

УДК 004.89:623.418.2

С.С. Федін

Київський національний університет технологій і дизайну, Київ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ FUZZY-СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ РАКЕТЫ НА ЦЕЛЬ

Предложена методика разработки модели fuzzy-системы наведения ракеты на цель с использованием нечетких кусочно-линейных функций принадлежности в приложении CubiCalc 2.0.

**Ключевые слова:** моделирование, fuzzy-система наведения, ракета, ошибка отслеживания цели, поправка азимута, функции принадлежности.

### Введение

Система наведения ракеты на цель представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных элементов, основными из которых являются ракета (объект управления), цель и их динамические характеристики, устройства, определяющие положение ракеты и цели в пространстве и устройства передачи информации [1]. Решение задачи наведения заключается в совмещении координат ракеты и цели и, как правило, осуществляется с использованием методов погони, параллельного или пропорционального сближения и упреждения [1 – 4].

Сложность исследования закономерностей процесса наведения в рамках указанных методов обусловлена значительным количеством параметров, определяющих траектории ракеты и цели в режиме реального времени. Поэтому для моделирования процесса наведения ракеты на цель необходимо выделить и использовать только значимые факторы, оказывающие влияние на траекторию ракеты.

В настоящее время одним из наиболее эффективных подходов к моделированию различных процессов в режиме реального времени является использование методов искусственного интеллекта, к которым относится нечеткое моделирование и управление [5, 6]. Управление на основе математического аппарата нечеткой логики может успешно применяться для многомерных, нелинейных и изменяющихся во времени процессов. При этом, как показано в работе [7], достаточно установить связь между значением величины ошибки процесса и ее изменением, чтобы осуществить необходимую корректировку управляющего входного сигнала, обеспечивающую удовлетворительное управление процессом. Для установления такого рода связи используются лингвистические правила, оперирующие нечеткими (fuzzy) термами, характеризующими ошибку, например, «Большая отрицательная» («Large Negative»), «Малая положительная» («Small Positive»), «Близкая нулю» («Near Zero») и т.д. В работах [8, 9] отмечено, что многомерность управляющих воздействий, сильные возмущения, нели-

нейности и неточности программы наведения являются предпосылками к использованию нечетких функций принадлежности, в том числе для моделирования систем управления траекторией самонаводящихся ракет и полетом самолета в изменяющихся условиях внешней среды. Поэтому одной из актуальных задач теории управления является разработка систем наведения на основе нечеткой логики.

**Целью статьи** является разработка модели fuzzy-системы наведения ракеты на цель с использованием нечетких кусочно-линейных функций принадлежности.

### Содержательная постановка задачи наведения ракеты на цель

Моделирование процесса наведения ракеты на цель будем рассматривать в виде задачи преследования сопровождаемой цели (истребителя) с учетом ее местоположения (Fighter's position), углового положения (Tracking angle), угловой ошибки отслеживания (Tracking error), азимута ракеты (Missile azimuth) и ее местоположения (Missile's position) (рис. 1). Угловая ошибка отслеживания цели определяется в виде угла между азимутом ракеты и направлением на цель. В реальных условиях цель меняет направление и скорость полета, т.е. непрерывно маневрирует, а ракета изменяет направление движения на величину, называемую поправкой азимута, т.е., если ракета направлена прямо на цель, то ошибка отслеживания равна нулю, в противном случае ракета уклоняется от цели. Таким образом, нечеткой входной (управляющей) переменной и нечеткой выходной (управляемой) переменной являются ошибка отслеживания (*TrackingError*) и поправка азимута (*AzimuthAdjust*) соответственно.

Текущие координаты местоположения ракеты и цели не являются нечеткими и представляют *временной (temporary)* тип переменных, исходные значения которых задают начальные точки для ракеты и цели на плоскости с координатами (x, y).

К типу *temporary* относятся также переменные, характеризующие скорость и направление движения цели и ракеты.

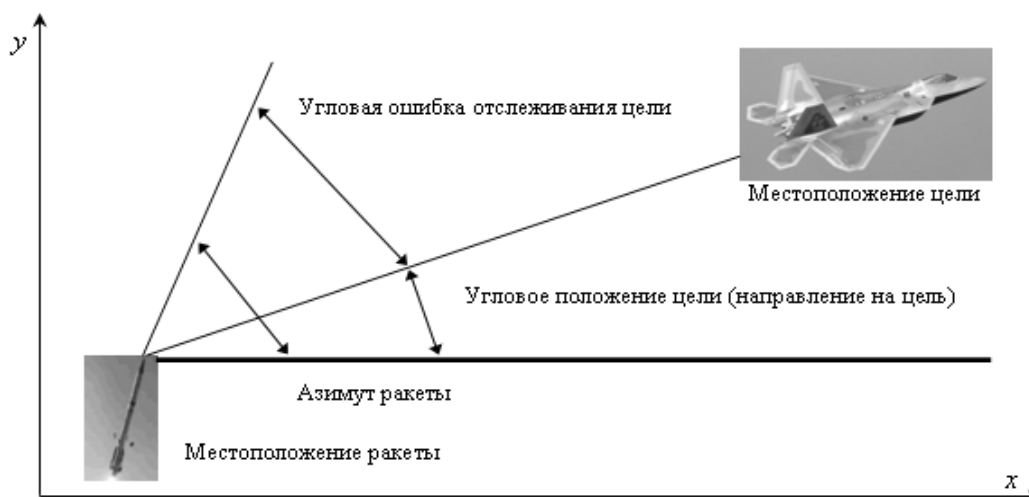


Рис. 1. Основные параметры задачи преследования цели

Следует отметить, что ошибка отслеживания может быть как положительной, так и отрицательной, в зависимости от расположения цели. Отрицательной ошибкой будем называть ситуацию, если цель расположена справа и положительной ошибкой, если цель находится слева.

Те же определения будем применять к поправке азимута: отрицательная и положительная поправки определяют повороты ракеты направо и налево соответственно. При этом, если ошибка отслеживания соответствует fuzzy-терму «Большая отрицательная» («Large Negative»), то и поправка азимута должна соответствовать терму «Large Negative», но если ошибка отслеживания соответствует fuzzy-терму «Малая положительная» («Small Positive»), то и поправка должна быть «Small Positive» и т.д. [10, 11].

### Формализация задачи наведения в нечетком логическом базисе

В работах [10, 12, 13] показано, что нечеткое множество можно определить в виде точки в кубе, а fuzzy-систему – как отображение между кубами. Пусть fuzzy-система  $S$  наведения ракеты на цель преобразует нечеткие множества из одного гиперкуба  $I^n$  в другой  $I^p$

$$S: I^n \rightarrow I^p,$$

где  $I^n$  –  $n$ -мерный единичный гиперкуб, содержащий все подмножества области определения нечетких переменных, а  $I^p$  –  $p$ -мерный гиперкуб всех подмножеств области значений нечетких переменных. Тогда нечеткая система  $S$  реализует отображение семейства нечетких множеств

$$S: I^{n1} \times \dots \times I^{nr} \rightarrow I^{p1} \times \dots \times I^{pl}.$$

Система такого рода осуществляет кодирование и параллельную обработку базы из  $m$  нечетких ассоциативных матричных правил (НАМ)  $(A_1, B_1), \dots, (A_m, B_m)$  на основе принципа нечеткой ассо-

циативной памяти (НАП). В большинстве случаев каждый вход  $A$  НАП-системы активизирует каждое из НАМ-правил в различной степени. Так, например,  $i$ -я ассоциация или НАМ-правило  $(A_i, B_i)$ ,  $i=1, \dots, m$  отображает вход  $A$  в выход  $B'_i$ , представляющий собой частично активированный вариант  $B_i$ . Таким образом, чем больше вход  $A$  соответствует  $A_i$ , тем больше  $B'_i$  соответствует выходу  $B_i$  (рис. 2) [7].

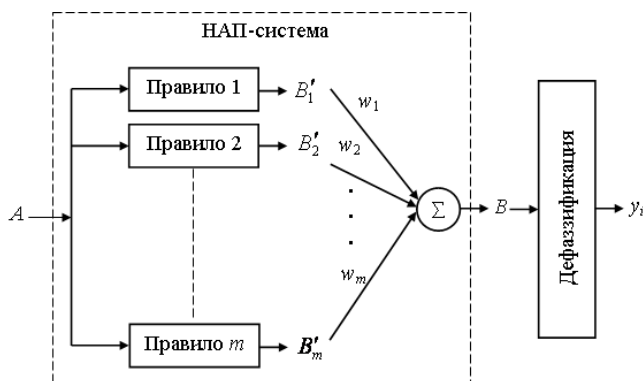


Рис. 2. Архитектура НАП-системы

Результирующее выходное нечеткое множество  $B$  объединяет эти частично активированные множества  $B'_1, \dots, B'_m$  и представляет собой их взвешенное среднее с учетом  $w_i$  – весового коэффициента нечеткой ассоциации  $(A_i, B_i)$

$$B = \sum_{i=1}^m w_i B'_i. \tag{1}$$

Выходное нечеткое множество  $B$  может быть преобразовано в конкретную числовую величину  $y_i$  на действительной оси  $Y$  на основе процедуры дефазификации (приведения к четкости) (рис. 2). Для этого вычисляется нечеткий центроид множества  $B$  относительно выходного универсального множества  $Y$  [14, 15].

Отличительной особенностью базы НАМ правил fuzzy-системы наведения ракеты на цель является равнозначность каждого правила типа «ЕСЛИ – ТО», т.е.  $w_i=1,0$ :

ЕСЛИ *ошибка отслеживания* «Large Positive», ТО *поправка азимута* должна быть «Large Positive»;

ЕСЛИ *ошибка отслеживания* «Small Positive», ТО *поправка азимута* должна быть «Small Positive»;

ЕСЛИ *ошибка отслеживания* «Near Zero», ТО *поправка азимута* должна быть «Near Zero»;

ЕСЛИ *ошибка отслеживания* «Small Negative», ТО *поправка азимута* должна быть «Small Negative»;

ЕСЛИ *ошибка отслеживания* «Large Negative», ТО *поправка азимута* должна быть «Large Negative».

Для задания термов «Large Negative» и «Large Positive» будем использовать нечеткие функции принадлежности классов  $l$  (2) и  $\gamma$  (3) соответственно (рис. 3, 4), а для термов «Small Negative», «Small Positive» и «Near Zero» функции принадлежности класса  $t$  (4) (рис. 5), классификация которых приведена в работе [15].

$$l(x; a, b) = \begin{cases} 1 & \text{for } x \leq a; \\ \frac{b-x}{b-a} & \text{for } a \leq x \leq b; \\ 0 & \text{for } x \geq b. \end{cases} \quad (2)$$

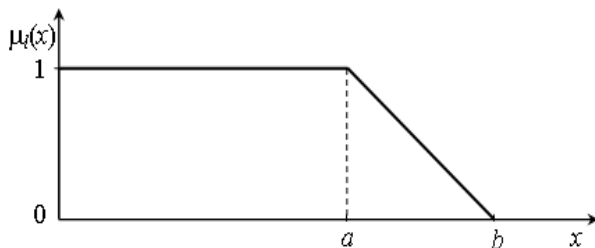


Рис. 3. Функция принадлежности класса  $l$  для терма «Large Negative»

$$\gamma(x; a, b) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a \leq x \leq b; \\ 1 & \text{for } x \geq b. \end{cases} \quad (3)$$

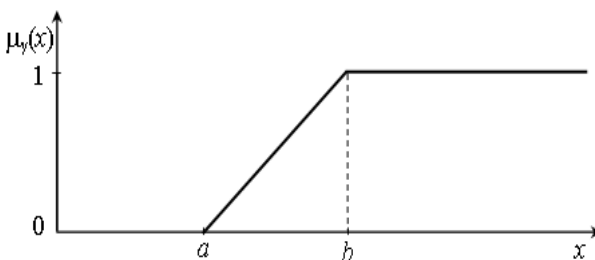


Рис. 4. Функция принадлежности класса  $\gamma$  для терма «Large Positive»

$$t(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{for } b \leq x \leq c; \\ 0 & \text{for } x \geq c. \end{cases} \quad (4)$$

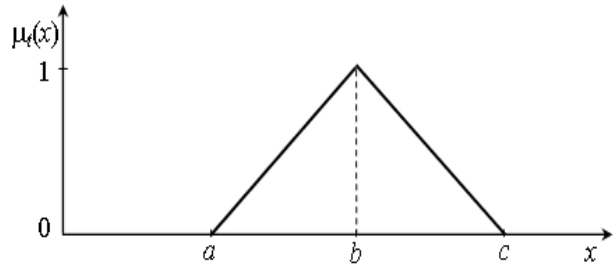


Рис. 5. Функция принадлежности класса  $t$  для термов «Small Negative», «Small Positive» и «Near Zero»

Для создания нечеткой модели наведения ракеты на цель будем использовать приложение CubiCalc 2.0 и язык программирования CubiCalc's Expression Language (CEL), относящийся к процедурным языкам третьего поколения. Отличительными особенностями языка CEL являются средства определения степени вхождения скалярных значений в нечеткие множества, процедуры матричной обработки данных и обмена данными с другими приложениями на основе технологии Dynamic Data Exchange [13].

### Разработка модели fuzzy-системы наведения ракеты на цель в приложении CubiCalc 2.0

Первым этапом моделирования fuzzy-системы управления траекторией ракеты в приложении CubiCalc 2.0 является инициализация (Initialization) начальных значений переменных *временного* (temporary) типа, характеризующих внутреннее состояние fuzzy-системы. К этим переменным относятся (рис. 6):

- местоположение истребителя (*Fighter\_x*, *Fighter\_y*),
- скорость истребителя (*FighterSpeed*),
- направление движения истребителя (*FighterAzimuth*),
- местоположение ракеты (*Missile\_x*, *Missile\_y*),
- скорость ракеты (*MissileSpeed*),
- направление движения ракеты (*MissileAzimuth*).

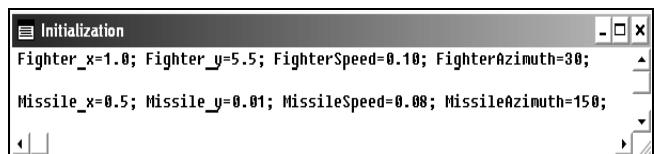


Рис. 6. Инициализация начальных значений переменных типа *temporary*

На етапі вводу даних визначимо діапазони значень змінних нечіткої моделі. Оскільки кут може приймати будь-яке значення, виберемо для змінної *TrackingError* діапазон значень ( $-180^{\circ}; 180^{\circ}$ ). Змінна *AzimuthAdjust* представляє кут, який може змінюватися в цьому ж діапазоні, однак, враховуючи те, що ракета не може «мгновенно развернуться», обмежимо нижнє і верхнє значення *AzimuthAdjust* діапазоном ( $-45^{\circ}; 45^{\circ}$ ). Початкові значення змінних *TrackingError* і *AzimuthAdjust* рівні  $60^{\circ}$  і  $0^{\circ}$  відповідно (рис. 7).

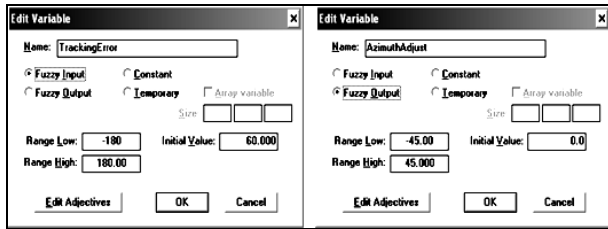


Рис. 7. Діапазони значень вхідної (*TrackingError*) і вихідної (*AzimuthAdjust*) нечітких змінних

Третій етап моделювання заключається в попередній обробці даних (Preprocessing), дозволяючій вирахувати кут між азимутом ракети і напрямленням на ціль, а також ввести його коррекцію з використанням операторів і функцій мови програмування CEL (рис. 8).

Функція *atand(x)* (рис. 8) вирахує арктангенс (в градусах) з прямокутного трикутника (рис. 1) з вертикальним катетом (*Fighter\_y* – *Missile\_y*) і горизонтальним катетом (*Fighter\_x* – *Missile\_x*). Функція *iif* слугує для урахування періода функції *atand(x)*, т.е. якщо ціль знаходиться к заходу від ракети, то к углу помилки додається  $180^{\circ}$ , в протилежному випадку відсутній необхідність введення яких-небудь поправок.

На етапі створення і виконання правил (Rules Execution) задамо параметри кусочно-лінійних функцій належності fuzzy-термів змінних *TrackingError* і *AzimuthAdjust* (табл. 1, 2): *LargeNegative*, *SmallNegative*, *NearZero*, *SmallPositive*, *LargePositive* (рис. 9).

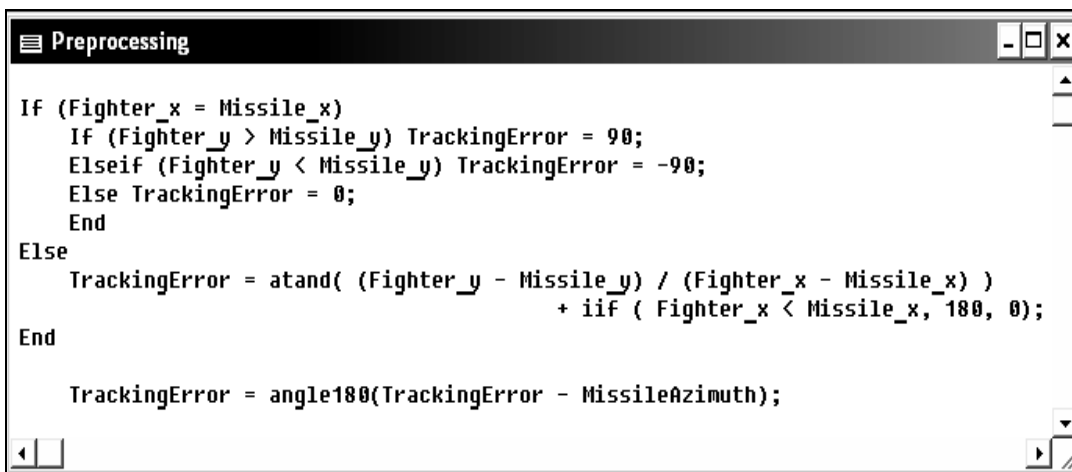


Рис. 8. Алгоритм попередньої обробки даних в системі нечіткого моделювання CubiCalc 2.0

Таблиця 1

Параметри функцій належності fuzzy-термів змінної *TrackingError*

Нечіткий терм	Діапазон значень змінної	Клас функції
<i>LargeNegative</i>	$(-180; 1), (-60; 1), (0; 0), (180; 0)$	l
<i>SmallNegative</i>	$(-180; 0), (-60; 0), (-30; 1), (0; 0), (180; 0)$	t
<i>NearZero</i>	$(-180; 0), (-30; 0), (0; 1), (30; 0), (180; 0)$	t
<i>SmallPositive</i>	$(-180; 0), (0; 0), (30; 1), (60; 0), (180; 0)$	t
<i>LargePositive</i>	$(-180; 0), (0; 0), (60; 1), (180; 1)$	γ

Таблиця 2

Параметри функцій належності fuzzy-термів змінної *AzimuthAdjust*

Нечіткий терм	Діапазон значень змінної	Клас функції
<i>LargeNegative</i>	$(-45; 1), (-15; 1), (0; 0), (45; 0)$	l
<i>SmallNegative</i>	$(-45; 0), (-15; 0), (-7.5; 1), (0; 0), (45; 0)$	t
<i>NearZero</i>	$(-45; 0), (-10; 0), (0; 1), (10; 0), (45; 0)$	t
<i>SmallPositive</i>	$(-45; 0), (0; 0), (7.5; 1), (15; 0), (45; 0)$	t
<i>LargePositive</i>	$(-45; 0), (0; 0), (15; 1), (45; 1)$	γ

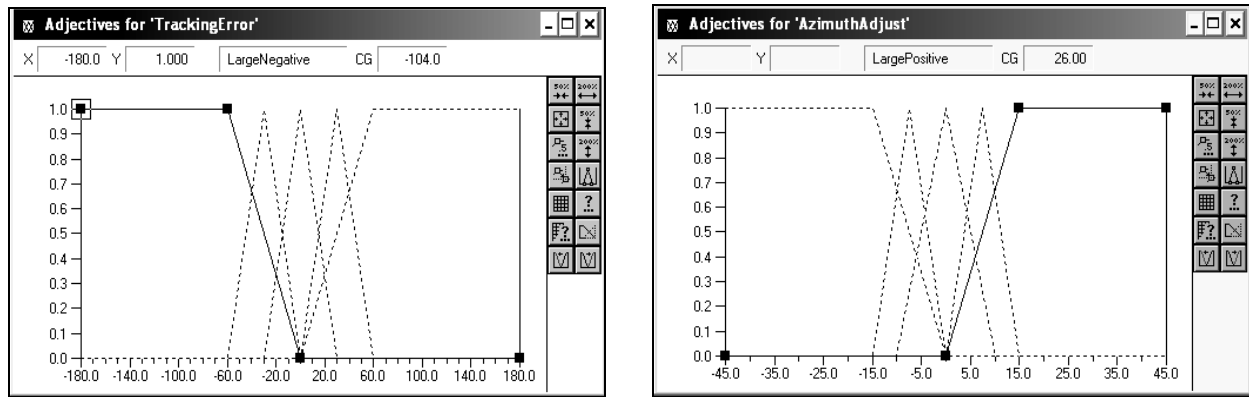


Рис. 9. Функции принадлежности переменных *TrackingError* и *AzimuthAdjust*, созданные в системе нечеткого моделирования CubiCalc 2.0

При задании параметров функций принадлежности исходили из принятых эвристик, согласно которым непрерывные нечеткие подмножества в каждом из термов должны пересекаться примерно на 25%. Это связано с тем, что при слишком большом пересечении теряются различия между величинами, соответствующими разным подмножествам, а при незначительном пересечении возникает тенденция перерегулирования объекта управления [7]. В соответствии с fuzzy-термами нечетких переменных *TrackingError* и *AzimuthAdjust* (рис. 9) сформулируем НАП-правила логического вывода с учетом равнозначности весовых коэффициентов (1) (рис. 10).

Rules	
(1.0) If <i>TrackingError</i> is <i>LargePositive</i>	then <i>AzimuthAdjust</i> is <i>LargePositive</i> ;
(1.0) If <i>TrackingError</i> is <i>SmallPositive</i>	then <i>AzimuthAdjust</i> is <i>SmallPositive</i> ;
(1.0) If <i>TrackingError</i> is <i>NearZero</i>	then <i>AzimuthAdjust</i> is <i>NearZero</i> ;
(1.0) If <i>TrackingError</i> is <i>SmallNegative</i>	then <i>AzimuthAdjust</i> is <i>SmallNegative</i> ;
(1.0) If <i>TrackingError</i> is <i>LargeNegative</i>	then <i>AzimuthAdjust</i> is <i>LargeNegative</i> ;

Рис. 10. База НАП-правил модели fuzzy-системы

На этапе постобработки данных (Postprocessing) реализуем операторы присвоения значений внутренним переменным для преобразования результатов вывода и представления их в графическом виде. Пусть истребитель начинает набор высоты со своего начального положения (*Fighter\_x*=1 тыс. м, *Fighter\_y*=5,5 тыс. м) до высоты *Fighter\_y*=8,0 тыс. м и движется в горизонтальном направлении вправо (рис. 11).

Заключительным этапом является симуляционное (Simulation) или имитационное моделирование, при котором осуществляется обновление переменных типа *temporary* с заданным интервалом времени. Реализация алгоритма имитационного моделирования позволяет изменить направление движения ракеты в соответствии со значением переменной *AzimuthAdjust*, с учетом коррек-

ции переменной *MissileAzimuth* на основе функции *angle180(x)* (рис. 12).

```

Postprocessing
Fighter_x = bound(Fighter_x, 1.0, 20.0);
Fighter_y = bound(Fighter_y, 5.5, 8.0);

```

Рис. 11. Постобработка данных для вывода параметров движения цели

```

Simulation
MissileAzimuth = MissileAzimuth + AzimuthAdjust;
MissileAzimuth = angle180(MissileAzimuth);

Fighter_x = Fighter_x + FighterSpeed * cosd(FighterAzimuth);
Fighter_y = Fighter_y + FighterSpeed * sind(FighterAzimuth);

Missile_x = Missile_x + MissileSpeed * cosd(MissileAzimuth);
Missile_y = Missile_y + MissileSpeed * sind(MissileAzimuth);

```

Рис. 12. Алгоритм имитационного моделирования процесса преследования ракетой цели

Направление движения ракеты соответствует гипотенузе прямоугольного треугольника, образованного точками положения ракеты и цели, а также пересечением вертикальной прямой, идущей из текущего местоположения цели к оси *x* с горизонтальной прямой, идущей из позиции ракеты к оси *y* (рис. 1). Результат имитационного моделирования fuzzy-системы наведения ракеты на цель при ее пошаговом запуске в CubiCalc 2.0 представлен на рис. 13. Анализ результатов моделирования показывает эффективность использования равнозначных НАП-правил и кусочно-линейных функций принадлежности при создании fuzzy-системы наведения ракеты на маневрирующую цель методом погони.

## Выводы

Предложена формализация задачи преследования цели в нечетком логическом базисе и показано, что для создания модели наведения ракеты на цель возможно использование модели fuzzy-системы с функциями принадлежности классов  $\Gamma$  и  $t$ .

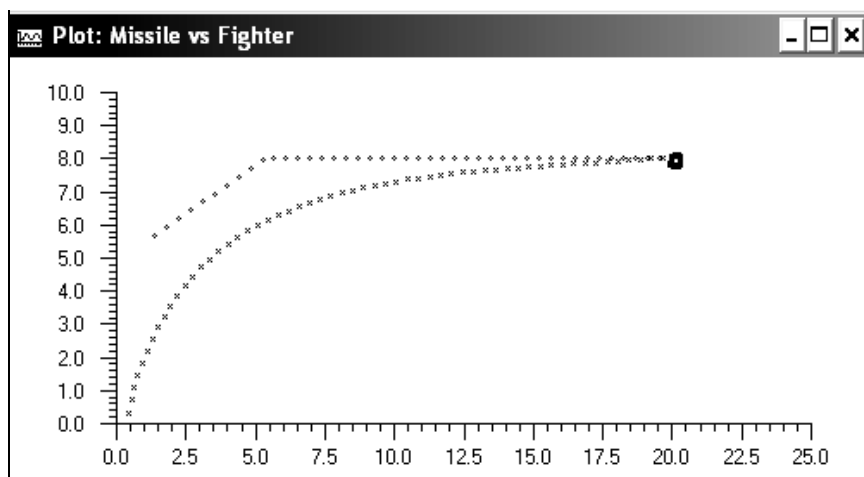


Рис. 13. Результат моделювання траєкторії руху ракети і цілі

Созданный модель fuzzy-системы наведения ракеты на маневрирующую цель позволяет наиболее простым способом решить задачу наведения в условиях постоянно меняющихся параметров движения ракеты и цели.

### Список литературы

1. Радиосистемы управления: учеб. для вузов / В.А. Вейцель, А.С. Волковский, С.А. Волковский и др.; под ред. В.А. Вейцеля. – М.: Дрофа, 2005. – 416 с.
2. Клименко В.Н. Моделирование траекторий наведения ракет различными методами / В.Н. Клименко, Г.А. Самусевич: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://sibac.info/18975>.
3. Канащенков А.И. Формирование облика авиационных систем управления вооружением / А.И. Канащенков. – М.: Радиотехника, 2006. – 138 с.
4. Хуторской И.Н. Системы наведения зенитных ракет с оптимальным управлением / И.Н. Хуторской, С.Н. Финогенов. – Смоленск, ВА ВПВО ВС РФ, 2008. – 327 с.
5. Нейрокомпьютеры в авиации (самолеты). Кн.14: [учеб. пособ.] / С.Н. Баранов, и др.; ред. А.И. Галушкин. – М.: Радиотехника, 2004. – 496 с.
6. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
7. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения. Кн.2. / О. Сигеру, М. Халид, Р. Юсоф.; Ред. А.И. Галушкин, В.А. Птичкин. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.

8. Васильев В.И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособ. / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.

9. Воробьев К.А., Хуторской И.Н. Использование аппарата нечеткой логики в интересах адаптации системы управления самонаводящихся зенитных управляемых ракет.: [Электронный ресурс]. – <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-25-html/vorobjev/vorobjev.htm>

10. Kosko B., Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic, / B. Kosko. – Hyperion, 1993. – 318 p.

11. CubiCalc: The Third Wave in Intelligent Software, HyperLogic Corporation, 1993. – 202 p.

12. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence / B. Kosko. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991. – 449 p.

13. Корнеев В.В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В.В. Корнеев, А.Ф. Гареев, С.В. Васютин, В.В. Раїх. – М.: Нолижд, 2000. – 352 с.

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

15. Рутковская Д. Нейронные сети. Генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.

Поступила в редколлегию 26.01.2016

Рецензент: д-р физ-мат. наук., проф. В.В. Гавриленко, Национальный транспортный университет, Киев.

### МОДЕЛЮВАННЯ FUZZY-СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ РАКЕТИ НА ЦІЛЬ

С.С. Федін

Запропоновано методику розробки моделі fuzzy-системи наведення ракети на ціль з використанням нечітких кусково-лінійних функцій належності в додатку CubiCalc 2.0.

**Ключові слова:** моделювання, fuzzy-система наведення, ракета, помилка відстеження цілі, поправка азимута, функції належності.

### SIMULATION OF FUZZY-MISSILE SYSTEMS TARGETING

S.S. Fedin

The technique of developing a model missile guidance fuzzy-system on the target using fuzzy piecewise linear membership functions in the application CubiCalc 2.0.

**Keywords:** modeling, fuzzy-system, missile tracking error target, azimuth correction, the membership function.