

УДК 533.6.013

Применение нечеткой логики для создания имитационной модели управляющих действий летчика

Верещиков Д.В., Волошин В.А., Ивашков С.С.* , Васильев Д.В.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), ВУНЦ ВВС «ВВА», ул. Старых Большевиков, 54А, Воронеж, 394064, Россия

**e-mail: ivashkov.sereja@yandex.ru*

Аннотация

Представлен один из способов формирования модели действий летчика с использованием нечеткой логики, приведена методика построения данной модели на примере управления самолетом при развороте, представлено сравнение характера управления самолета моделью и летчиком при моделировании на пилотажном стенде.

Ключевые слова: нечеткая логика, функция принадлежности, Matlab@Simulink, пакет Fuzzy Logic Toolbox, модель действий летчика, оптимизация, нечеткая модель, обучающая выборка, целевая функция оптимизации.

Введение

Широкое применение математического и полунатурного моделирования стало жизненно необходимым и, в ряде случаев, безальтернативным при создании и

испытании современных самолетов. Моделирование позволяет сократить количество испытательных полетов и повысить информативность режимов, снизить степень риска летного эксперимента. Одной из основных задач при этом является обеспечение адекватности полученных результатов. Адекватность результатов имитационного моделирования обеспечивается применением достоверных математических моделей летательных аппаратов и участием летчика-оператора, как необходимого звена в системе «летчик - система управления - самолет» с присущими ему особенностями поведения. Однако существуют задачи, когда необходимо провести множество реализаций моделирования целевой задачи пилотирования для получения статистически достоверных результатов. В итоге, получение достаточной для последующего применения статистики становится весьма трудоемкой задачей, требующей значительных затрат ресурсов и времени. Решением данной проблемы является создание достоверной модели летчика-оператора.

В настоящее время выполняется много работ по созданию моделей управляющих действий летчика для последующего проведения имитационного моделирования. В литературе нашли отражение результаты применения квазилинейных моделей, искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов [1-3].

Под всякой квазилинейной моделью понимают такую модель, в которой соотношение между входным и выходным сигналами сохраняет линейные свойства [1-3]. Такая модель позволяет успешно решать лишь одноконтурную одноканальную задачу [4,5], поэтому успешно используется, главным образом, при

анализе алгоритмов систем управления. Однако в реальном полете летчик решает многоконтурную многоканальную задачу, причем его реакции на входной возмущающий сигнал носят нелинейный характер, и, кроме этого, помимо линейной составляющей, в действиях летчика присутствует «ремнанта». Следовательно, квазилинейная модель не способна достаточно точно описать характер управляющих действий летчика, ее можно использовать лишь для узкого круга задач. Искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы лишены этих недостатков, однако, в свою очередь, они довольно сложны в своей реализации [6]. Как альтернатива данным методам, авторами, для создания модели управляющих действий летчика, предлагается использование нечеткой логики.

В задачах управления нелинейными и нестационарными системами в условиях неопределенности хорошо зарекомендовало себя управление с использованием нечеткой логики. Сегодня системы, основанные на нечеткой логике, разработаны и успешно внедрены в таких областях, как управление технологическими процессами, транспортом, бытовой техникой, в области диагностики и многих других сферах [7, 8]. В таких системах сложные отношения между входными и выходными параметрами описываются набором правил нечеткой логики, подразумевающих использование лингвистических переменных вместо усложненной динамической модели [9]. Применение лингвистических переменных, правил и законов нечеткой логики, а также приближенных рассуждений позволяет вносить опыт эксперта в разрабатываемую схему управления [10].

В основе нечеткой логики лежат следующие основные элементы [11, 12]

(рисунок 1):

– фаззификация – выведение нечеткого множества, соответствующего определенному значению функции принадлежности, используемого в утверждениях правил;

– оператор нечеткого вывода – это оператор, который выполняет определенные действия над нечетким множеством на основе заложенных в него баз правил, вследствие чего происходит формирование нечеткого логического вывода;

– дефаззификация – процесс, обратный фаззификации, т.е. преобразования нечеткого множества в четкую переменную [13].

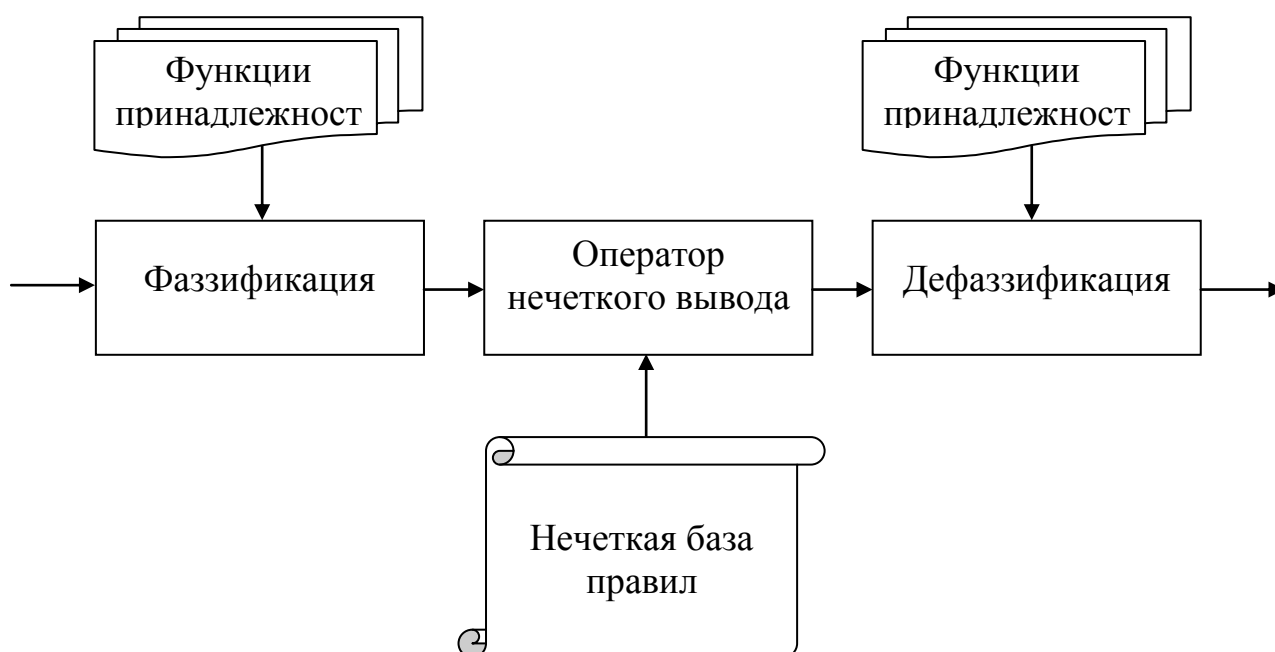


Рисунок 1 – Структурная схема блока нечеткой логики

Нечеткая логика имеет ряд преимуществ. Во-первых, нечеткая логика по своему смыслу формируется на основе логических предпосылок, лежащих в основе операторской деятельности человека. Во-вторых, нечеткая логическая модель более

проста для понимания, чем аналогичная по назначению математическая модель на основе дифференциальных или разностных уравнений. В-третьих, нечеткие модели оказываются более простыми для своей аппаратной реализации по сравнению с классическими алгоритмами управления техническими системами [14].

Методика построения модели управляющих действий летчика

Моделирование динамики полета самолета, выполняющего различные целевые задачи пилотирования, требует от модели летчика-оператора возможности решения многоконтурных многоканальных задач. Примером одной из таких задач является выполнение маневра вираж (разворот). Вираж является маневром, часто используемым при боевом маневрировании, который является одной из наиболее сложных фигур пилотажа, так как требует от летчика координированных действий командными рычагами управления.

При правильном вводе ЛА в вираж в каждый момент времени вертикальная составляющая суммы сил $\sum F_y = (P \sin \alpha + Y_a) \cos \gamma$ должна равняться весу ЛА, то есть должно выполняться условие:

$$n_{y_a} = \frac{1}{\cos \gamma}$$

Это выражение определяет зависимость потребной нормальной перегрузки на вираже $n_{y_a \text{ норм}}$ от угла крена γ . Нарушение этого соотношения приведет к искривлению траектории в вертикальной плоскости:

– при $n_y < n_{y_a \text{ норм}}$ – вниз

– при $n_y > n_{y_a \text{ норм}}$ – вверх.

Летчик, выполняя маневр, осуществляет управление самолетом по двум каналам: крена и тангажа, что позволяет выдерживать условие горизонтальности маневра по показаниям вариометра ($V_y \approx 0$).

Для выполнения разворота без участия летчика, необходима модель, достаточно точно повторяющая его действия. Для решения данной задачи разработана методика построения модели действий летчика на основе нечеткой логики, которая включает в себя несколько этапов:

- формирование банка данных управляющих действий летчика при выполнении задачи пилотирования и его предварительный анализ;
- формирование fuzzy-модели первого приближения по результатам анализа банка данных;
- формирование обучающей выборки из банка данных;
- «обучение» fuzzy-модели первого приближения по обучающей выборке;
- выполнение моделью задачи пилотирования;
- сравнение и анализ результатов.

Банк данных управляющих действий летчика, представляет собой выборку параметров, полученных при решении группой летчиков задачи пилотирования. Задача пилотирования заключалась в выполнении разворотов с различными углами крена на высоте $H = 1000$ м и скорости $V = 600$ км/ч. При выходе на заданный крен летчику необходимо удержать его в течение 20 секунд, при этом обеспечить нулевую вертикальную скорость. Моделирование проведено на пилотажном стенде [15, 16] с использованием Simulink-модели динамики полета самолета

Су-25СМ [17]. Летчиками было выполнено 32 тестовых полета, в которых постоянство скорости поддерживалось автоматически.

По результатам анализа тестовых полетов определены входные параметры: в канале крена рассогласование между текущим и заданным значениями крена $\Delta\gamma$ и скорость крена ω_x ; в канале тангажа вертикальная скорость V_y и ее производная по времени \dot{V}_y . В качестве выходных параметров приняты скорости перемещения ручки управления самолетом (РУС) по крену \dot{X}_e и по тангажу \dot{X}_B .

Формирование и реализация модели летчика выполнялись в среде Matlab&Simulink при помощи расширения Fuzzy Logic Toolbox [18].

Для построения модели использовался редактор FIS Editor, показанный на рисунке 2. В рабочей области редактора указываются названия всех входов и выходов, название системы, выбирается оператор нечеткого вывода (mamdani или sugeno), а так же указываются методы fuzzy-процедур (операции «И» (AND); операции «ИЛИ» (OR); импликации; объединения; дефазификации).

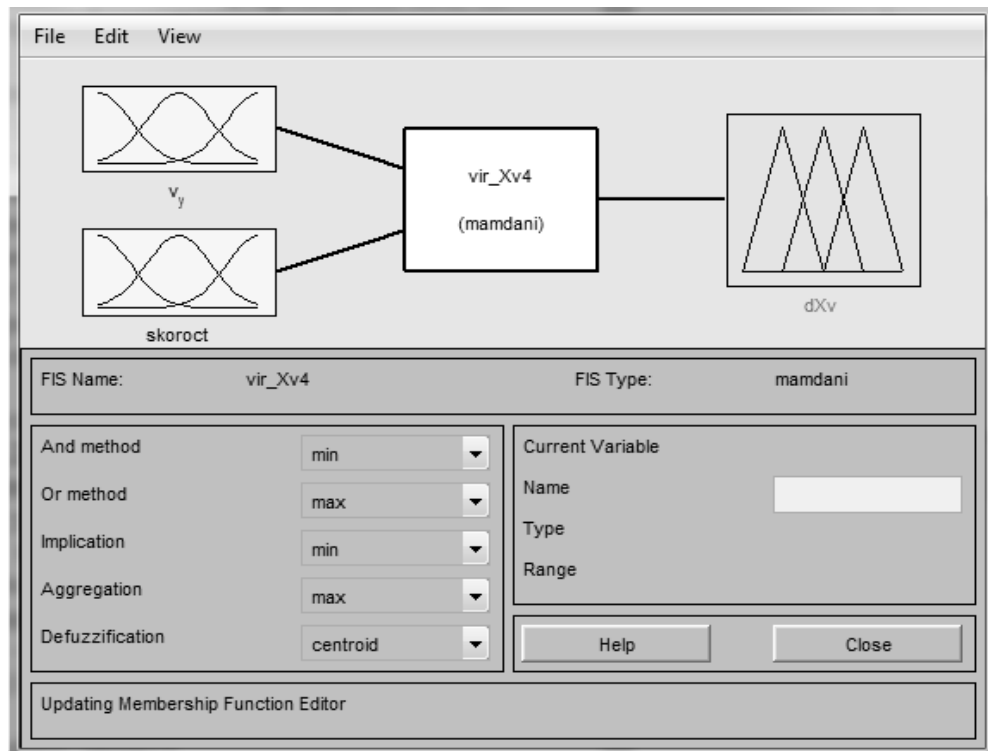


Рисунок 2 – Окно редактора FIS Editor

Для задания функций принадлежности переменных FIS используется редактор Membership Function Editor (рисунок 3). В этом редакторе для каждой лингвистической переменной задается тип функции принадлежности, а также ее параметры. Формализация термов осуществляется с помощью симметричной гауссовой функции принадлежности (gaussmf):

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-h)^2}{2c^2}},$$

где x – элемент универсального множества; h – параметр функции принадлежности (координата максимума); c – параметр функции принадлежности (коэффициент концентрации).

Выбор такого типа функции принадлежности обусловлен ее достаточной гибкостью и простотой, она задается лишь двумя параметрами [19]. Это позволяет сократить размерность задачи при последующей оптимизации модели.

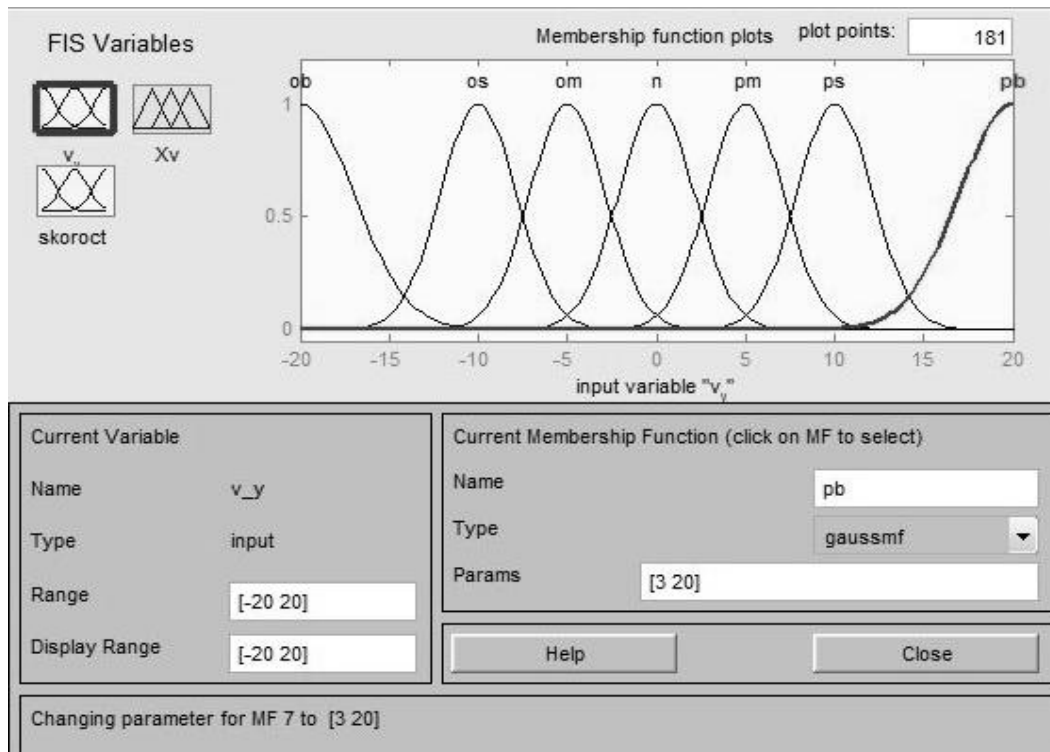


Рисунок 3 – Окно редактора Membership Function Editor

Используя экспертный подход, вводятся лингвистические термы: «отрицательное большое» (ob), «отрицательное среднее» (os), «отрицательное малое» (om), «нейтральное» (n), «положительное малое» (pm), «положительное среднее» (ps), «положительное большое» (pb). Таким образом «привязываются» значения величин вертикальной скорости и ускорения, а также угла крена скорости крена к определенным термам (рисунок 4).

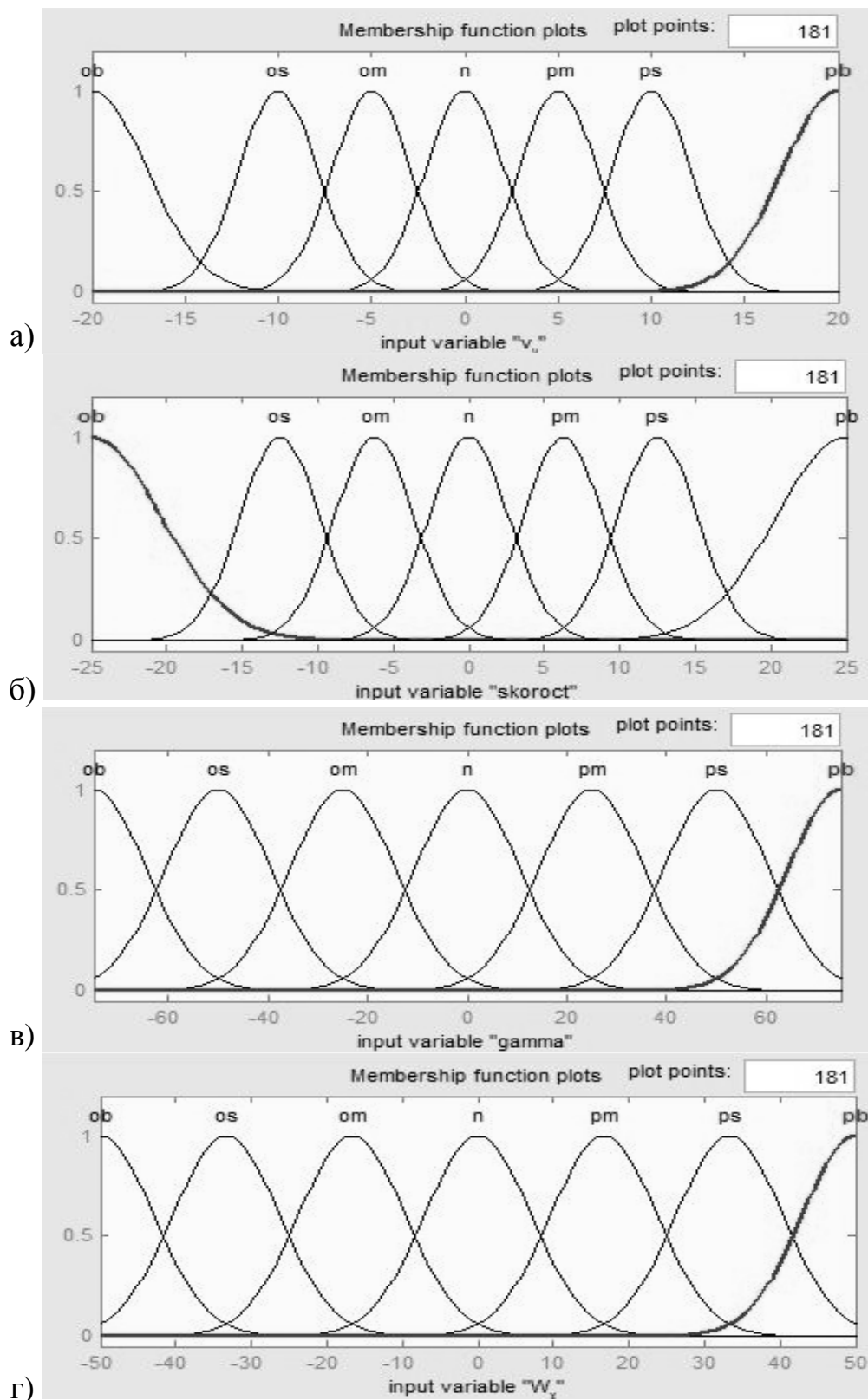


Рисунок 4 – Функция принадлежности:

- а) вертикальной скорости; б) вертикального ускорения;
- в) угла крена; г) скорости крена

В работе использована модель типа Мамдани [10], где взаимосвязь между входами и выходом определяется нечеткой базой правил следующего формата:

$$\begin{aligned}
& \text{ЕСЛИ } (x_1 = a_{1,j_1}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j_1}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j_1}) \\
& \text{ИЛИ } (x_1 = a_{1,j_2}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j_2}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j_2}) \\
& \dots \\
& \text{ИЛИ } (x_1 = a_{1,j_{k_j}}) \text{ И } (x_2 = a_{2,j_{k_j}}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n = a_{n,j_{k_j}}) \\
& \text{ТО } y = d_j, \quad i = \overline{1, m},
\end{aligned}$$

где $a_{i,jp}$ – лингвистический терм, которым оценивается переменная x_i в строке с номером $jp (p = \overline{1, k_j})$; k_j – количество строк конъюнкций, в которых выход y оценивается лингвистическим термом d_j ; m – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходной переменной y .

С помощью операций \cup (ИЛИ) и \cap (И) нечеткая база знаний представляется в более компактном виде:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_{i,jp}) \rightarrow y = d_j, \quad j = \overline{1, m}.$$

Для формирования нечеткой базы правил используется редактор Rule Editor (рисунок 5), который использует графический интерфейс, основанный на описаниях переменных входов и выхода.

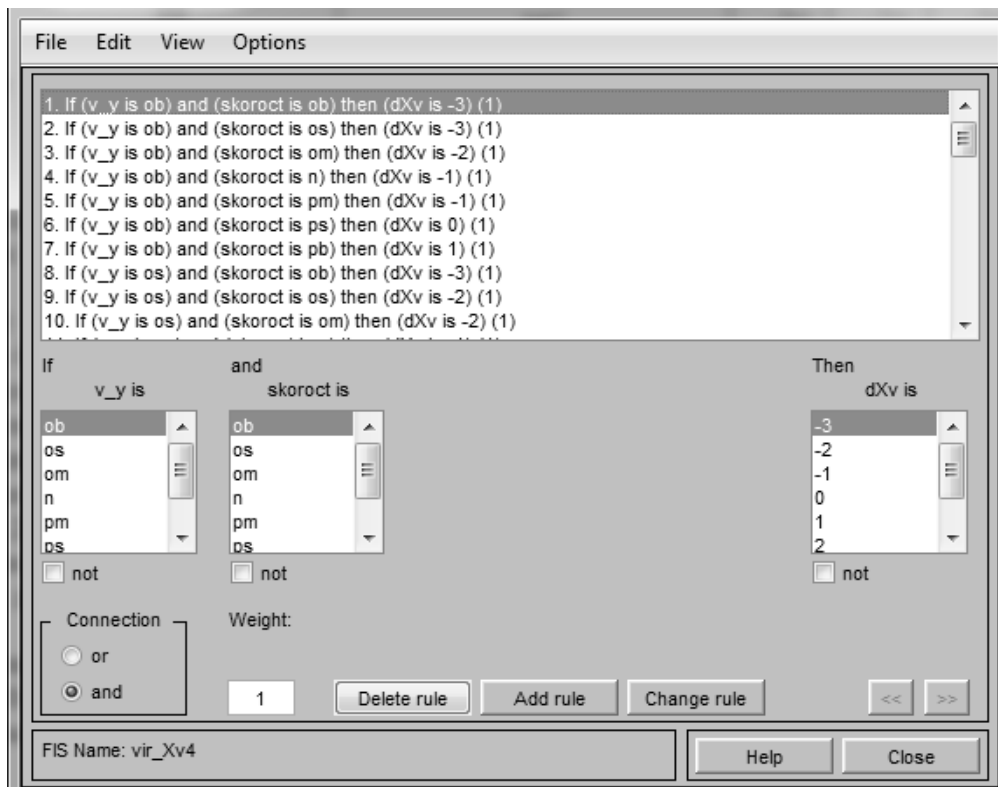


Рисунок 5 – Редактор Rule Editor

На основе полученных лингвистических термов для входных переменных, формируется нечеткая база правил. Лингвистические правила для управления самолетом по тангажу приведены в таблице 1, для управления по крену в таблице 2.

Таблица №1. Лингвистические правила для управления самолетом по тангажу

Вертикальная скорость \ Вертикальное ускорение	Вертикальная скорость						
	ob	os	om	n	pm	ps	pb
ob	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1
os	-3	-2	-2	-2	-1	-1	0
om	-2	-2	-1	-1	0	0	1
n	-1	-1	-1	0	1	1	1
pm	-1	0	0	1	1	2	2
ps	0	1	1	2	2	2	3
pb	1	2	2	2	3	3	3

Таблица №2. Лингвистические правила для управления самолетом по крену

Угол крена \ Скорость крена	ob	os	om	n	pm	ps	pb
ob	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1
os	-3	-2	-2	-2	-1	-1	0
om	-2	-2	-1	-1	0	0	1
n	-1	-1	-1	0	1	1	1
pm	-1	0	0	1	1	2	2
ps	0	1	1	2	2	2	3
pb	1	2	2	2	3	3	3

Таким образом:

– если значение вертикальной скорости «отрицательное большое» и вертикальное ускорение «отрицательное большое», то скорость движения ручки управления самолетом «отрицательная большая» (-3);

– если значение вертикальной скорости «отрицательное большое» и вертикальное ускорение «отрицательное среднее», то скорость движения ручки управления самолетом «отрицательная большая» (-3);

– если значение вертикальной скорости «отрицательное большое» и вертикальное ускорение «отрицательное малое», то скорость движения ручки управления самолетом «отрицательная средняя» (-2);

– если значение вертикальной скорости «отрицательное большое» и вертикальное ускорение «нейтральное», то скорость движения ручки управления самолетом «отрицательная малая» (-1);

– если значение вертикальной скорости «отрицательное большое» и вертикальное ускорение «положительное малое», то скорость движения ручки управления самолетом «отрицательная малая» (-1);

– если значение вертикальной скорости «отрицательное большое» и вертикальное ускорение «положительное среднее», то скорость движения ручки управления самолетом «нулевая» (0);

– если значение вертикальной скорости «отрицательное большое» и вертикальное ускорение «положительное большое», то скорость движения ручки управления самолетом «положительная малая» (1);

Всего сформировано 49 правил для каждого канала управления.

В результате получена модель летчика первого приближения (рисунок б), которая включает в себя два fuzzy-блока (блок управления в канале тангажа и блок управления в канале крена).

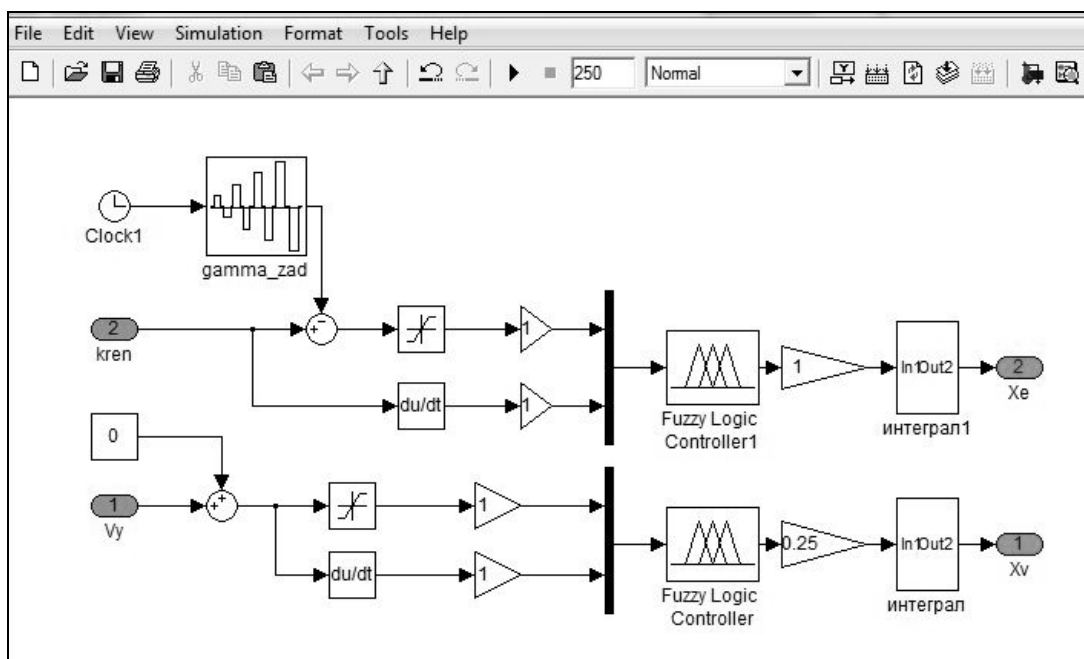


Рисунок 6 – Fuzzy-модель первого приближения

Выполнив имитационное моделирование маневра разворота с участием летчика на пилотажном стенде и моделирование с использованием модели первого приближения, были получены зависимости, представленные на рисунках 7-10.



Рисунок 7 – Зависимость перемещения ручки управления самолетом по тангажу, полученная при моделировании разворота



Рисунок 8 – Зависимость вертикальной скорости самолета, полученная при моделировании разворота



Рисунок 9 – Зависимость перемещения ручки управления самолетом по крену, полученная при моделировании разворота

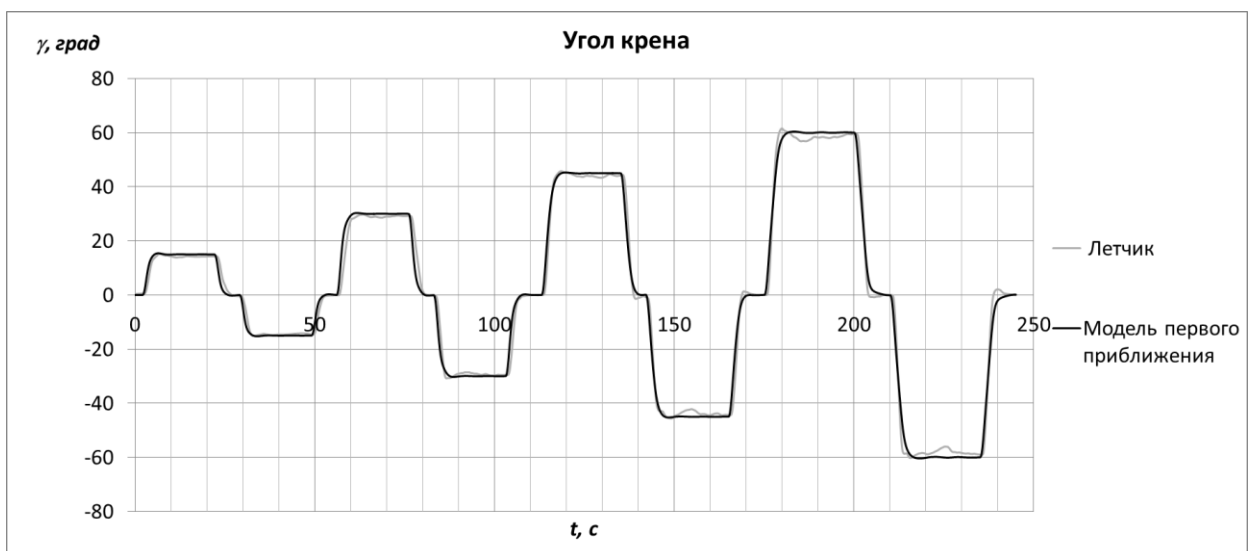


Рисунок 10 – Зависимость угла крена самолета, полученная при моделировании разворота

Fuzzy-модель первого приближения сразу дает удовлетворительный результат, так как задача пилотирования моделью выполняется. Так в канале крена по величине отклонения ручки наблюдается качественная сходимость результатов, но присутствуют количественные расхождения. В канале тангажа, кроме этого, наблюдается раскачка ручки управления.

Для повышения качества управления и приближения действий модели к действиям летчика, производится ее «обучение» (оптимизация) [20]. Для этого первоначально формируется обучающая выборка, которая получается методом осреднения данных, полученных в результате выполнения летчиками задачи пилотирования (условный «средний» летчик). Эта выборка представляет собой нелинейную зависимость вида «входы-выход»:

$$(X_r, y_r), \quad r = 1, M,$$

где $X_r = (x_{r,1}, x_{r,2}, \dots, x_{r,n})$ – входные параметры, y_r – выходные параметры в r -паре; M – объем выборки.

В качестве оптимизируемых параметров выбираются параметры гауссовых функций принадлежности h и c . Целевой функцией оптимизации [21, 22] является минимизация значения среднеквадратической ошибки между выходными значениями обучающей выборки и полученного fuzzy-блока:

$$f(I, O) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (y_r - F(X_r, I, O))^2} \rightarrow \min,$$

где $F(X_r, I, O)$ – значение выхода нечеткой модели при соответствующем значении входного параметра X_r ; I – матрица оптимизируемых параметров функций принадлежности термов входных переменных; O – матрица оптимизируемых параметров функций принадлежности термов выходных переменных.

В данной задаче оптимизации на управляемые переменные (I, O) накладываются ограничения, обеспечивающие линейную упорядоченность

элементов терм-множеств. Такие ограничения не позволяют алгоритму оптимизации сделать, например, терм «Низкий» выше термина «Высокий».

Функции принадлежности переменных «обученной» модели представлены на рисунках 11 и 12.

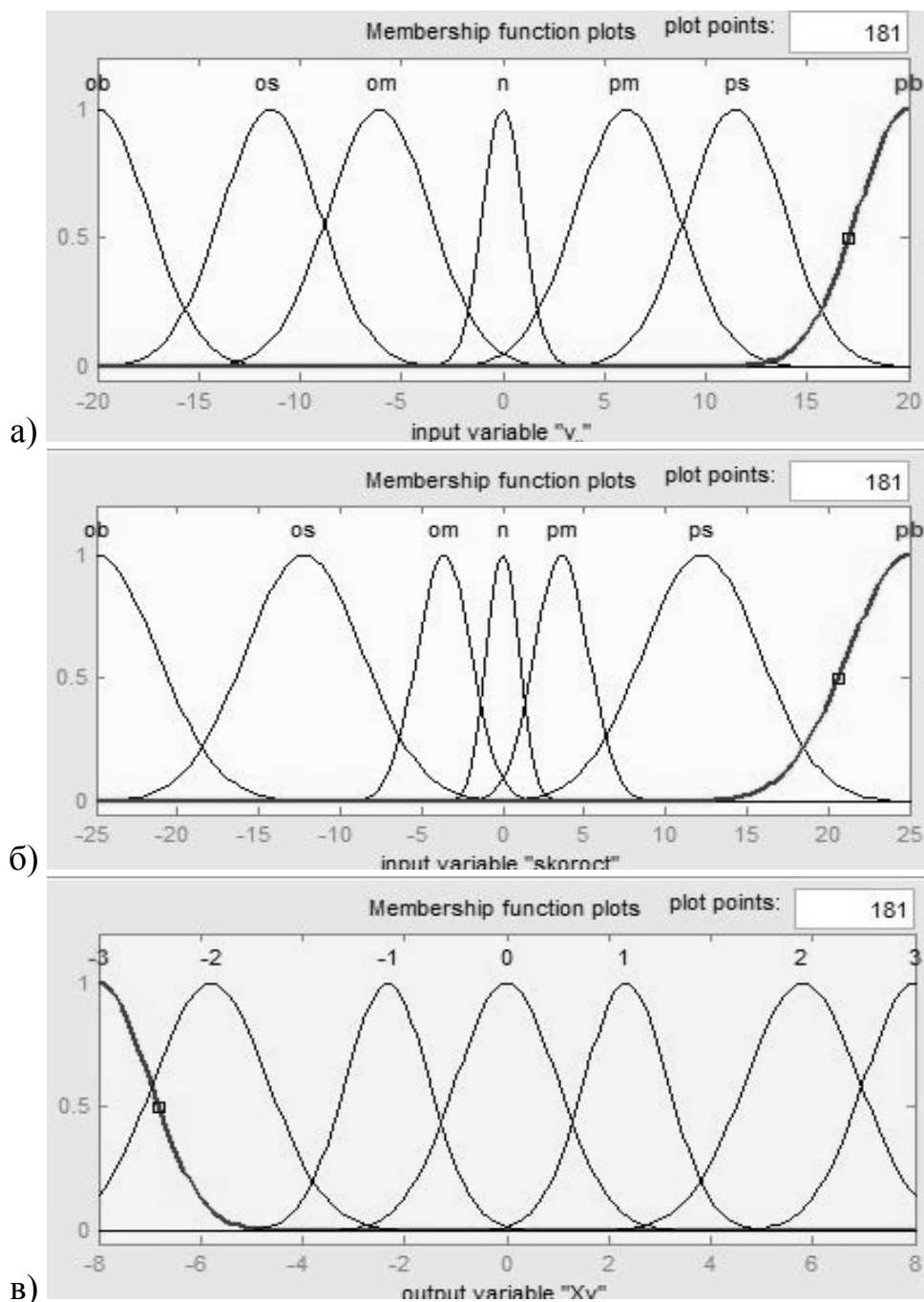


Рисунок 11 – Функции принадлежности:
а) вертикальной скорости; б) вертикального ускорения;
в) скорости отклонения ручки по тангажу

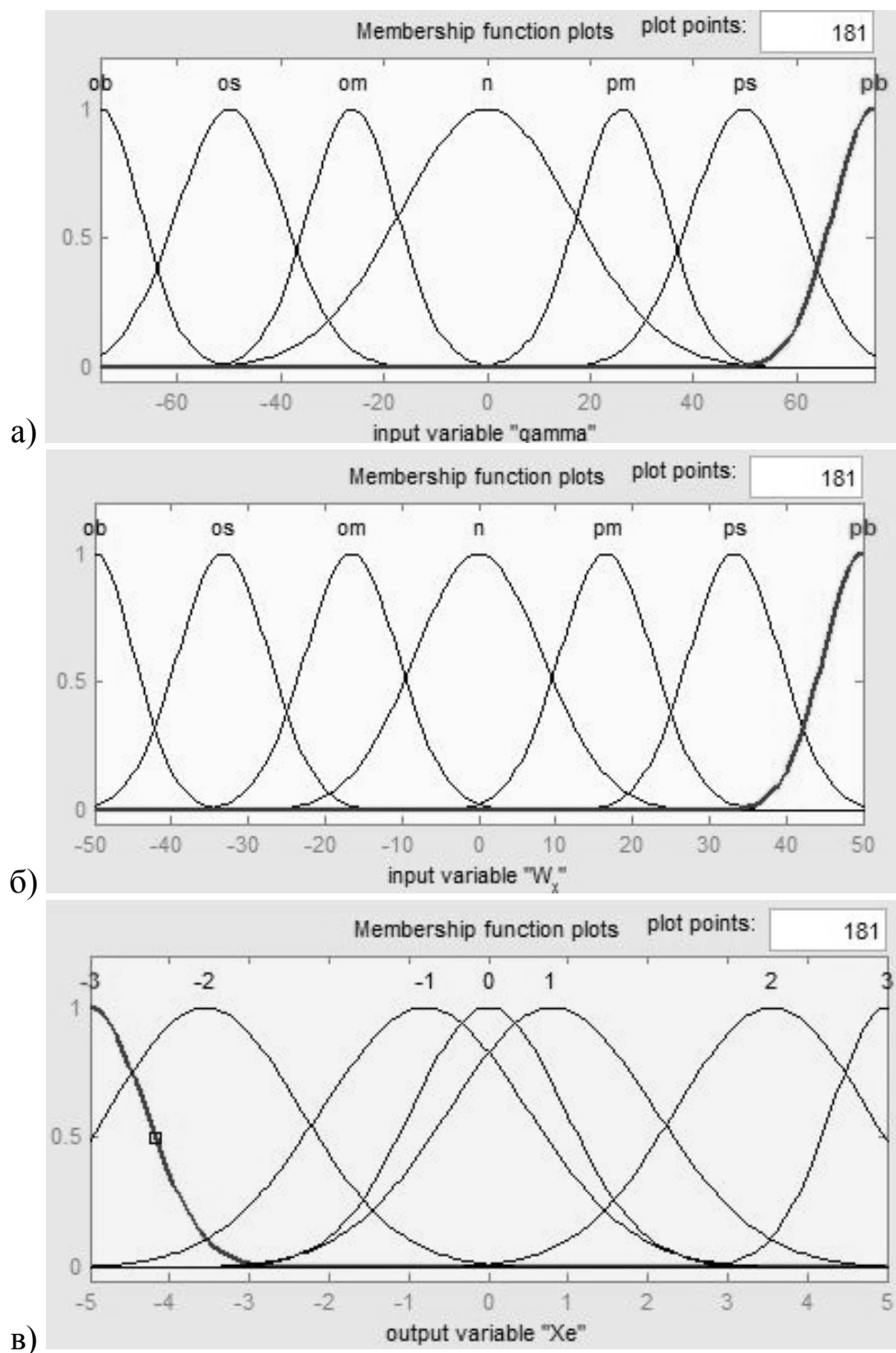


Рисунок 12 – Функции принадлежности:

а) угла крена, б) скорости крена, в) скорости отклонения ручки по крену

Полученная таким образом модель летчика включается в контур управления самолетом для выполнения аналогичной задачи пилотирования. Полученные результаты сравниваются с результатами «среднего» летчика. Как видно из

графиков (рисунки 13-16), характер управления «обученной» модели заметно улучшился, по сравнению с моделью первого приближения. В канале тангажа раскачка ручки отсутствует, на углах крена $\gamma \leq 45^\circ$ количественные значения близки к значениям «среднего» летчика, но на больших углах наблюдается небольшое расхождение параметров.



Рисунок 13 – Зависимость перемещения ручки управления самолетом по тангажу, полученная при выполнении задачи пилотирования летчиком и моделью



Рисунок 14 – Зависимость вертикальной скорости, полученная при выполнении задачи пилотирования летчиком и моделью



Рисунок 15 – Зависимость перемещения ручки управления самолетом по крену, полученная при выполнении задачи пилотирования летчиком и моделью

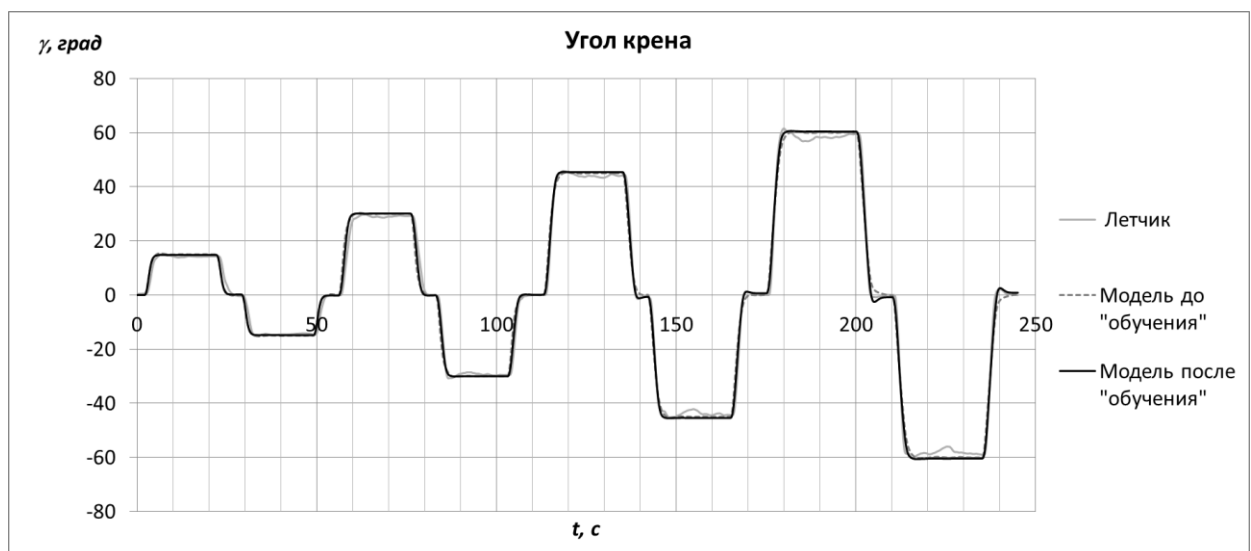


Рисунок 16 – Зависимость угла крена, полученная при выполнении задачи пилотирования летчиком и моделью

Выводы

В результате проделанной работы разработана методика построения модели управляющих действий летчика с использованием нечеткой логики на примере управления самолетом при выполнении разворота. Полученная модель выполняет

поставленную задачу пилотирования, достаточно точно повторяя характер пилотирования «среднего» летчика. При этом на малых углах крена ($\gamma \leq 45^\circ$) отличие количественного значения отклонения ручки моделью от отклонения ручки летчиком, как по крену, так и по тангажу, не превышает 2% от полного хода ручки. При больших углах крена этот параметр возрастает для отклонения ручки по крену до 6,5%, а для отклонения ручки по тангажу до 7,6%.

Дальнейшим исследованием является:

- оценка устойчивости fuzzy-модели;
- оценка адекватности fuzzy-модели в случае изменения объекта управления или входного сигнала;
- изучение адаптивных свойств fuzzy-модели;
- изучение других вариантов построения логических связей между входными и выходными параметрами fuzzy-моделей.

Библиографический список

1. Ефремов А.В., Оглоблин А.В., Предтеченский А.Н., Родченко В.В. Летчик как динамическая система. – М.: Машиностроение, 1992.- 336 с.
2. Ефремов А.В. Система самолет-летчик. Закономерности и математические модели поведения летчика. – М.: Изд-во МАИ, 2017. – 196 с.
3. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Аэродинамика самолета: Динамика продольного и бокового движения. – М.: Машиностроение, 1979. – 352 с.
4. McRuer D.T., Krendel E.S. Mathematical Models of Human Pilot Behavior, AGARD AG-188, 1974, 72 p.

5. Jirgl M., Jirgl M., Bradac Z. Models of pilot behavior and their use to evaluate the state of pilot training // Journal of Electrical Engineering, 2016, vol. 67, no. 4, pp. 267 - 272.
6. Suzuki S. Analysis of human pilot control inputs using neural network // Application Interrupt and Reset Control Register, 2006, vol. 43, no. 3, pp. 793 - 798.
7. Виноградов С.С. Синтез нечеткого навигационного регулятора для малоразмерного вертолета «Раптор» // Труды МАИ. 2014. № 73. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48562>
8. Чичерова Е.В. Использование алгоритмов нечеткой логики для управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57812>
9. Zadeh L. Fuzzy logic = Computing with words // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, vol. 4, no. 2, pp. 169 – 239.
10. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
11. Шеври Ф., Гели Ф. Нечеткая логика. Техническая коллекция Schneider Electric, 2009. № 31. URL: <http://netkom.by/docs/N31-Nechetskaya-logika.pdf>
12. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 167 с.
13. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Влияние методов дефаззификации на скорость настройки нечеткой модели // Кибернетика и системный анализ. 2002. № 5. С. 169 - 176.

14. Fuzzy Controllers, Theory and Applications. Edited by Dr. Lucian Grigorie, InTech, 2011, 368 p.
15. Костин П.С., Верещагин Ю.О., Волошин В.А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики маневренного самолета // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57735>
16. Верещиков Д.В., Маяцкий С.А., Костин П.С., Верещагин Ю.О., Грасько Т.В. Патент на полезную модель «Пилотажный стенд маневренного самолета» № 156567. заявка № 2014141686 от 15.10.2014.
17. Волошин В.А., Верещиков Д.В. К вопросу о создании математической модели динамики самолета // Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Сборник докладов. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23 -26.сентября 2015. С. 799 - 801.
18. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
19. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. - М.: Мир, 1993. - 368 с.
20. Измаилов А.Ф. Численные методы оптимизации. - М: Физматлит, 2008. - 320 с.
21. Штовба С.Д. Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB. Exponenta Pro // Математика в приложениях. 2003. № 2 (2). С. 9 – 15.

22. Takagi T., Sugeno M., Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116 – 132.