УДК 519.816

МЕТОДИКА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ МЕТЕОЗАВИСИМОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

С. Н. Башлыков

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 22.01.2016 г.

Аннотация. В статье рассматривается методический подход поддержки принятия решений при управлении метеозависимой авиационной системой, позволяющий решать задачи прямого и обратного нечеткого логического вывода.
Ключевые слова: поддержка принятия решений, нечеткий логический вывод, нечеткие продукционные правила, функция принадлежности.
Annotation. The article considers the methodological approach of decision support during weather-sensitive aviation management system that allows to solve problems of direct and inverse fuzzy logical inference.
Keywords: decision support, fuzzy logical conclusion, fuzzy productional rules, membership function.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием качественного функционирования авиационной системы является учет метеорологической обстановки при планировании выполнения задания с помощью авиации. При этом для принятия решений требуется информация не только о текущем состоянии атмосферы в районе аэродрома для планирования параметров взлета, но и прогноз изменения метеорологических параметров по маршруту выполнения задания и его завершения в месте посадки летательного аппарата. Такую информацию должна предоставлять служба метеорологического обеспечения полетов. Информация поступает лицу, принимающему решения (ЛПР), которое на основании характеристик задания, существующих нормативных правил и практического опыта осуществляет выбор авиационных средств, летного состава, конкретного времени выполнения задания, параметров маршрута и необходимых функциональных операций. Принятые решения во многом определяют вероятность и полноту выполнения задания, что обуславливает не только требования к качеству прогнозов и измерений метеорологической информации, но и требования к алгоритмам обработки информации и обоснованности правил принятия решений.

В современных условиях возрастает сложность авиационных систем, одновременно с этим ограничивается время, отводимое на планирование и организацию полетов. «Ручной» режим планирования сложной системы уже не всегда может обеспечить обоснованность применяемых правил вывода решений. С другой стороны, сокращение временных сроков при «ручном» планировании также влечет снижение обоснованности выбранных решений, а, следовательно, снижение вероятности полного и качественного выполнения задания. Возникает объективная необходимость автоматизации процессов обработки информации для принятия решений и создания экспертной системы, включающей совокупность правил принятия решений и механизм вывода решений, основанные на знаниях и опыте лучших специалистов-экспертов. Математический инструментарий формализации процессов принятия решений может основываться на детерминированных моделях оптимального управления [1]; вероятностных моделях выбора [2], а также на активно развиваемых нечетких продукционных моделях логического вывода [3, 4]. Мы будем рассматривать процессы планирования выполнения авиационного задания, когда временной интервал, отведенный на принятие решений, жестко ограничен, исходная информация содержит объективную неопределенность, в основном, качественного характера, а решения принимаются в значительной мере на основе опыта и знаний ЛПР. Качество этих решений должно гарантировать согласованный уровень компромисса между требованиями безопасности полета и необходимостью выполнения поставленной задачи. В этих условиях адекватным математическим инструментом поддержки принятия решений может служить нечеткий логический вывод на основе нечетких продукционных правил, являющихся наиболее общим видом нечетких моделей, используемых для описания и анализа сложных слабо формализованных систем и процессов. Существенным достоинством нечетких продукционных моделей, по сравнению, например, с нейросетевыми моделями, является простота и прозрачность интерпретации модельных зависимостей исследуемой системы, что позволяет ЛПР осознанно пользоваться этим инструментом и доверительно относиться к его рекомендациям.

Создание такого инструмента не тривиальная задача и для ее решения требуется обоснованные алгоритмы построения моделей нечетких продукций для поддержки принятия решений. Цель настоящей работы – разработка методических подходов к моделированию прямых и обратных нечетких задач логического вывода, которые могли бы послужить основой для разработки инструментального средства в помощь ЛПР при решении авиационных задач.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

На вероятность безаварийного выполнения полета, $P_{ба} \in [0;1]$ влияют метеорологические условия, вектор характеристик которых обозначим $x = (x_1, \ldots, x_n)$, а также вектор управления полетом $u = (u_1, \ldots, u_m)$. Компонентами вектора метеорологических характеристик могут быть: дальность горизонтальной видимости, сила ветра, нижняя и верхняя границы облачности и т. п. Компонентами вектора управления могут быть: квалификация пилотов, тип летательного аппарата, время вылета, маршрут полета и т. п. В таком случае можно говорить об установлении некоторого соответствия между множеством пар значений векторов x, u и вероятностью безаварийного выполнения полета

$$P_{ба}\!:\!F:\{(x,u)\} \to P_{ба}. \qquad (1)$$

Будем считать, что при идеальных метеорологических характеристиках, высококвалифицированном экипаже и надежным летательным аппарате, вероятность безаварийного полета равна единице. При значениях метеорологических характеристик ниже предельно допустимых (установленных для каждого типа летательного аппарата) вероятность безаварийного полета равна нулю при любых значениях компонент вектора u. В остальных случаях $P_{ба} \in [0;1]$.

Соответствие (1) не может быть функциональным. Резонно допустить, что это соответствие носит качественный, нечеткий характер. Будем рассматривать систему нечетких продукционных правил как адекватное отображение этого соответствия:

$$\textit{ЕСЛИ}(x\,\textit{есть}\,A_i) \wedge (u\,\textit{есть}\,B_i)\textit{ТО}(P_{ба}\ \textit{есть}\,C_i), \qquad (2)$$

здесь A_i, B_i, C_i – нечеткие множества (нечеткие высказывания), определенные на X, U, $[0;1]$ соответственно. Истинность этих высказываний определяется на отрезке [0;1] при помощи функций принадлежности $\mu_A(x)$; $\mu_B(u)$; $\mu_C(P_{ба}) \in [0;1]$.

Пусть в результате анализа требований по авиационному заданию и требований по метеорологической безопасности полета установлена нижняя граница вероятности безаварийного полета, $P_{\min}$. Тогда управление авиационной системой будет заключаться в решение двух типов задач:

– прямой задаче, когда при заданных значениях компонент векторов x и u требуется определить значение $P_{ба}$;

– обратной задаче, когда при заданном значении вектора x и заданном $P_{ба} \geq P_{\min}$, требуется выбрать соответствующие значения компонент вектора u.

Решение этих задач предполагает построение нечеткой продукционной модели, включающей: описание нечетких переменных системы (2) с соответствующими функциями принадлежности; модель агрегирования составных предпосылок в каждом правиле системы (2); модель нечеткого логического вывода; модель аккумулирования заключений всех нечетких продукций (2) и модель дефаззификации аккумулированных заключений.

Задача исследования состоит в построении такой нечеткой продукционной модели, которая обеспечит наиболее простое и адекватное решение прямой и обратной задачи.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

В нечетких продукционных моделях для решения прямых и обратных задач используются в основном два способа нечеткого вывода [3]: обобщенный модус поненс (fuzzy modus ponens) и обобщенный модус толленс (fuzzy modus tollens) соответственно. Процедура вывода включает три этапа:

– общий этап для первого и второго способа – задание нечеткой импликации $R: A \to B,$ которая может быть представлена в виде нечеткой продукции $ЕСЛИ(x\ есть\ A)ТО(y\ есть\ B)$;

– задание нечеткой посылки $x'\ есть\ A'$ для прямой задачи и нечеткой посылки $y'\ есть\ B'$ для обратной задачи;

– формирование вывода $y'\ есть\ B'$ для прямой задачи и формирование вывода $x'\ есть\ A'$ для обратной задачи.

Модель нечеткой импликации занимает центральное место в составе нечетких продукционных моделей и может быть задана различными способами. При этом в рассматриваемой задаче модель нечеткой импликации должна отвечать следующим требованиям:

I. – Нечеткая продукционная модель должна обеспечивать решение обратной задачи с заданным значением вероятности безаварийного полета;

II. – Нечеткая продукционная модель должна обеспечивать взаимное соответствие результатов прямого и обратного вывода при соответствии посылок;

III. – Реализация нечеткой продукционной модели и работа с ней должны быть максимально просты и интуитивно понятны ЛПР, что является необходимым условием практического использования разрабатываемой методики.

При решении практических задач выбора наибольшее распространение получила импликация Мамдани [5], функция принадлежности которой имеет вид:

$$\mu_R(x, y) = \min\{\mu_A(x); \mu_B(y)\}. \qquad (3)$$

Здесь $\mu_A(x)$ и $\mu_B(y)$ – функции принадлежности нечеткой посылки A и нечеткого заключения B.

Результат прямого вывода B' с использованием модели нечеткой импликации (3) и заданной нечеткой посылки $x'\ есть\ A'$ представим в виде [3] $B' = A' \bullet R_м$, где $R_м$ – импликация (нечеткое отношение) Мамдани; «$\bullet$» – операция композиции (композиционное правило нечеткого логического вывода).

Модель нечеткого логического вывода записывается как функция принадлежности нечеткого множества B'

$$\mu_{B'}(y) = \sup_x\{\min[\mu_{A'}(x); \mu_{R_i}(x, y)]\}. \qquad (4)$$

Модель обратного вывода $A' = R_м \bullet B'$ записывается следующим образом

$$\mu_{A'}(x) = \sup_y\{\min[\mu_{R_i}(x, y); \mu_{B'}(y)]\}. \qquad (5)$$

Выражения (4) и (5) позволяют проверить требование II., например, применительно к конечным множествам A и B.

Пусть функция принадлежности импликации Мамдани задана матрицей

$$\mu_{R_i}(x, y) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0,75 & 0,5 & 0,25 & 0 \\ 1 & 0,75 & 0,5 & 0,25 & 0 \end{pmatrix}.$$

Допустим $A' = (0; 1; 0)$. Тогда, в соответствии с выражением (4) получаем $B' = (0,5; 0,75; 0,5; 0,25; 0)$. Используем полученный результат для обратного вывода по выражению (5) и получим $A' = (0; 0,75; 0,75)$. Несовпадение A' в прямом и обратном выводе указывает на несоответствие модели нечеткого вывода Мамдани требованию II. Более того, если рассматривать составную посылку нечеткой продукции как в правилах системы (2), то применение известного алгоритма логического вывода становится невозможным, т. е. требование I. также не удовлетворяется. Полученный результат подтверждает, утверждение о том, что процедуры обратного вывода не тривиальны и требуют дополнительных исследований в конкретных условиях предметной области [6].

В качестве альтернативной модели нечеткого вывода рассмотрим модель Ларсена, в основе которой лежит нечеткая импликация в виде произведения функций принадлежности посылки и заключения [4]:

$$\mu_{R_Л}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y). \tag{6}$$

В этом случае функция принадлежности B' примет вид

$$\mu_{B'}(y) = \sup_x \{\mu_{A'}(x) \cdot \mu_{R_Л}(x, y)\}. \tag{7}$$

В [3] отмечается, что модель вывода Ларсена отличается простотой реализации и высокой чувствительностью к изменениям входных переменных в посылках нечетких продукционных правил, что удовлетворяет требованию III. Для того чтобы убедиться в возможности модели Ларсена удовлетворить требованиям I. и II. необходимо определить механизм нечеткого логического вывода, применительно к задаче выбора вектора u в системе (2) и соответствующую методику построения нечеткой продукционной модели.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ ВЫВОДЕ

Будем рассматривать методику построения модели нечетких продукций в аспекте выбора типа функций принадлежности для фаззификации нечетких переменных; модели агрегирования составных предпосылок, модели дефаззификации вывода по каждой продукции и модели аккумулирования заключений по всем правилам системы (2).

Будем считать, что для фаззификации метеорологических и управляющих переменных в посылках системы (2) достаточно рассматривать функции принадлежности в классе нормализованных триангулярных функций.

Посылки системы (2) определяются как перечисление метеорологических показателей и характеристик авиационной системы. Условия посылки A', для которых необходимо сделать вывод представляют собой результаты измерений или прогноза значений метеорологических показателей представленные четкими числами – x^0, четкими числами u^0 задаются такие характеристики как соответствие типов летательных аппаратов, квалификации пилотов и других возможных управляющих переменных условиям авиационной задачи. Специфика переменных u состоит в том, что они определены на дискретных множествах (состав, типы и т.п.). Для получения аналитических функций принадлежности $\mu_B(u)$ необходимо перейти от дискретных множеств к непрерывным аргументам этих функций. Такой переход может быть осуществлен, например, при помощи метода парных сравнений Терстоуна [7] с получением вектора предпочтений управляющих альтернатив, заданного на отрезке $u \in [0;1]$.

Для моделирования агрегатов нечетких предпосылок составленных с помощью нечетких связок вида $\wedge$ применяются T – нормы. Примем для реализации этих операций алгебраический подход, при котором $\mu_A(x) T \mu_B(u) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(u)$. [4].

Тогда модель нечеткого логического вывода (7) на основе импликации Ларсена (6) примет вид

$$\mu_{C'}(y) = \\ = \sup_x [\mu_{A'}(x^0) \cdot \mu_{B'}(u^0) \cdot \mu_A(x) \cdot \mu_B(u) \cdot \mu_C(y)]. \tag{8}$$

Поскольку верхняя граница нормализованных функций $\mu_A(x)$ и $\mu_B(u)$ всегда равна единице, выражение (8) можно сократить до следующего вида

$$\mu_{C'}(y) = \mu_{A'}(x^0) \cdot \mu_{B'}(u^0) \cdot \mu_C(y). \tag{9}$$

Полученное выражение (9) позволяет легко решать прямую задачу для каждого правила системы (2) путем подстановки результатов измерения метеорологических показателей при заданной экспертом функции $\mu_C(y)$. Аккумулирование полученных функций $\mu_{Ci'}(y)$, где i – номер правила в системе (2) предлагается осуществлять на основе граничного алгебраического подхода

$$\mu_{C'}(y) = \\ = \min\{\mu_{C1'}(y) + \ldots + \mu_{Ci'}(y) + \ldots + \mu_{Cn'}(y);1\}. \quad (10)$$

Отметим, что переменная $y = P_{ба}$ играет роль вероятности безаварийного выполнения полета. Следовательно, допустимое множество ее значений представляет собой отрезок [0;1]. Функция принадлежности $\mu_{C'}(y)$ задает семантику высказываний типа «вероятность высокая» или «вероятность низкая». Для проверки выполнения неравенства $P_{ба} \geq P_{\min}$ необходимо выполнить дефаззификацию этой функции. Модель дефаззификации функции $\mu_{C'}(y)$ должна обеспечивать следующее естественное требование: при идеальных метеорологических условиях полетов и идеальных управляющих параметрах вероятность безаварийного полета должна равняться единице. Для функций принадлежности триангулярного типа этому требованию отвечает наибольшее значение, определяемое по формуле:

$$y^0 = \arg\sup_y \mu_{C'}(y). \quad (11)$$

Выражение (11) является завершающим в процессе реализации методики прямого вывода.

Обратная задача будет состоять в определении функции принадлежности переменной u при заданной вероятности $P_{ба}$ безаварийного выполнения полета и измеренных метеорологических параметрах x.

Запишем модель обратного вывода (5) в форме, полученной по аналогии с выводом выражения (9) для произвольного правила системы (2):

$$\mu_{B'}(u) = \mu_{A'}(x^0) \cdot \mu_B(u) \cdot \mu_{C'}(y^0). \quad (12)$$

Теперь требование II. формализовано можно записать в виде следующего высказывания:

если результат прямой задачи рассчитывается по выражению

$$y^0 = \arg\sup_y \mu_{C'}(y) = \\ = \arg\sup_y \mu_{A'}(x^0) \cdot \mu_{B'}(u^0) \cdot \mu_C(y), \quad (13)$$

а дефаззифицированное значение управляющей переменной u^* является результатом обратного вывода, полученного на основе выражения (11), то подстановка u^* в (13) должна приводить к результату – y^0.

Предлагаемую методику решения обратной задачи будем основывать на следующих рассуждениях. Поскольку получить адекватное решение классическим подходом не удается, поставим задачу упростить процедуру логического вывода и получить приблизительное решение с помощью следующего выражения

$$u^* = \arg\sup_u \mu_{B'}(u) = \\ = \arg\sup_y \mu_{A'}(x^0) \cdot \mu_B(u) \cdot \mu_{C'}(y^0). \quad (14)$$

Как видно из (14) возникает задача восстановления аккумулированной функции принадлежности $\mu_{C'}(y^0)$ по заданному значению $P_{ба} = y^0$, которая имеет множество решений; надо определить аккумулированный вид функции и численное значение функции $\mu_{A'}(x^0)$, а также необходимо задаться видом функции $\mu_B(u)$.

Введем ряд допущений, имеющих отношение только к процедуре решения обратной задачи. Рассмотрим этапы решения обратной задачи и принятые допущения.

1 этап. Необходимо построить отображение $Y^* \to \{\mu_{C'}(y)\}$, такое что $\arg\sup_y \mu_{C'}(y) = y^*$. Выберем следующий вид аккумулированной функции принадлежности – $\mu^*_{C'}(y) = y^* \cdot y$, тогда такое отображение становится очевидным и однозначным.

2 этап. Выполним аккумулирование функций принадлежности метеорологических показателей по n продукциям системы (2) по аналогии с (10):

$$\mu_{A'}(x) = \min\{\mu_{A1'}(x) + \ldots + \mu_{Ai'}(x) + \ldots + \mu_{An'}(x);1\},$$

где $\mu_{Ai'}(x) = \mu_{A1i'}(x_1) \cdot \mu_{A2i'}(x_2)$.

3 этап. Найдем соответствие $U^0 = \{u^0 \in [0;1]\} \to \mu_{B'}(u)$, такое что

$\arg\sup\limits_{u} \mu_{B'}(u) = u^0$. Однозначное соответствие может устанавливаться выражением $\mu^0_{B'}(u) = u^0 \cdot u$.

4 этап. Примем, что для обратного вывода $\mu_B(u) = u$.

5 этап. Записать выражение для обратного вывода (14) в виде с подстановкой функций принадлежности, полученных на предыдущих этапах

$$\begin{aligned}\mu{*}_{B'}(u) &= \mu_{A'}(x^0)\cdot\mu_B(u)\cdot\mu_{C'}(y^0)\cdot k = \\ &= \mu_{A'}(x^0)\cdot u\cdot\mu_{C'}(y^0),\end{aligned} \tag{15}$$

6 этап. Решить обратную задачу с использованием выражения (15).

Проиллюстрируем полученную методику на примерах прямого и обратного вывода.

Пример прямого и обратного вывода по предложенной методике

Рассмотрим пример, демонстрирующий применение разработанной методики. Пусть при измеренных параметрах метеорологических условий и заданного нижнего предела допустимой вероятности безаварийного полета $P_{\min}$ требуется выбрать квалификацию пилотов, обеспечивающую возможность выполнения авиационного задания. Допустим, что метеорологические условия полета определяются двумя параметрами: дальностью горизонтальной видимости в метрах, $x_1 \in [0;1000]$ и силой ветра в м/сек, $x_2 \in [0;30]$. Пусть управляющим воздействием выступает квалификация пилота. Квалификация задается на безразмерной шкале $u \in [0;1]$, также как вероятность безаварийного полета, $y \in [0;1]$. Авиационные эксперты сформировали следующие правила безопасности полета:

1. «ЕСЛИ дальность видимости высокая и ветер слабый и квалификация пилота очень высокая, ТО вероятность безаварийного полета высокая».
2. «ЕСЛИ дальность видимости средняя и ветер не очень сильный и пилот средней квалификации, ТО вероятность безаварийного полета средняя».
3. «ЕСЛИ дальность видимости низкая и ветер сильный и пилот низкой квалификации, ТО вероятность безаварийного полета низкая».

Функции принадлежности нечетких величин в правилах заданы экспертами для следующих лингвистических переменных.

Дальность видимости: «высокая» –

$$\mu_{A11}(x_1) = \begin{cases} 0,002x_1 - 1,\ x_1 > 500, \\ 0,\ x_1 \le 500. \end{cases}$$

«средняя» –

$$\mu_{A12}(x_1) = \begin{cases} 0,004x_1 - 2,\ x_1 < 750, \\ 4 - 0,004x_1,\ x_1 \ge 750. \end{cases}$$

«низкая» –

$$\mu_{A13}(x_1) = \begin{cases} 1,\ x_1 \le 500; \\ 2 - 0,002x_1,\ x_1 > 500. \end{cases}$$

Сила ветра:

«слабый» – $\mu_{A21}(x_2) = 1 - 0,033x_2$;

«не очень сильный» –

$$\mu_{A22}(x_2) = \begin{cases} 0,066x_{2,}\ x_2 < 15; \\ 2 - 0,066x_2,\ x_2 \ge 15. \end{cases}$$

«сильный» – $\mu_{A23}(x_2) = 0,033x_2$.

Квалификация пилота:

«очень высокая» – $\mu_{B1}(u) = 2u$;

«средняя» – $\mu_{B2}(u) = \begin{cases} 2u,\ u < 0,5, \\ 2 - 2u,\ u \ge 0,5. \end{cases}$

«низкая» – $\mu_{B3}(u) = 1 - u$.

Вероятность безаварийного полета:

«высокая» – $\mu_{C1}(y) = y$;

«средняя» – $\mu_{C2}(y) = \begin{cases} 2y,\ y < 0,5, \\ 2 - 2y,\ y \ge 0,5. \end{cases}$

«низкая» – $\mu_{C3}(y) = 1 - y$.

Выбор квалификации пилота для обеспечения возможности выполнения задания может производиться двумя путями: решением прямой задачи, т. е. путем перебора значений квалификации u^0 пока не выполнится неравенство $y^0 > P_{\min}$; или решением обратной задачи – при заданном значении y^0 определение u^0.

Для решения прямой задачи воспользуемся выражением (9), записанным для каждого приведенного правила. Пусть метеорологические условия характеризуются следующими значениями: $x_1^0 = 700$, $x_2^0 = 10$, Пусть ЛПР назначил пилота с квалификацией $u^0 = 0,4$.

Для первого правила:

$$\mu_{C1'}(y) = \mu_{A11'}(x_1^0)\cdot\mu_{A12'}(x_1^0)\cdot\mu_{B1'}(u^0)\cdot\mu_{C1}(y) = $$
$$= 0,4\cdot 0,67\cdot 0,8\cdot y = 0,214y.$$

В соответствии с (12) $y_1^0 = 0,214$.

Для второго правила

$$\mu_{C2'}(y) =$$
$$= \mu_{A21'}(x_1^0)\cdot\mu_{A22'}(x_1^0)\cdot\mu_{B2'}(u^0)\cdot\mu_{C2}(y) =$$
$$= 0,8\cdot 0,66\cdot 0,8\times$$
$$\times\begin{cases} 2y \text{ при } y \le 0,5 & = 0,845y \\ 2-2y \text{ при } y > 0,5 & = 0,845 - 0,845y, \end{cases}$$
$$y_2^0 = 0,845.$$

Для третьего правила

$$\mu_{C3'}(y) = \mu_{A31'}(x_1^0)\cdot\mu_{A32'}(x_1^0)\cdot\mu_{B3'}(u^0)\cdot\mu_{C3}(y) =$$
$$= 0,6\cdot 0,33\cdot 0,6\cdot(1-y) = 0,119 - 0,119y,$$
$$y_3^0 = 0,119.$$

Далее в соответствии с выражением (10) находим аккумулированные заключения:

$$\mu_C = \begin{cases} 0,119 + 0,940y \text{ при } y \le 0,5; \\ 0,964 - 0,750y \text{ при } y > 0,5. \end{cases} \quad y^0 = 0,964.$$

Полученное решение можно интерпретировать следующим образом. Если метеорологические условия полета в норме, то пилот примерно средней квалификации почти гарантировано выполнит безаварийный полет, а следовательно может выполнить авиационное задание.

Пусть теперь метеорологические условия ухудшатся, а полет предстоит совершить с тем же пилотом. Это соответствует, например, значениям $x_1 = 600$, $x_2 = 25$, $u = 0,4$.

Повторение вышеприведенной схемы расчета с новыми данными дает вероятность безаварийного полета $y^0 = 0,752$. Как видно квалификация пилота в новых метеоусловиях может оказаться недостаточной.

Предположим, что допустимым нижним пределом вероятности безаварийного полета является величина $y^0 = 0,9$. Необходимо рассчитать минимальную квалификацию пилота, обеспечивающую эту величину при тех же характеристиках метеоусловий. Расчет величины u^* проведем с применением предложенной методики обратного вывода.

Этап 1. Требуемому значению $y^* = 0,9$ соответствует функция принадлежности $\mu_{C'}(y) = 0,9y$, значение $\mu_{C'}(y^0) = 0,9$.

Этап 2. Аккумулированная по трем правилам функция принадлежности текущих метеоусловий примет вид:

$\mu_{A'}(x^0) = 0,2\cdot 0,34 + 0,4\cdot 0,68 + 0,8\cdot 0,66 = 0,868.$

Этап 3. Примем однозначное соответствие между значением управляющей переменной и функцией принадлежности в виде $\mu_{B'}(u) = u^0\cdot u$.

Этап 4. Примем $\mu_B(u) = u$.

Этап 5. Запишем выражение для обратного вывода

$$\mu^*_{B'}(u) = 0,868\cdot u\cdot 0,9 = 0,781u.$$

Этап 6. Найдем требуемую квалификацию пилота: $\arg\sup\limits_u 0,781u = 0,781$.

Таким образом квалификация пилота обеспечивающая вероятность безаварийного полета при ухудшении метеоусловий должна быть почти в два раза больше.

Проверим требуемое соответствие обратного и прямого вывода. Для этого подставим полученное значение $u^* = 0,781$ в выражение для прямого вывода (9). Произведя необходимые вычисления для первого, второго и третьего правил по методике прямого вывода, получим аккумулированное значение в виде функции

$$\mu_{C'}(y) = \begin{cases} 0,116 + 0,839y \text{ при } y \le 0,5; \\ 0,965 - 0,859y \text{ при } y > 0,5. \end{cases}$$
$$y^0 = \arg\sup_y \mu_{C'}(y) = 0,965 > 0,9.$$

Полученное значение вероятности безаварийного полета оказалось больше допустимого нижнего предела, что допустимо. Полученная погрешность является следствием принятых допущений при обратном выводе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика поддержки принятия решений при управлении метеозависимой авиационной системой позволяет решать задачи прямого и обратного нечеткого логического вывода. Согласованность результатов решения прямой и обратной задачи достигается с некоторой погрешностью, обусловленной принятыми упрощающими допущениями для организации процедур обратного вывода. Дальнейшие исследования планируется направить на минимизацию этой погрешности, что позволит на базе усовершенствованной методики создать программный продукт для автоматизации процедур поддержки принятия решений по организации выполнения авиационных заданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мирошник И. В.* Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – СПб. : Питер, 2006. – 272 с.

2. *Матвеев М. Г.* Управление организационно-технической системой в условиях метеорологической неопределенности / М. Г. Матвеев, В. В. Михайлов. – Воронеж : ВВАИУ, 2006. – 128 с.

3. *Борисов В. В.* Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – М. : Горячая линия –Телеком, 2007. – 284 с.

4. *Хижняков Ю. Н.* Алгоритмы нечеткого, нейронного и нечетконейронного управления в системах реального времени. – Пермь : ПНИТУ, 2013. – 160 с.

5. *Mamdani E. N.* Advanses in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controllers // Intern. J. of Man-Machine Studies. – 1976. – Vol.8 – P. 667–678.

6. *Блюмин С. Л.* Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения / С. Л. Блюмин, И. А. Шуйкова, П. В. Сараев, И. В. Черпаков. – Липецк : ЛЭГИ, 2002. – 111 с.

7. *Матвеев М. Г.* Модели и методы искусственного интеллекта / М. Г. Матвеев, А. С. Свиридов, Н. А. Алейникова. – М. : Финансы и статистика, 2008. – 448 с.

Башлыков С. Н. – адъюнкт кафедры теоретической гидрометеорологии, гидрометеорологический факультет, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).
E-mail: bashlykov.sergey @ mail.ru

Bashlykov S. N. – postgraduate student, department of theoretical hydrometeorology, hydrometeorological faculty , Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh).