

УДК 681.3

Н.А. КОРОЛЮК

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Украина***МЕТОД ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНИРУЕМОГО ПЕРЕХВАТА**

В статье рассматривается метод логического вывода в логико-лингвистической продукционной модели процесса принятия решений при определении параметров планируемого перехвата, основанный на нечетких моделях логических выводов Мамдани и Такаги-Сугено.

логико-лингвистическая продукционная модель, операция нечеткого логического вывода, модели нечеткого вывода Мамдани, Такаги-Сугено, логические уравнения

Введение

Процесс определения параметров планируемого перехвата на этапе назначения воздействий истребителями на воздушные цели (ВЦ) – ответственный и важный этап боевых действий. Формирование, обсуждение и принятие на данном этапе решений, обуславливающих результат планируемого перехвата, происходит на профессиональном языке. В процессе поиска наилучшего решения используются качественные элементы: понятия и отношения с нечеткими границами, высказывания с многозначной шкалой истинности. Построение моделей принятия решений для задач, имеющих нечеткое словесное описание, оказалось возможным благодаря введению понятий нечеткого множества и лингвистической переменной (ЛП), вследствие чего в качестве базовой математической модели слабо формализованного процесса (СФП) принятия решений при определении параметров планируемого перехвата было предложено использовать логико-лингвистическую продукционную модель (ЛЛПМ).

В основе функционирования ЛЛПМ лежит операция нечеткого логического вывода [1, 2]. Система нечеткого логического вывода представляет собой вычислительную схему, основанную на нечеткой логике, нечетких IF-THEN правилах, нечетком логическом выводе. Она успешно применяется для автоматического управления СФП, в теории под-

держки и принятия решений, экспертных системах.

В настоящее время нашли широкое применение модели нечеткого вывода Мамдани, Такаги-Сугено, Ларсена, Цукамото, отличающиеся непосредственно алгоритмом вывода [2]. Системы Такаги-Сугено сокращают вычисления при определении выходной величины, обладают универсальными аппроксимирующими свойствами, нечеткие правила данной модели достаточно хорошо описывают сложную нелинейную зависимость, более точны по сравнению с остальными моделями. Преимущество моделей типа Мамдани состоит в том, что правила базы знаний являются прозрачными и интуитивно понятными, но обладают худшими аппроксимирующими свойствами по сравнению с моделью Такаги-Сугено [2, 3].

Для получения достоверного результата нечеткого логического вывода предлагается использование алгоритмов вывода Мамдани и Такаги-Сугено с последующим сравнением результатов и выдачей конечной рекомендации лицу, принимающему решение (ЛПР).

Таким образом, **целью статьи** является разработка метода логического вывода в ЛЛПМ процесса принятия решений при определении параметров планируемого перехвата, основанного на сравнении результатов нечетких логических выводов Мамдани и Такаги-Сугено.

Применение нечеткого логического вывода к лингвистическим правилам, описывающих выбор параметров перехвата

Процесс нечеткого вывода состоит из фаззификации, непосредственного логического вывода и композиции, дефаззификации. Структурная схема процесса нечеткого вывода в упрощенном виде представлена на рис. 1.

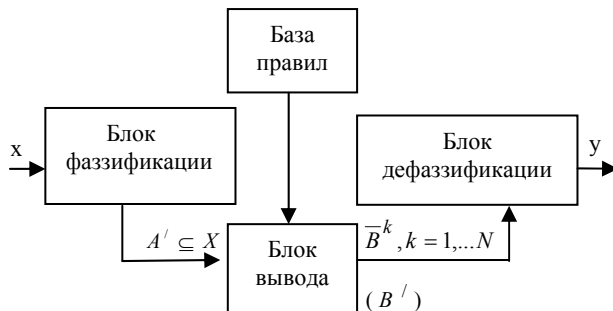


Рис. 1. Структурная схема процесса нечеткого вывода

Представим метод логического вывода, примененного к лингвистическим правилам и логическим уравнениям, описывающим модель принятия решений при определении параметров планируемого перехвата, в виде объединения алгоритмов вывода Мамдани и Такаги-Сугено. В результате сравнения с помощью логической схемы четырех результатов вывода получим однозначную, достоверную рекомендацию о применении параметров планируемого перехвата.

Таким образом, предлагается метод логического вывода, основанный на нечетких логических выводах Мамдани и Такаги-Сугено, заключающийся в выполнении следующих этапов:

1. Представление СФП в виде ряда лингвистических правил, построение таблиц лингвистических правил (ТЛП), осуществление полиномиальной аппроксимации ТЛП [4].
2. Применение к полученным правилам нечеткого логического вывода Такаги-Сугено и Мамдани.
3. Построение системы логических уравнений [5].
4. Применение к полученным уравнениям логического вывода Такаги-Сугено и Мамдани.

5. Сравнение результатов вывода, полученных по разным схемам, и выдача рекомендаций ЛПП.

Процесс выбора параметров планируемого перехвата представим в виде ряда лингвистических правил, а после алгебраической аппроксимации – полиномиальными уравнениями, описывающими выбор конкретного метода наведения, в виде [4]:

$$\begin{cases}
 \text{IF } x_1 = NS \text{ AND } x_2 = PB \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = ZE \text{ AND } x_2 = NS \text{ THEN } Y = NB \\
 \text{IF } x_1 = NB \text{ AND } x_2 = PS \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = NS \text{ AND } x_2 = PS \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = ZE \text{ AND } x_2 = PS \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = PS \text{ AND } x_2 = PS \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = NB \text{ AND } x_2 = PB \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = ZE \text{ AND } x_2 = PB \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = PS \text{ AND } x_2 = PB \text{ THEN } Y = PB \Rightarrow (1) \\
 \text{IF } x_1 = PB \text{ AND } x_2 = PB \text{ THEN } Y = PB \\
 \text{IF } x_1 = ZE \text{ AND } x_2 = ZE \text{ THEN } Y = ZE \\
 \text{IF } x_1 = PB \text{ AND } x_2 = ZE \text{ THEN } Y = ZE \\
 \text{IF } x_1 = ZE \text{ AND } x_2 = NB \text{ THEN } Y = NB \\
 \text{IF } x_1 = PS \text{ AND } x_2 = NB \text{ THEN } Y = NB \\
 \text{IF } x_1 = PS \text{ AND } x_2 = NS \text{ THEN } Y = NB \\
 \text{IF } x_1 = PB \text{ AND } x_2 = NS \text{ THEN } Y = NB \\
 \text{IF } x_1 = PB \text{ AND } x_2 = NS \text{ THEN } Y = NB
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Y = 0 * x_1 + 2 * x_2,$$

где x_1 – ЛП «Маневр воздушной цели курсом»; x_2 – ЛП «Отношение скорости истребителя к скорости воздушной цели»; Y – ЛП «Условия перехвата»;

$$\begin{cases}
 \text{IF } x_3 = NB \text{ AND } x_4 = NS \text{ THEN } Z = PB \\
 \text{IF } x_3 = NS \text{ AND } x_4 = NS \text{ THEN } Z = PB \\
 \text{IF } x_3 = PS \text{ AND } x_4 = NS \text{ THEN } Z = NB \\
 \text{IF } x_3 = PB \text{ AND } x_4 = PS \text{ THEN } Z = NB \\
 \text{IF } x_3 = ZE \text{ AND } x_4 = NB \text{ THEN } Z = NS \\
 \text{IF } x_3 = NB \text{ AND } x_4 = ZE \text{ THEN } Z = PB \\
 \text{IF } x_3 = NB \text{ AND } x_4 = PS \text{ THEN } Z = PB \Rightarrow (2) \\
 \text{IF } x_3 = NS \text{ AND } x_4 = ZE \text{ THEN } Z = PB \\
 \text{IF } x_3 = NS \text{ AND } x_4 = PS \text{ THEN } Z = PB \\
 \text{IF } x_3 = PS \text{ AND } x_4 = ZE \text{ THEN } Z = NB \\
 \text{IF } x_3 = PS \text{ AND } x_4 = PS \text{ THEN } Z = NB \\
 \text{IF } x_3 = PB \text{ AND } x_4 = NS \text{ THEN } Z = NB \\
 \text{IF } x_3 = PB \text{ AND } x_4 = ZE \text{ THEN } Z = NB
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Z = -2 * x_3 + 1/2 * x_4,$$

где x_3 – ЛП «Курсовой угол истребителя»; x_4 – ЛП

«Дальность до воздушной цели»; Z – ЛП «Тактическое положение».

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IF } Y = \text{NS AND } Z = \text{NS THEN } D = \text{NB} \\ \text{IF } Y = \text{NS AND } Z = \text{NB THEN } D = \text{NB} \\ \text{IF } Y = \text{ZE AND } Z = \text{PS THEN } D = \text{PB} \\ \text{IF } Y = \text{ZE AND } Z = \text{NB THEN } D = \text{NB} \\ \text{IF } Y = \text{PB AND } Z = \text{NS THEN } D = \text{NS} \\ \text{IF } Y = \text{PB AND } Z = \text{ZE THEN } D = \text{PS} \\ \text{IF } Y = \text{PS AND } Z = \text{ZE THEN } D = \text{ZE} \\ \text{IF } Y = \text{PS AND } Z = \text{NB THEN } D = \text{NB} \\ \text{IF } Y = \text{PS AND } Z = \text{NB THEN } D = \text{NB} \\ \text{IF } Y = \text{NB AND } Z = \text{NS THEN } D = \text{NB} \\ \text{IF } Y = \text{NB AND } Z = \text{NB THEN } D = \text{NB} \end{array} \right. \Rightarrow (3)$$

$$\Rightarrow D = 1/2 * Y + 2 * Z,$$

где $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$ – ЛП «Метод наведения», причем d_1 – перехват невозможен; d_2 – параллельное сближение; d_3 – прямое сближение; d_4 – статистическое наведение; d_5 – погоня с упреждением.

Применим нечеткие логические выводы Мамдани и Такаги-Сугено к лингвистическим правилам, описывающим выбор метода наведения. Допустим, имеется следующая исходная информации: ВЦ маневрирует курсом, максимальный угол отворота составляет 20 град ($x_1=20$), соотношение скоростей составляет 0,9 ($x_2=0,9$), курсовой угол истребителя равен 20 град ($x_3=20$) и расстояние до ВЦ составляет 90 км ($x_4=90$). Процедура нечеткого вывода Мамдани показана на рис. 2.

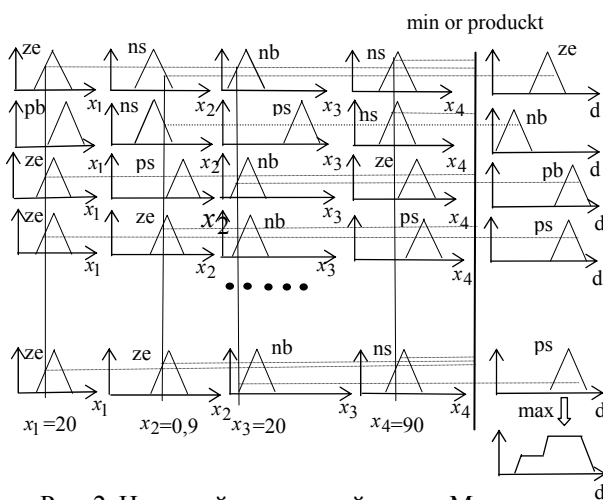


Рис. 2. Нечеткий логический вывод Мамдани, примененный к лингвистическим правилам

Нечеткое значение выхода с функцией принадлежности $\mu(d)$ определяется в соответствии с выражением

$$\mu(d) = \bigvee_{i=1}^{n_R} (w_i(x_1, \dots, x_n) \wedge \mu_i(d)), \quad (4)$$

где \vee – операция агрегации, соответствующая объединению нечетких правил, которая в системе Мамдани эквивалентно дизъюнкции; \wedge – операция импликации, в системе Мамдани эквивалентна конъюнкции; $\mu_i(d)$ – функция принадлежности консеквента i -го правила. Степень выполнения правил w_i вычисляется по формуле

$$w_i(x_1, \dots, x_n) = \bigwedge_{j=1}^n \mu_{i,j}(x_j), \quad (5)$$

где \wedge – нечеткая операция конъюнкции, соответствующая оператору "И"; n – количество входов; $\mu_{j,i}(x_j)$ – функция принадлежности j -м входе в антецеденте i -го правила.

После того, как вход системы обработан алгоритмом управления и получен нечеткий вывод $\mu(d)$, необходимо с помощью операции дефазификации найти соответствующее ему четкое значение d .

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^{\max}, \quad (6)$$

где d – дефазифицированное четкое значение, d_i^{\max} – значение нечеткого множества d , для которого функции принадлежности принимает глобальные значения максимума, n – количество функций принадлежности. Тогда

$$d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n d_i^{\max} = 1/2(3+4) \approx 4. \quad (7)$$

В результате нечеткого логического вывода Мамдани получим $d \approx 4$, что говорит о применении статистического метода наведения при указанных исходных данных.

Применим к полученным правилам логический вывод Такаги-Сугено (рис. 3).

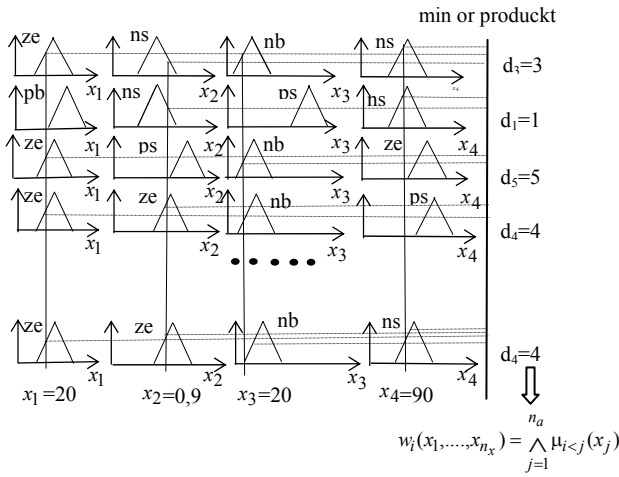


Рис. 3. Нечеткий логический вывод Такаги-Сугено, примененный к лингвистическим правилам

Найдем четкое значение d по алгоритму Такаги-Сугено:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^k w_i d_i}{\sum_{i=1}^k w_i} = \frac{0,2 \cdot 3 + 0,7 \cdot 4}{0,2 + 0,7} \approx 4, \quad (8)$$

где степень выполнения правил w_i вычисляется по формуле (5). Получим $d \approx 4$, что также говорит о применении статистического метода наведения.

Таким образом, применив к правилам, описывающим выбор метода наведения, логические выводы Мамдани и Такаги-Сугено, получим $d \approx 4$ с долей уверенности 0,7, что соответствует применению статистического метода наведения.

Применение нечеткого логического вывода к логическим уравнениям, описывающих выбор параметров перехвата

Следующим этапом является построение системы логических уравнений и применение к ним нечетких логических выводов. Используя ТЛП, запишем систему логических уравнений, результат решения которых определяет целесообразный метод наведения истребителей на ВЦ в сложившейся боевой обстановке. Совокупность условий, определяющих выбор соответствующего метода наведения, представим в виде:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(D) = & \mu^{NS}(Y) \wedge \mu^{NS}(Z) \vee \mu^{NS}(Y) \wedge \mu^{PS}(Z) \vee \\ & \vee \mu^{NS}(Y) \wedge \mu^{NB}(Z) \vee \mu^{ZE}(Y) \wedge \mu^{NB}(Z) \vee \mu^{PS}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu^{NB}(Z) \vee \mu^{NB}(Y) \wedge \mu^{NS}(Z) \vee \mu^{NB}(Y) \wedge \mu^{PS}(Z) \vee \\ & \vee \mu^{NB}(Y) \wedge \mu^{NB}(Z); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_2}(D) = & \mu^{NS}(Y) \wedge \mu^{PB}(Z) \vee \mu^{NS}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z) \vee \\ & \vee \mu^{PB}(Y) \wedge \mu^{NS}(Z) \vee \mu^{PS}(Y) \wedge \mu^{NS}(Z) \vee \mu^{PS}(Y) \vee \\ & \vee \mu^{PB}(Z); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_3}(D) = & \mu^{ZE}(Y) \wedge \mu^{NS}(Z) \vee \mu^{PS}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z) \vee \\ & \vee \mu^{NB}(Y) \wedge \mu^{PB}(Z) \vee \mu^{NB}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_4}(D) = & \mu^{ZE}(Y) \wedge \mu^{PB}(Z) \vee \mu^{ZE}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu^{ZE}(Z) \vee \mu^{PB}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_5}(D) = & \mu^{ZE}(Y) \wedge \mu^{PS}(Z) \vee \mu^{PB}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu^{PS}(Z) \vee \mu^{PB}(Y) \wedge \mu^{PB}(Z) \vee \mu^{PB}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu^{NB}(Z) \vee \mu^{PS}(Y) \wedge \mu^{PS}(Z). \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогичным образом представим совокупность ЛП «Условия перехвата» (Y) и ЛП «Тактическое положение» (Z). Так как количество логических уравнений велико (50 уравнений), запишем только часть:

$$\begin{aligned} \mu^{ZE}(Y) = & \mu^{PB}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2) \vee \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2) \vee \\ & \vee \mu^{PS}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2); \\ \mu^{PB}(Y) = & \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{PS}(x_2) \vee \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{PB}(x_2); \\ \mu^{NB}(Y) = & \mu^{PB}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2) \vee \mu^{PS}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2) \vee \\ & \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{NB}(x_2) \vee \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2); \\ \mu^{PS}(Y) = & \mu^{NB}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2) \vee \mu^{NS}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2); \\ \mu^{NS}(Y) = & \mu^{NB}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2) \vee \mu^{NS}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2); \\ \mu^{NB}(Z) = & \mu^{PB}(x_3) \wedge \mu^{NS}(x_4) \vee \mu^{PS}(x_3) \wedge \mu^{NS}(x_4); \\ \mu^{PB}(Z) = & \mu^{NB}(x_3) \wedge \mu^{PS}(x_4) \vee \mu^{NB}(x_3) \wedge \\ & \wedge \mu^{ZE}(x_4) \vee \mu^{NB}(x_3) \wedge \mu^{NS}(x_4); \\ \mu^{ZE}(Z) = & \mu^{NB}(x_3) \wedge \mu^{NB}(x_4). \end{aligned} \quad (15)$$

Для исходной информации, приведенной выше, определим функции принадлежности нечетким термам: $\mu^{ZE}(x_1) = 0,8$, $\mu^{NS}(x_2) = 0,2$, $\mu^{ZE}(x_2) = 0,8$, $\mu^{NB}(x_3) = 0,7$, $\mu^{NS}(x_4) = 0,95$. Используя логиче-

ские уравнения (9 – 13), вычислим значения функции принадлежности $\mu^{d_j}(x_1, x_2, x_3, x_4)$. Для этого определим функции принадлежности ЛП Y и Z :

$$\begin{aligned}\mu^{ZE}(Y) &= \mu^{PB}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2) \vee \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2) \vee \\ &\quad \vee \mu^{PS}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2); \\ \mu^{PB}(Y) &= \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{PS}(x_2) \vee \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{PB}(x_2); \\ \mu^{NB}(Y) &= \mu^{PB}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2) \vee \mu^{PS}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2) \wedge \\ &\quad \vee \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{NB}(x_2) \vee \mu^{ZE}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2); \\ \mu^{PS}(Y) &= \mu^{NB}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2) \vee \mu^{NS}(x_1) \wedge \mu^{ZE}(x_2); \\ \mu^{NS}(Y) &= \mu^{NB}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2) \vee \mu^{NS}(x_1) \wedge \mu^{NS}(x_2); \\ \mu^{ZE}(Y) &= (0,8 \wedge 0,8)=0,8; \\ \mu^{NB}(Y) &= (0,8 \wedge 0,2)=0,2;\end{aligned}\tag{16}$$

$$\begin{aligned}\mu^{NB}(Z) &= \mu^{PB}(x_3) \wedge \mu^{NS}(x_4) \vee \mu^{PS}(x_3) \wedge \mu^{NS}(x_4); \\ \mu^{PB}(Z) &= \mu^{NB}(x_3) \wedge \mu^{PS}(x_4) \vee \mu^{NB}(x_3) \wedge \\ &\quad \wedge \mu^{ZE}(x_4) \vee \mu^{NB}(x_3) \wedge \mu^{NS}(x_4); \\ \mu^{ZE}(Z) &= \mu^{NB}(x_3) \wedge \mu^{NB}(x_4); \\ \mu^{PB}(Z) &= (0,7 \wedge 0,95)=0,7.\end{aligned}\tag{17}$$

Тогда функции принадлежности для ЛП $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$ имеют вид:

$$\begin{aligned}\mu^{d_3}(D) &= \mu^{ZE}(Y) \wedge \mu^{NS}(Z) \vee \mu^{PS}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z) \vee \\ &\quad \vee \mu^{NB}(Y) \wedge \mu^{PB}(Z) \vee \mu^{NB}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z); \\ \mu^{d_3}(D) &= (0,2 \wedge 0,7)=0,2; \\ \mu^{d_4}(D) &= \mu^{ZE}(Y) \wedge \mu^{PB}(Z) \vee \mu^{ZE}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z) \vee \\ &\quad \vee \mu^{PB}(Y) \wedge \mu^{ZE}(Z); \\ \mu^{d_4}(D) &= (0,8 \wedge 0,7)=0,7.\end{aligned}\tag{18}$$

Применив к полученным правилам нечеткий логический вывод Мамдани, Такаги-Сугено, получим окончательное решение о целесообразном применении в данной обстановке статистического метода наведения.

Таким образом, в некоторый момент времени, характеризующийся фиксированным вектором $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)=(20,0,9,20,90)$, целесообразным является наведение истребителя на ВЦ статистическим методом наведения. В результате сравнения результатов нечетких логических выводов, полученных по различным схемам, получим целесообразный ме-

тод наведения с выдачей рекомендации ЛПП о применении данного параметра перехвата. Сравнение результатов нечеткого логического вывода, примененного к лингвистическим правилам и логическим уравнениям, говорит о достоверности полученного результата.

Заключение

Разработан метод логического вывода в ЛЛПМ процесса принятия решений при определении параметров планируемого перехвата, основанный на сравнении результатов нечетких логических выводов Мамдани и Такаги-Сугено, который дает возможность получить однозначную, достоверную рекомендацию о применении целесообразных параметров планируемого перехвата в конкретной боевой обстановке.

Литература

1. Тейз А., Грибомон П., Луи Ж. Логический подход к искусственному интеллекту: От классической логики к логическому программированию. – М.: Мир, 1990. – 432 с.
2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Гор. Линия-Телеком, 2004. – 452 с.
3. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // Proc. 1-st IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems. – San Diego, Ca, 1992. – P. 1163-1170.
4. Соколов А.Ю. Алгебраическое моделирование лингвистических динамических систем // Проблемы управления и информатики. – 2000. – №2. – С. 141-148.
5. Герасимов Б.М., Дивизинюк М.М., Субач И.Ю. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности. – Севастополь: МОУ, НАНУ, 2004. – 320 с.

Поступила в редакцию 1.09.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Е.В. Бодянский, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.