)$ - функция принадлежности ЛП (x_P) и ее значение $x_P^* = 0,65$ (см. модель №2); $\mu(x_C)$ - функция принадлежности ЛП (x_C) и ее заданное значение $x_C^* = 0,4$; $\mu(x_R)$ - функция принадлежности выходной ЛП (x_R).

Шаг 2. Построение базы правил конъюнктивного типа и представление ее с использованием прямого пространственно-геометрическим способа в виде, представленном на рисунке 13. Количество правил - 45.

Шаг 3. Базы правил является полной, так как заданы все нечеткие заключения относительно всех предпосылок и область входных значений заполнена.

Шаг 4. База правил является связной, так как в ней отсутствуют смежные правила (задаваемые в смежных ячейках куба правил), пересечение содержащихся в них заключений нечетких множеств является пустым.

Шаг 5. База правил является непротиворечивой (согласованной), так как она не содержит несовместные правила, т. е. правила, имеющие одинаковые условия, но разные заключения.

Шаг 6. Оценка степени выполнения условий каждого правила при заданных значениях входных переменных по выражению (4) с использованием оператора *t*-нормы *PROD.* Схема оценки степени выполнения условий (агрегирование условий) представлена на рисунке 14. Механизм определения степени принадлежности входных значений нечетким множествам рассмотрен в моделях №1 и №2.

Шаг 7. Активизирование правил по условию (5). Схема активизирования правил

представлена на рисунке 15. Активированные правила и степень выполнения условий правил представлены в табл. 4 и для удобства размещены в порядке убывания степени выполнения условий. Контроль (подтверждение) полноты и совместности базы правил по выражению (3) - база правил полная и совместная. Используемый подход построению базы правил позволяет дополнительно контролировать выполнение условия связности активизированных (выделены жирной линией на рисунке 15) и смежных с ними правил (указаны стрелками на рисунке 15), вносить локальную коррекцию относительно активизированных правил.

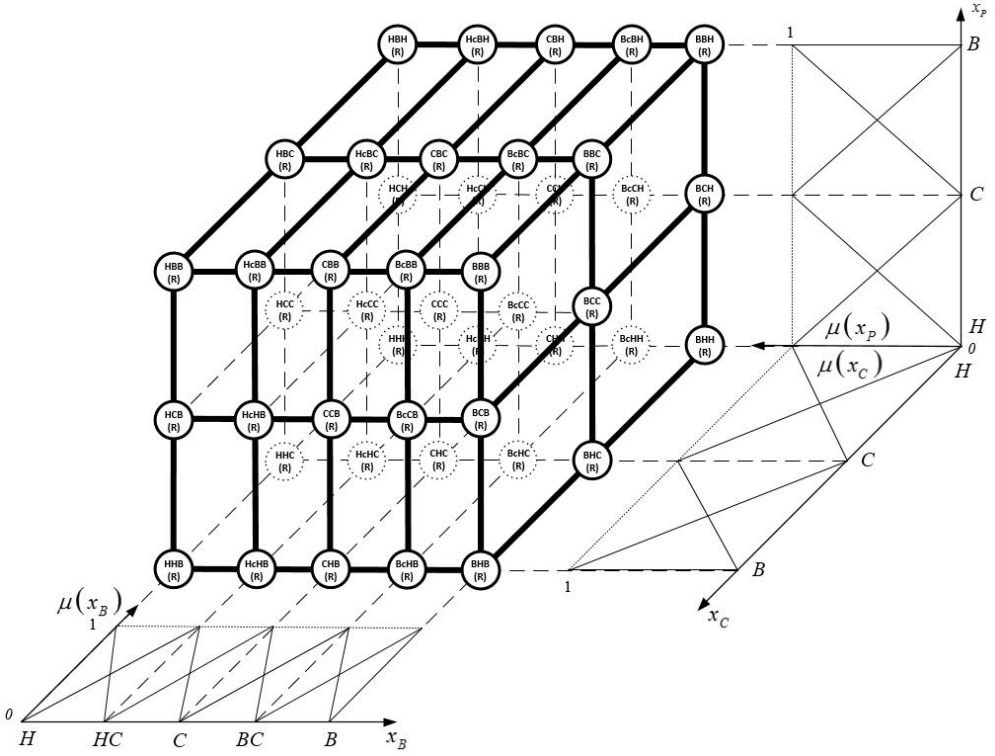

Рисунок 13. Построение базы правил конъюнктивного типа и представление ее с использованием прямого пространственно-геометрическим способа

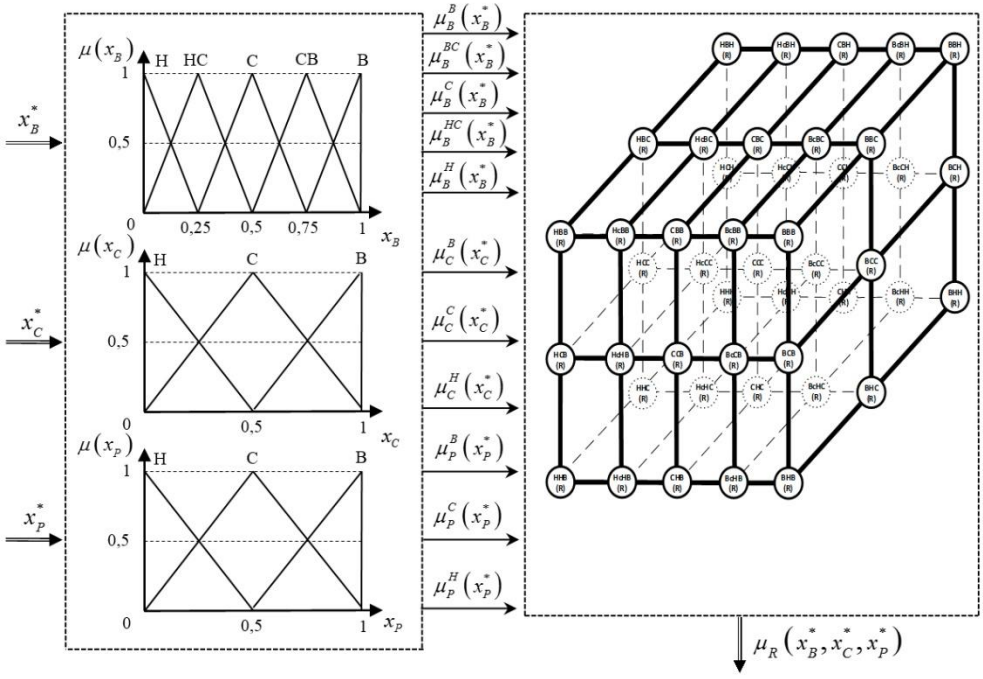

Рисунок 14. Схема оценки степени выполнения условий (агрегирование условий)

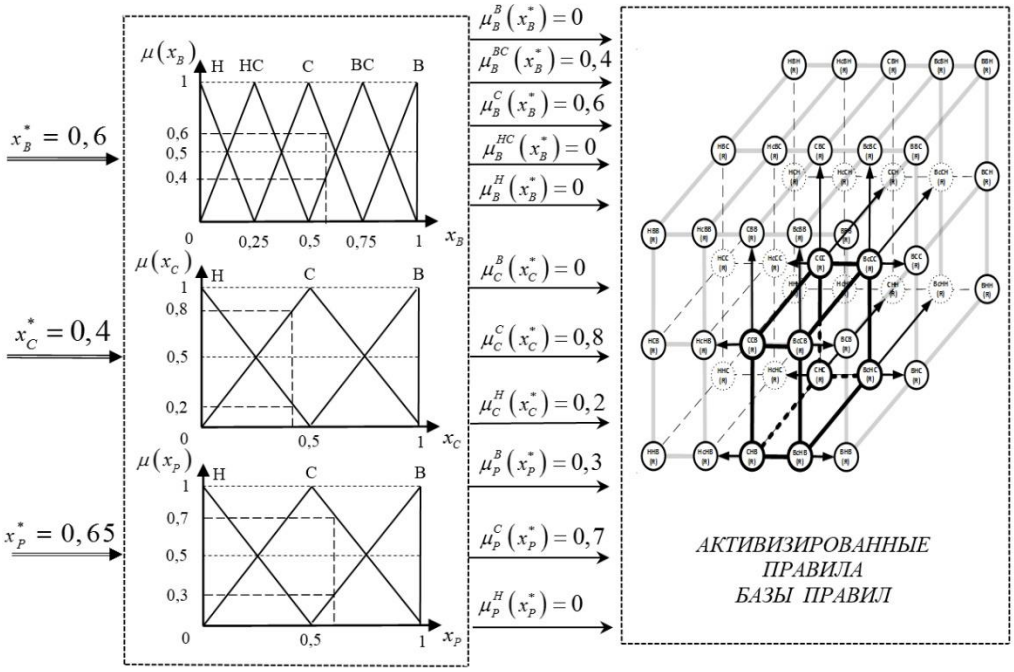

Рисунок 15. Контролироль выполнение условия связности активизированных и смежных с ними правил

Шаг 8. Не рассматривается.

Шаг 9. Не рассматривается.

Шаг 10. Дефаззификация - вычисление четкого значения выходной переменой с использованием метода высот по выражению (8).

Схема процесса дефаззификации представлена на рисунке 16.

Вывод результата: Применяя формулу (8) получим значение искомой величины

$$x_R^* = \frac{0,75\cdot(0,448+0,048+0,028)+0,5\cdot(2\cdot 0,112+0,048+0,012)+0,25\cdot 0,192}{0,448+0,048+0,028+2\cdot 0,112+0,048+0,012+0,192} = 0,58$$

Таблица 4

Активированные правила и степени выполнения условий обобщающей модели

Активированное правило	Степень выполнения условия
ЕСЛИ $(x_B = BC)$ И $(x_C = C)$ И $(x_P = C)$ ТО $(x_R = BC)$	$\mu_{R_1}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{BC\cap C\cap C}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^{BC}(x_B^*), \mu_C^C(x_C^*), \mu_P^C(x_P^*)) = 0,448$
ЕСЛИ $(x_B = C)$ И $(x_C = H)$ И $(x_P = C)$ ТО $(x_R = HC)$	$\mu_{R_2}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{BC\cap C\cap B}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^{BC}(x_B^*), \mu_C^C(x_C^*), \mu_P^B(x_P^*)) = 0,192$
ЕСЛИ $(x_B = BC)$ И $(x_C = H)$ И $(x_P = C)$ ТО $(x_R = C)$	$\mu_{R_3}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{BC\cap H\cap C}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^{BC}(x_B^*), \mu_C^H(x_C^*), \mu_P^C(x_P^*)) = 0,112$
ЕСЛИ $(x_B = C)$ И $(x_C = C)$ И $(x_P = C)$ ТО $(x_R = C)$	$\mu_{R_4}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{C\cap C\cap C}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^C(x_B^*), \mu_C^C(x_C^*), \mu_P^C(x_P^*)) = 0,112$

ЕСЛИ $(x_B = BC)$ И $(x_C = H)$ И $(x_P = B)$ ТО $(x_R = BC)$	$\mu_{R_5}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{BC \cap H \cap B}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^{BC}(x_B^*), \mu_C^H(x_C^*), \mu_P^B(x_P^*)) = 0,048$
ЕСЛИ $(x_B = C)$ И $(x_C = C)$ И $(x_P = B)$ ТО $(x_R = C)$	$\mu_{R_6}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{C \cap C \cap B}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^C(x_B^*), \mu_C^C(x_C^*), \mu_P^B(x_P^*)) = 0,048$
ЕСЛИ $(x_B = BC)$ И $(x_C = C)$ И $(x_P = B)$ ТО $(x_R = BC)$	$\mu_{R_7}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{C \cap H \cap C}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^C(x_B^*), \mu_C^H(x_C^*), \mu_P^C(x_P^*)) = 0,028$
ЕСЛИ $(x_B = C)$ И $(x_C = H)$ И $(x_P = B)$ ТО $(x_R = C)$	$\mu_{R_8}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = \mu_{C \cap H \cap B}(x_B^*, x_C^*, x_P^*) = T(\mu_B^C(x_B^*), \mu_C^H(x_C^*), \mu_P^B(x_P^*)) = 0,012$

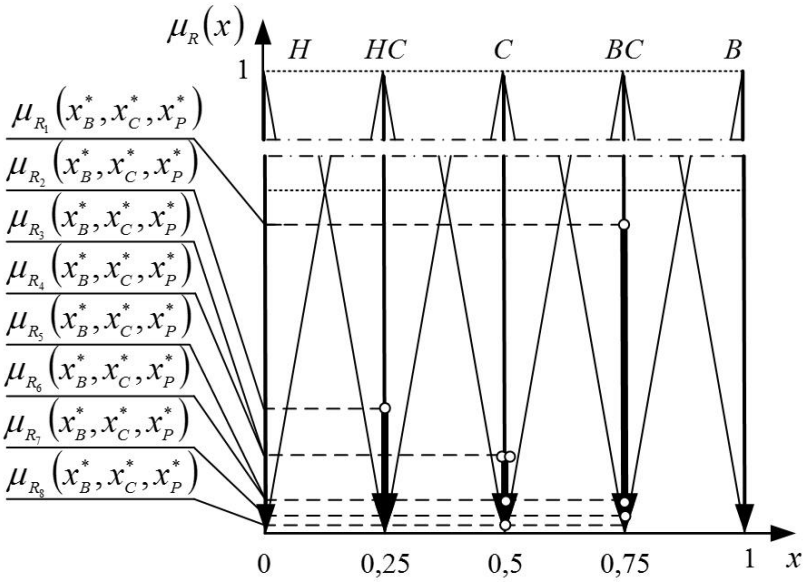

Рисунок 16. Схема процесса дефаззификации

Выводы

В статье обоснована необходимость учета в информационно-аналитических системах поддержки принятия решения по эксплуатации РКТ нового показателя, характеризующего возможность приобретения изделий - коэффициента оперативной доступности, с целью повышения обоснованности решений по снижению вероятности отказа комплекта ЗИП (не допущению снижения коэффициента готовности комплекта ЗИП), т.е. недопущению неустранимых отказов оборудования, связанных с невозможностью устранения отказа ввиду отсутствия изделий в комплекте ЗИП. Водимый в рассмотрение коэффициент оперативной доступности может быть использован в качестве одного из критериев при проектировании сложных технических систем, планировании модернизации и реконструкции систем, обосновании качественного и количественного состава комплектов ЗИП.

Описана процедура оценивания степени доступности для приобретения изделий РКТ на основе нечеткой продукционной модели, позволяющая в качестве исходных данных использовать нечеткую информацию о комплексе факторов морального устаревания и наличии в составе изделий иностранных комплектующих. Приведен пример расчета коэффициента оперативной доступности, получено его числовое значение.iea

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решения на основе нечетких

моделей: примеры использования. – Рига: Знание, 1990.– 184 с.
2. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012 – 284 с.
3. ГОСТ Р 27.203-2012 Надежность в технике. Управление устареванием. – М.: Стандартинформ, 2014. – 23 с.
4. ГОСТ Р 56129-2014 (МЭК 62402:2007) Управление номенклатурой устаревающих покупных комплектующих изделий / Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.
5. ГОСТ Р 56135-2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 13 с.
6. ГОСТ 27.003-2016 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 18 с.
7. ГОСТ 27.507-2015 Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов. – М.: Стандартинформ, 2017. – 48 с.
8. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 166 с.
9. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. [Электронный ресурс] / А. Пегат; пер. с англ. — 3-е изд. (эл.). – Электрон. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – (Адаптивные и интеллектуальные системы).

EVALUATING THE AVAILABILITY OF PROCUREMENT COMPONENTS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS IN THE CONDITIONS OF SANCTIONS RESTRICTIONS ON THE BASIS OF FUZZY INFORMATION ABOUT THE COMPLEX OF FACTORS OBSOLESCENCE OF THE ELEMENT BASE

Baranov Dmitry Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, General Director of JSC "Rocket and Space Center" Progress ", Samara
Basotin Evgeniy Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg
Shestopalova Olga Lvovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Voskhod branch of the Moscow Aviation Institute (National Research University) in Moscow, Russia. Baikonur, Baikonur

The article substantiates the need to take into account in information and analytical decision support systems for the operation of rocket and space technology a new indicator characterizing the possibility of purchasing a product, taking into account information about a complex of factors of obsolescence and restrictions due to the introduction of international sanctions on the purchase of foreign components - the coefficient of operational availability. Determination of the value of the coefficient of operational availability makes it possible to increase the validity of management decisions to prevent fatal equipment failures associated with the absence of failed elements in the set of spare parts, tools and accessories. An approach to determining the quantitative value of the coefficient of operational availability based on a fuzzy production model is proposed. A direct method for constructing a base of rules of a model and a spatial-geometric method of representing a base of rules are implemented, in their totality, simplifying the procedures for ensuring the completeness, connectivity, consistency and compatibility of the base of rules. Recommendations for the construction of fuzzy production models are given, the basic concepts are considered, and the basic design relationships are presented. A calculation algorithm is developed and a practical example of calculating the operational availability coefficient is considered. Key words: fuzzy information, linguistic variable, fuzzy set, availability for purchase, obsolescence, sanction restrictions, fuzzy production model, rule base.

Key words: fuzzy information, linguistic variable, fuzzy set, availability for purchase, obsolescence, sanction restrictions, fuzzy production model, rule base

REFERENCES:

1. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. Prinyatiye resheniya na osnove nechetkikh modeley: primery ispol'zovaniya [*Decision making based on fuzzy models: use cases*]. – Riga: Znaniye, 1990.– 184 p.
2. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. Nechetkiye modeli i seti [*Fuzzy models and networks*]. – 2-ye izd., stereotip. – M.: Goryachaya liniya–Telekom, 2012 – 284 p.

3. GOST R 27.203-2012 Nadezhnost' v tekhnike. Upravleniye ustarevaniyem. [*Reliability in technology. Obsolescence Management*] – M.: Standartinform, 2014. – 23 p.
4. GOST R 56129-2014 (MEK 62402:2007) Upravleniye nomenklaturoy ustarevayushchikh pokupnykh komplektuyushchikh izdeliy. Integrirovannaya logisticheskaya podderzhka eksportiruyemoy produktsii voyennogo naznacheniya. [*Management of the nomenclature of obsolete purchased components. Integrated logistics support for exported military products*] – M.: Standartinform, 2015. – 7 p.
5. GOST R 56135-2014 Upravleniye zhiznennym tsiklom produktsii voyennogo naznacheniya. Obshchiye polozheniya [*Life Cycle Management of Military Products. General Provisions*]. – M.: Standartinform, 2016. – 13 p.
6. GOST 27.003-2016 Nadezhnost' v tekhnike. Sostav i obshchiye pravila zadaniya trebovaniy po nadezhnosti [*Reliability in technology. Composition and general rules for setting reliability requirements*]. – M.: Standartinform, 2017. – 18 p.
7. GOST 27.507-2015 Nadezhnost' v tekhnike. Zapasnyye chasti, instrumenty i prinadlezhnosti. Otsenka i raschet zapasov [*Reliability in technology. Spare parts, tools and accessories. Assessment and calculation of reserves*]. – M.: Standartinform, 2017. – 48 p.
8. Zade L. Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i yego primeneniye k prinyatiyu priblizhonnykh resheniy [*The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions*]: Per. s angl. – M.: Mir, 1976. – 166 p.
9. Pegat A. Nechetkoye modelirovaniye i upravleniye [*zzy modeling and control*]. [Electronic resource] / A. Pegat; per. s angl. — 3-ye izd. (el.). – Elektron. – M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2015. – (Adaptivnyye i intellektual'nyye sistemy).