

РУЛЕВОЙ ПРИВОД ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИЗМЕНЯЕМОЙ НЕЧЕТКИМ КОНТРОЛЛЕРОМ ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ

Кандидат техн. наук, старший научный сотрудник **Замыслов М.А.**,
кандидат техн. наук, доцент **Мальцев А.М.**,
кандидат техн. наук, старший научный сотрудник **Михайленко С.Б.**,
Тарасов С.В., Штанькова Н.В.
(Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»)

STEERING GEAR WITH THE PASS-BAND CHANGED BY A FUZZY CONTROLLER

Zamyslov M.A., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Maltsev A.M., Ph.D. (Tech.), Associate Professor,
Mikhaylenko S.B., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Tarasov S.V., Shtankova N.V.
(Military Air Force Training and Research Center “Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”)

Летательный аппарат, турбулентность атмосферы, рулевой привод, изменяемая полоса пропускания, нечеткий контроллер.

Aircraft, turbulent atmosphere, steering gear, the changeable pass-band, fuzzy controller.

Предложен способ построения рулевого привода летательного аппарата с изменяемой нечетким контроллером полосой пропускания. Рассмотрен вариант реализации способа на примере рулевого привода с изодромной обратной связью, проведено его моделирование с использованием расширений Simulink и Fuzzy Logic Toolbox программы MATLAB и показана возможность его применения в интересах повышения безопасности полетов в турбулентной атмосфере.

In article the way of construction of a steering gear of a aircraft with the pass-band changed by the fuzzy controller is offered. The variant of realization of a way on an example of a isodrom feedback steering gear is considered, Its modelling with use of expansions Simulink and Fuzzy Logic Toolbox programs MATLAB is spent and possibility of its application in interests of increase of safety of flights in turbulent atmosphere is shown.

Введение

В работе [1] показано, что при полетах летательных аппаратов (ЛА) в сложных метеорологических условиях их безопасность в большой степени определяется надежностью и эффективностью функционирования систем управления и их исполнительных органов (рулевых приводов, рулей, элеронов и др.). Особо опасным является полет в зонах турбулентности, когда может возникнуть так называемый «подхват», приводящий к сваливанию ЛА из-за превышения предельного угла атаки. Примером этого является катастрофа самолета Ту-154 RA-85185 над Донецкой областью (2006 г.) при попытке обойти грозовой фронт путем набора предельной для ЛА высоты в зоне турбулентности [2]. В апреле 2017 г. получили травмы из-за сильной турбулентности 15 пассажиров самолета Boeing 747 австралийской авиакомпании *Qantas* во время выполнения рейса из Мельбурна в Гонконг [3]. В инциденте, который произошел с лайнером Boeing 777 авиакомпании Turkish Airlines, совершавшим перелет из Стамбула в Нью-Йорк в марте 2019 г., из-за воздействия мощной турбулентности пострадали 30 человек [4].

Опасность турбулентности подтверждается данными статистики национального комитета США по безопасности перевозок. Они показывают, что в период с 1964 г. по 1975 г. турбулентность привела к 183 авариям с пострадавшими. При этом 63% (115) из их числа было связано с турбулентностью, обусловленной грозовыми образованиями [5]. При полете в турбулентной

зоне из-за добавочных ускорений возникают вредные перегрузки, вызывающие возмущенное движение ЛА и болтанку, что может привести к травмированию пассажиров. Действие перегрузок вызывает дополнительные напряжения в отдельных частях ЛА, что ускоряет изнашивание элементов конструкции. В случаях, когда перегрузки превышают допустимые, ЛА может попасть на срывные режимы или разрушиться в воздухе.

Обычно при попадании в зону болтанки пилоту рекомендуется стремиться к сохранению горизонтального полета и избегать резких движений органами управления. Болтанка более опасна при полете на практическом потолке, где ЛА обладает меньшей устойчивостью [6, 7]. При выполнении полета в условиях болтанки могут складываться ситуации, когда направление управляющих воздействий пилота на ЛА случайно совпадёт с характером турбулентного (внешнего) воздействия атмосферы на ЛА. В таких условиях увеличивается вероятность разрушения ЛА и попадания в аварийные и катастрофические ситуации.

В [1] для сохранения возможности управления полетом ЛА в условиях высокой турбулентности предложен вариант построения рулевого привода (РП) с изменяемой полосой пропускания.

Структурная схема такого РП с изодромной обратной связью и изменяемой полосой пропускания приведена на рис.1 а), а ЛАХ замкнутого контура РП с исходной изодромной ОС (штрихпунктирная линия) и изодромной ОС с последовательно включенным формирующим звеном (сплошная линия) - на рис. 1 б) [1].

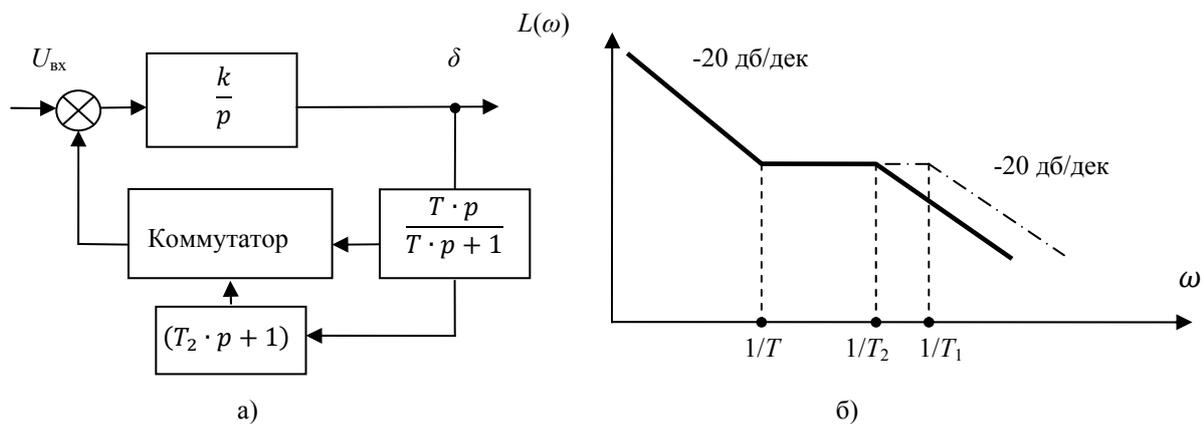


Рис. 1. Структурная схема рулевого привода с изодромной обратной связью и изменяемой полосой пропускания; а) структурная схема РП; б) логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

Изображенная на рис. 1 б) асимптотическая логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАХ) РП, вычислялась по формуле $L(\omega) = 20 \cdot \lg(|W_{\text{иф}}(p)|)$, где $W_{\text{иф}}(p)$ – передаточная функция приведенного на рис. 1а) РП.

Для ослабления высокочастотных колебаний, вызванных турбулентностью, нежесткостью конструкции самолета и собственными частотами крутильных и изгибных колебаний органа управления в РП (рис. 1), в цепь обратной связи последовательно с изодромом включено форсирующее звено с передаточной функцией $W_f(p) = (T_2 p + 1)$. Это позволяет уменьшить полосу пропускания РП $\Delta\omega_{\text{рп}}$. При этом передаточная функция замкнутого контура РП примет вид [1]

$$W_{\text{иф}}(p) = \frac{T \cdot p + 1}{T_3 \cdot p + 1} \cdot \frac{k_1}{p}, \quad k_1 = \frac{k}{1 + k \cdot T}, \quad T_3 = \frac{T \cdot (1 + k \cdot T_2)}{1 + k \cdot T}, \quad (1)$$

где k – коэффициент усиления рулевого агрегата;

T – постоянная времени изодрома в цепи обратной связи;

T_2 – постоянная времени форсирующего звена.

Недостатком представленного на рис. 1 РП с ИПП является то, что решение на изменение структуры и переключение коммутатора должны приниматься и выполняться пилотом ЛА. В условиях же сильной болтанки и высокой психо-эмоциональной нагрузки возможны запоздалое переключение или ситуации, в которых переключение коммутатора не будет выполнено вообще.

Поэтому обеспечение возможности автоматического изменения полосы пропускания РП ЛА является актуальной задачей повышения безопасности полетов в сложных метеорологических условиях. Данная работа посвящена решению именно этой задачи с использованием методов и средств искусственного интеллекта.

Особенности турбулентности атмосферы и ее основные характеристики рассмотрены в работах [6-7, 10], посвященных вопросам управления полетом ЛА и обеспечения его безопасности в возмущенной атмосфере.

При полете в турбулентной зоне движение летательного аппарата становится возмущенным, возникают добавочные вредные ускорения (в вертикальной и боковой плоскости) и болтанка. Характеристики болтанки ЛА, вызванной действием турбулентности, приведены в табл. 1 [6].

Таблица 1

Характеристики болтанки ЛА, вызванной действием турбулентности

Интенсивность болтанки	Характеристика поведения ЛА и приборов при болтанке	Величина максимальной перегрузки
Слабая	Редкие колебания и вздрагивания самолета. Легкие броски вверх и вниз. Изменение показаний вариометра до 2-3 м/с.	Менее ± 0.2
Умеренная	Значительное дрожание самолета, резкие и частые броски вниз и вверх до 10-15 м, колебания воздушной скорости до 10-15 км/ч. Режим полета сохраняется.	От ± 0.2 до ± 0.5
Сильная	Интенсивные частые и резкие броски самолета вверх и вниз до 20-40 м и более, изменение воздушной скорости до 20-40 км/ч, сильное дрожание самолета и ощутимые динамические удары. Режим полета нарушается.	От ± 0.5 до ± 0.8

Как отмечалось выше, при попадании в зону турбулентности (болтанки) летчик должен стремиться к сохранению горизонтального полета и не совершать резких движений рукояткой управления (штурвалом). Оказать ему в этом помощь и должна предлагаемая автоматическая система изменения ширины полосы пропускания рулевого привода, облегчающая пилотирование ЛА в условиях турбулентности.

В качестве входных параметров (переменных), необходимых для функционирования рассматриваемой автоматической системы, управляющей изменением полосы пропускания рулевых приводов ЛА, будем использовать приведенные в табл. 1 значения интенсивности болтанки, изменения показаний вариометра и датчика нормальных ускорений (величины максимальной перегрузки). Систему будем разрабатывать с использованием методов нечеткой логики, широко применяемых в современных условиях для построения и

совершенствования систем управления полетом ЛА и их элементов [8, 9, 13-17].

Ниже кратко рассмотрим способ построения рулевого привода летательного аппарата с изменяемой нечетким контроллером (НК) полосой пропускания.

Способ построения рулевого привода летательного аппарата с изменяемой нечетким контроллером полосой пропускания

Способ основан на использовании таких значений параметров полета ЛА, которые являются следствием воздействия на него турбулентности, то есть изменений показаний приборов, характеризующих вертикальную и горизонтальную составляющие скорости полета, и датчиков ускорений, характеризующих нормальную и боковую перегрузки ЛА. Эти значения после фаззификации (преобразования в лингвистические переменные) используются в НК, выполняющем роль управляющего элемента, для принятия решения об изменении полосы пропускания РП. Выходные переменные НК, полученные в результате выполнения процедур нечеткого вывода, после дефаззификации (преобразования лингвистических переменных в физические величины (напряжения)) управляют переключением коммутатора. Реализуется способ путем включения в схему, изображенную на рис. 1, датчиков, измеряющих скорость и ускорение ЛА, и НК, управляющего переключением коммутатора. Структурная схема РП с НК, управляющим переключением коммутатора, изменяющего полосу пропускания привода, приведена на рис. 2. Здесь так же, как в [1], рассматривается РП с изотропной ОС, а для уменьшения его полосы пропускания, в цепь обратной связи, последовательно с изотропом включается форсирующее звено с передаточной функцией $W_f(p) = (T_2 p + 1)$.

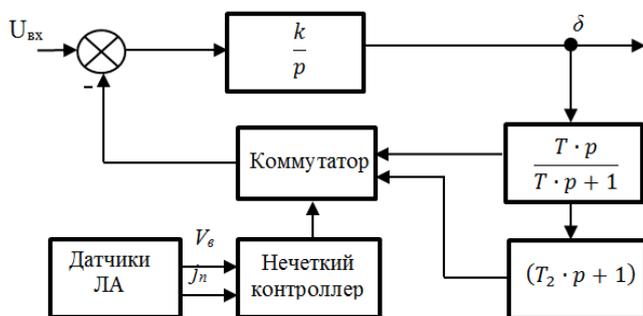


Рис. 2. Структурная схема рулевого привода с нечетким контроллером, управляющим переключением коммутатора для изменения полосы пропускания привода

Рассмотрим теперь более подробно порядок построения нечеткого контроллера, управляющего работой коммутатора рулевого привода, и процессы его функционирования в составе РП.

Построение алгоритмов нечеткого управления системой автоматического изменения полосы пропускания рулевого привода

Допустим, что основными параметрами, характеризующими влияние турбулентности на ЛА, являются такие показатели интенсивности болтанки, как вертикальная скорость (V_V) и нормальное ускорение (J_n). Поэтому в качестве управляющих характеристик будем использовать отклонения этих параметров полета от значений, поддерживаемых демпферами и автоматами

устойчивости ЛА или пилотами в ручном режиме управления.

С помощью операции фаззификации производится переход от числовых значений отклонений этих характеристик к их "нечеткой" интерпретации. При этом, в соответствии с [8], возможные отклонения этих характеристик рассматриваются как лингвистические переменные (ЛП), описываемые следующей упорядоченной совокупностью

$$\langle N, T = [\langle \beta, \gamma, M = \langle \mu_i(x) / x \rangle], X \rangle, \quad (2)$$

где N – имя ЛП;

T – терм-множество (ТМ) (множество значений) ЛП;

β – имя нечеткой переменной;

γ – базовая шкала нечеткой переменной;

M – функция принадлежности (ФП) нечеткой переменной;

X – базовая шкала лингвистической переменной;

μ_i – значение ФП.

ФП (2) задает степень соответствия текущего отклонения характеристик к каждому элементу терм-множества ЛП и представляет собой непрерывную функцию, принимающую множество значений в диапазоне от нуля до единицы. Правила вычисления и возможные варианты представления ФП термов в виде различных нечетких чисел описаны в [8,9]. Мы будем в основном использовать представление ФП термина в виде нечеткого числа L-R типа или его модификаций

$$LR = \{b, a, c\},$$

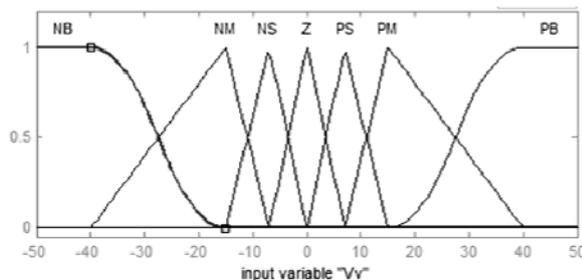
где b- точка, в которой значение ФП равно единице; a(c)- координаты ближайшей слева (справа) к $x=b$ точки базовой шкалы, в которой ФП принимает нулевое или иное значение.

Введенные выше понятия и терм-множества будем использовать при разработке процедур принятия решений по управлению системой изменения полосы пропускания РП, в виде совокупности логико-формальных правил, представленных в лингвистической форме, и преобразовании их с применением методов нечеткой логики. Такие правила формируются квалифицированными экспертами в области управления ЛА и их эксплуатации. Отметим также, что все рассматриваемые ниже правила, характеристики и параметры являются гипотетическими, не относятся ни к одному из типов ЛА и носят иллюстративный характер. При необходимости они могут быть конкретизированы и уточнены применительно к конкретным типам ЛА.

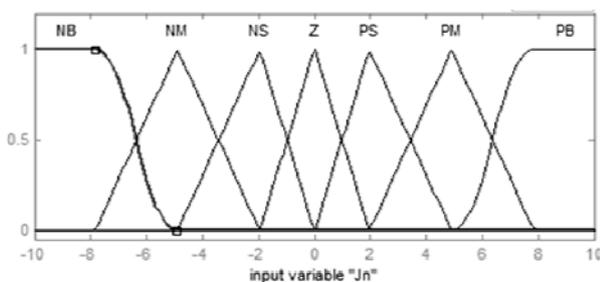
Приступая к формированию необходимой для решения рассматриваемой задачи базы правил системы нечеткого вывода, в первую очередь, определим входные и выходные лингвистические переменные. В качестве входных лингвистических переменных будем рассматривать величину вертикальной скорости полета ЛА (« V_V ») и нормального ускорения ЛА (« J_n »). Функции принадлежности перечисленных выше входных ЛП приведены на рис. 3.

Введем также качественные оценки для принимаемых решений на выходе системы, т.е. определим выходную ЛП. Для этого сформируем решения, которые должны приниматься в процессе функционирования системы автоматического ИПП РП. К таким решениям, соответствующим рассмотренным выше особенностям построения системы, относятся следующие два реше-

ния: Sw1 – широкая полоса пропускания РП (выключить коммутатор); Sw2 – узкая полоса пропускания РП (включить коммутатор). Для того чтобы различать такие понятия, представим выходную ЛП в виде двух термов, показанных на рис. 4. Таким образом, в качестве выходной лингвистической переменной будем рассматривать величину управляющего напряжения, подаваемого на коммутатор (переключатель) рулевого привода («Sw»). При этом выходная ЛП может принимать одно из значений множества: $S = \{OFF, ON\}$.



а)



б)

Рис. 3. Вид функций принадлежности качественных оценок значений характеристик основных параметров полета летательного аппарата:

- а) вертикальной скорости полета ЛА V_v ;
- б) нормального ускорения J_n

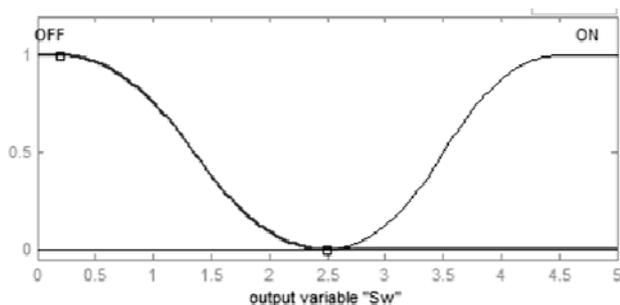


Рис. 4. Вид функций принадлежности качественных оценок значений управляющих сигналов, подаваемых на коммутатор РП

Для конкретности и с учетом ограниченного объема статьи из всего многообразия возможных аварийных ситуаций ЛА в условиях возмущенной среды рассмотрим только пример ситуации, связанной с попаданием ЛА в область высокой турбулентности при выполнении полета на малых высотах. При этом ограничимся одним из возможных вариантов основных признаков того, что ЛА вошел в зону сильной турбулентности на маршруте полета. Такими признаками являются: высокая вертикальная скорость полета и большое значение нормального ускорения.

В такой ситуации одним из правил, соответствующим принимаемому решению Sw2, описываемому ЛП Sw (узкая полоса пропускания РП (включить коммутатор)), и записанным на естественном языке для рассматриваемой системы, может быть следующее высказывание:

если вертикальная скорость полета ЛА и максимальное ускорение соответствуют сильной турбулентности, то есть интенсивности болтанки «сильная», то продолжать движение ЛА в исходном режиме нельзя, необходимо уменьшить полосу пропускания РП (включить коммутатор).

С использованием введенных выше терм-множеств входных и выходной лингвистических переменных и логико-формальных методов это правило в соответствии с упрощенным алгоритмом нечеткого вывода [8] записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} ((V_v = PB) \wedge (J_n = PB)) &\mapsto (Sw = ON), \\ ((V_v = NB) \wedge (J_n = NB)) &\mapsto (Sw = ON), \end{aligned} \quad (4)$$

где \wedge - знак логической операции "и"; \mapsto - знак логической операции "секвенция", обозначающий, что высказывание, стоящее в правой части выражения (4) "истинно" тогда и только тогда, когда "истинно" высказывание в его левой части.

Аналогичным образом, с использованием терм-множеств входных и выходных ЛП и упрощенного алгоритма нечеткого вывода, записываются соответствующие логико-формальные правила (правила нечеткого вывода) для принятия возможных решений во всех других ситуациях, характеризующихся различными интенсивностями и направлениями турбулентности (болтанки). Процедура построения нечеткой модели с упрощенным алгоритмом нечеткого вывода подробно описана в работах [16,17], посвященных разработке систем распознавания опасных ситуаций и спасения экипажа ЛА в катастрофических ситуациях. Там же приведена типовая структурная схема НК, разработанная с использованием упрощенного алгоритма нечеткого вывода.

Рассмотрим реализацию рассматриваемой системы в программной среде *MATLAB*.

Нечеткая модель контроллера автоматической системы изменения полосы пропускания РП, построенная с использованием пакета *Fuzzy Logic Toolbox* программы *MATLAB*

Рассмотрим решение задачи, содержательная постановка которой и один из алгоритмов нечеткого моделирования приведены выше. При этом будем использовать программную среду *MATLAB* с ее расширениями *Fuzzy Logic Toolbox* и *Simulink* [8,15]. Эти расширения позволяют построить нечеткий контроллер, реализующий алгоритм нечеткого вывода, сформировать программный код его работы и провести имитационное моделирование системы автоматического ИПП РП.

Имитационная модель такой системы разработана на основе структурной схемы, изображенной на рис. 2.

Технология разработки таких моделей и последовательность выполнения основных задач при этом подробно рассмотрены в работах [8,9,13-14,16,17]. Поэтому ниже рассматриваются только характеристики и особенности разработки НК в интерактивном режиме с

использованием интерфейса расширения *Fuzzy Logic Toolbox* [8, 15] программы *MATLAB*.

Остановимся более подробно на НК. Основная функция, возлагаемая на него – формирование выходного значения напряжения для управления коммутатором системы в зависимости от текущих значений напряжения, пропорционального текущим значениям параметров полета ЛА в турбулентной атмосфере. Входной информацией для контроллера являются сигналы датчиков вертикальной скорости полета (вариометра) и нормального ускорения, а выходными сигналами – команды на включение и выключение коммутатора.

Входная (чёткая) информация в НК обрабатывается следующим образом [8, 13, 14]: производится фаззификация текущих значений входных переменных (преобразование в лингвистические переменные); разрабатывается база правил нечеткого вывода (база правил контроллера) с учетом выбранных решений; производится нечёткий логический вывод, в результате которого вычисляются лингвистические значения выходных переменных на основании входных лингвистических значений и с использованием базы правил контроллера; производится дефаззификация, то есть заключительный

этап обработки, связанный с вычислением "чётких" значений управляющих параметров.

Ключевым элементом создания нечеткой модели является разработка базы правил НК. Она сводится к решению задач выбора входных ЛП, назначения для каждой из них набора лингвистических значений (термов) и выбора для каждого термина соответствующего нечеткого множества (см. рис. 3, 4).

При решении перечисленных выше задач использовался нечёткий контроллер с двумя входами и одним выходом (рис. 2). Для реализации алгоритма управления применялись графические средства пакета расширения *Fuzzy Logic Toolbox*, позволяющие разрабатывать и применять системы нечеткого вывода в интерактивном режиме [8,15] с использованием редакторов систем нечеткого вывода (*FISE*), функций принадлежности (*MFE*), правил вывода (*RE*), просмотрщиков правил (*RV*) и поверхностей вывода (*SV*). Система нечеткого вывода была выполнена по типу Мамдани. Фрагменты интерфейса пакета расширения *Fuzzy Logic Toolbox*, реализующего методами нечеткой логики разработанный НК для модели системы ИПП РП, приведены на рисунках 5-7.

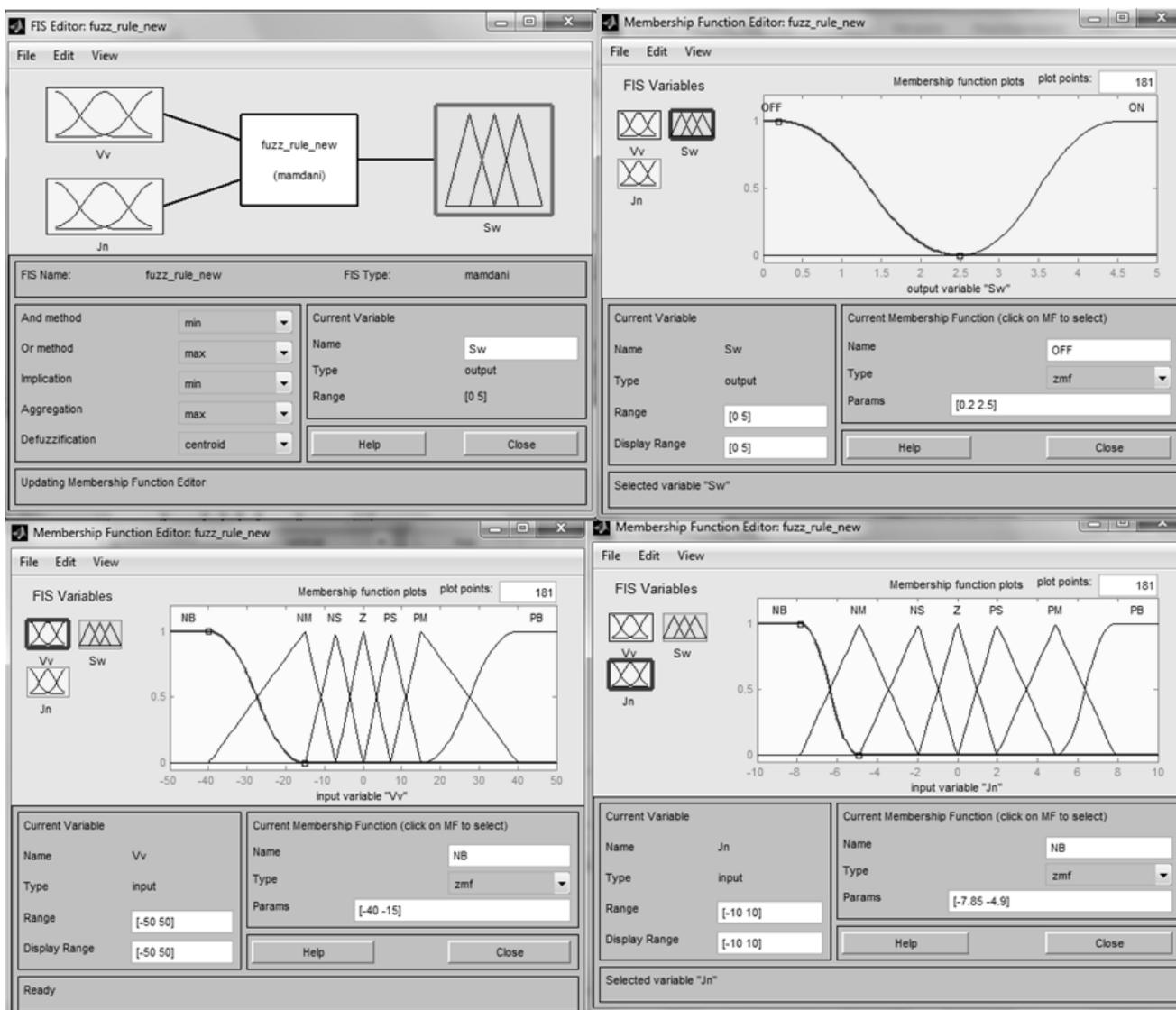


Рис. 5. Фрагмент интерфейса пакета расширения *Fuzzy Logic Toolbox* в среде *MATLAB*, задающего параметры ФП входных и выходной лингвистических переменных, системы нечеткого вывода и ее структуру для НК в модели системы ИПП РП

Для лингвистического описания входных переменных V_j и J_n выбраны по семь термов (*NB (negative big), NM (negative middle), NS (negative small), Z (zero), PS (positive small), PM (positive middle), PB (positive big)*), приведенных на рис.3а). Причем термы NB являются z -образными, PB s -образными, а остальные треугольными. Выходная ЛП (Sw) представлена двумя термами (*OFF, ON*), показанными на рис. 4.

Правила нечеткого вывода формируются по типу «Если (if) ..., то (then) ...» [8,9]. Фрагмент реализованных в нечеткой модели правил представлен в редакторе *Rule Editor* на рис.6.

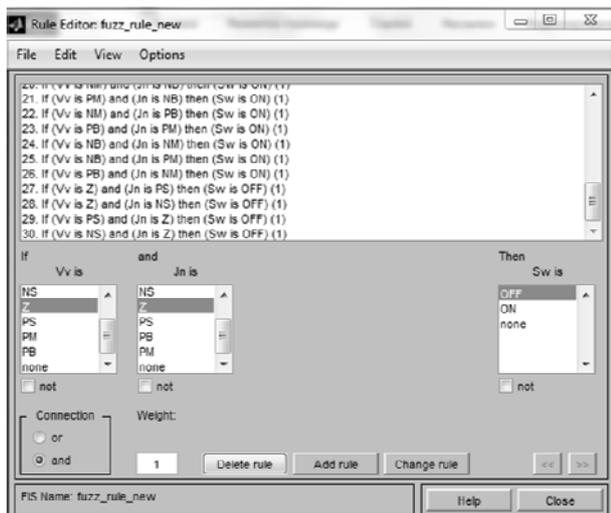


Рис. 6. Фрагмент правил вывода, реализованных в нечеткой модели и представленных в редакторе *Rule Editor* пакета расширения *Fuzzy Logic Toolbox*

В модели, как видно из рис. 5, используется схема нечеткого вывода Мамдани, в качестве метода агрегирования применяется операция \min -конъюнкции [8], а

методом активации является \min , который рассчитывается по формуле

$$\mu'(y) = \min\{c_j, \mu(y)\},$$

где $\mu(y)$ – функция принадлежности терма, который является значением некоторой выходной переменной ω_j , заданной на универсуме Y ; c_j – значение степени истинности подзаключений для j -го правила, входящего в рассматриваемую базу правил нечеткого вывода.

Аккумуляция заключений правил производится по методу \max – дизъюнкции, а дефазификация – методом центра площади *COA (Centre of Area)*. При этом центру площади *COA* соответствует абсцисса, делящая площадь, ограниченную графиком кривой ФП переменной Sw , на две равные части, то есть центр площади равен $y=u$, а значение u определяется из уравнения:

$$\int_{Min}^u \mu(x) \cdot dx = \int_u^{Max} \mu(x) \cdot dx,$$

где u – результат дефазификации; x – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной ω ; $\mu(x)$ – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной ω после этапа аккумуляции; *Min, Max* – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества выходной переменной ω .

После выполнения всех интерактивных операций с *FIS* редактором, проведем анализ и отладку данной системы нечеткого вывода при решении задачи управления системой ИПП РП для трех различных вариантов входных данных. С этой целью используем *Rule Viewer* и редактор *MFE*, окна которых показаны на рис. 7.

В окне *Input* введем вектор значений входных переменных V_j, J_n . Эти значения отображены также в верхней части окна обозревателя правил.

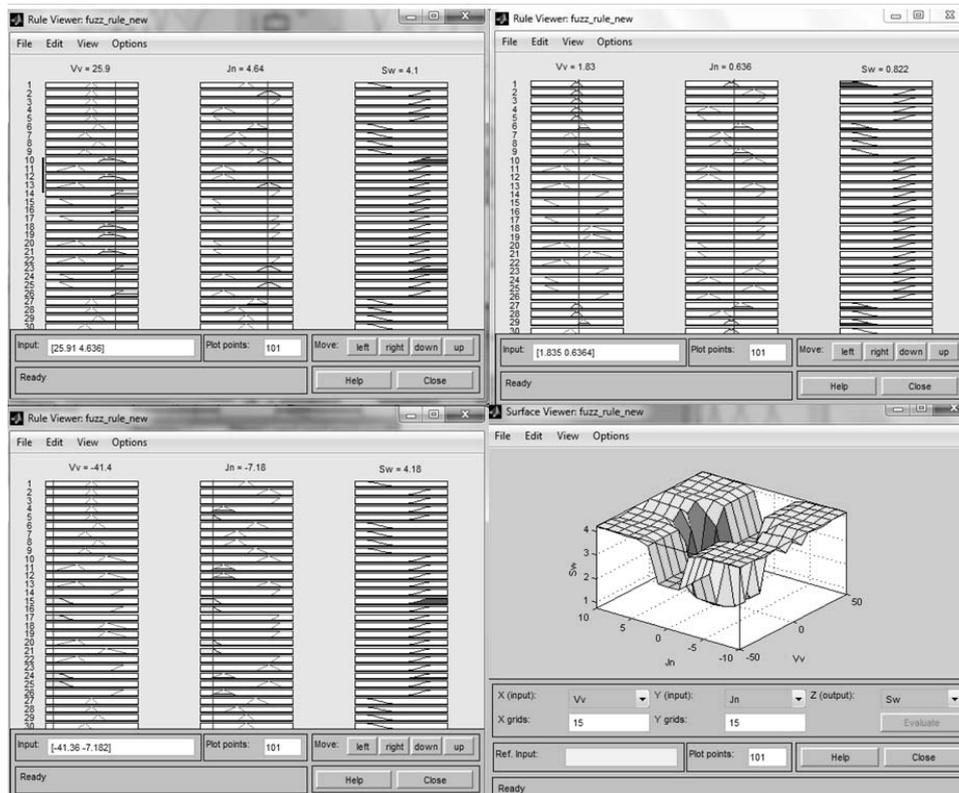


Рис. 7. Вид рабочего интерфейса программы *Fuzzy Logic Toolbox* в режиме отладки проекта «Автоматическая система предотвращения аварий»

Там же, кроме входных данных, таких же, как в окне *Input*, приведены и значения выходных данных НК. Кроме того, общий анализ нечеткой модели можно выполнить с помощью графического окна просмотра трехмерной поверхности нечеткого вывода (окна «*Surface*» на рис. 7). Данная поверхность характеризует зависимость значений выходной переменной от значений отдельных входных переменных нечеткой модели. Отсутствие разрывов на поверхностях нечеткого

вывода говорит об устойчивом характере данной нечеткой модели, что является одним из аргументов в пользу реализации этой модели на практике [8].

Модель НК после отладки была экспортирована в рабочую область *MATLAB* и использовалась для имитационного моделирования системы изменения полосы пропускания РП в среде *Simulink*. Имитационная модель и результаты моделирования представлены на рис. 8-10.

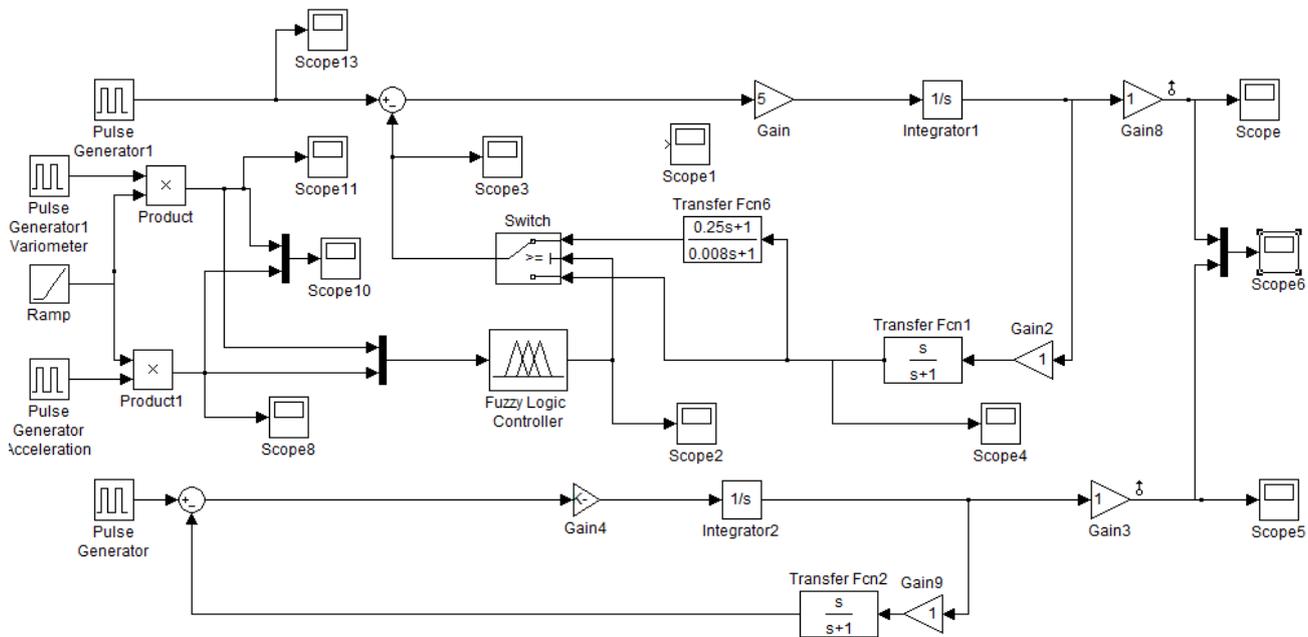


Рис. 8. Имитационная модель обычного рулевого привода (внизу) и с изменяемой нечетким контроллером полосой пропускания (в верхней части схемы)

Имитационная модель (рис. 8) состоит из следующих динамических звеньев и вспомогательных элементов: блоков *Transfer Fcn 1,2* [15], представляющих собой динамические звенья в цепи обратной связи (изодромы), *Transfer Fcn 6* - реальное форсирующее звено, интеграторов *integrator 1,2*, блоков усиления *Gain, Gain1-4, Gain8-9*, осциллографов *Scope*, коммутатора *Switch*, нечеткого контроллера *Fuzzy Logic Controller*, а также перемножителей *Product, Product 1*, четырех генераторов импульсов *Pulse Generator* и источника линейно нарастающего напряжения *Ramp*. Генераторы *Pulse Generator* и *Pulse Generator1* формируют единичные импульсы на входах рулевых приводов с периодом 3с. и длительностью 0.06 с. (скважность 50). Генератор *Pulse Generator1 Variometer* создает последовательность единичных импульсов с периодом 3с. и шириной, равной 40% от их периода, а генератор *Pulse Generator1 Acceleration* - таких же импульсов, но только шириной 30% от их периода. Эти генераторы используются для демонстрации функционирования системы изменения полосы пропускания РП. При этом *Pulse Generator1 Variometer* совместно с источником линейно нарастающего напряжения *Ramp* выполняет роль имитатора линейно нарастающего значения вертикальной скорости полета, а *Pulse Generator1 Acceleration* и *Ramp* -

роль имитатора линейно нарастающего значения ускорения ЛА.

На рис. 9 представлены результаты имитационного моделирования системы изменения полосы пропускания РП в условиях воздействия таких импульсных сигналов. При этом рассматривались конкретные гипотетические значения характеристик элементов системы и считалось, что параметры элементов рулевых приводов равны: $k=50$, $T=1$ с, $T_2=0.25$ с, а эквивалентные параметры k_f , T_3 принимают при этом следующие значения: $k_f=0.98$, $T_3=0.265$ [8].

На этом же рис. показаны осциллограммы процессов в различных точках модели. Внизу рис. 9, на первой слева осциллограмме показаны сигналы, поступающие на входы как традиционного РП без ИПП (схема внизу рис. 9), так и РП с ИПП (схема вверху рис. 9). На второй осциллограмме показаны сигналы, поступающие на вход НК, на третьей - сигналы на выходе НК, которые поступают на управление коммутатором. На четвертой осциллограмме изображена реакция традиционного РП на входной сигнал. Реакция РП с нечетким контроллером, изменяющим полосу пропускания привода, на входной сигнал в условиях турбулентности представлена на осциллограмме в верхней правой части рис. 9.

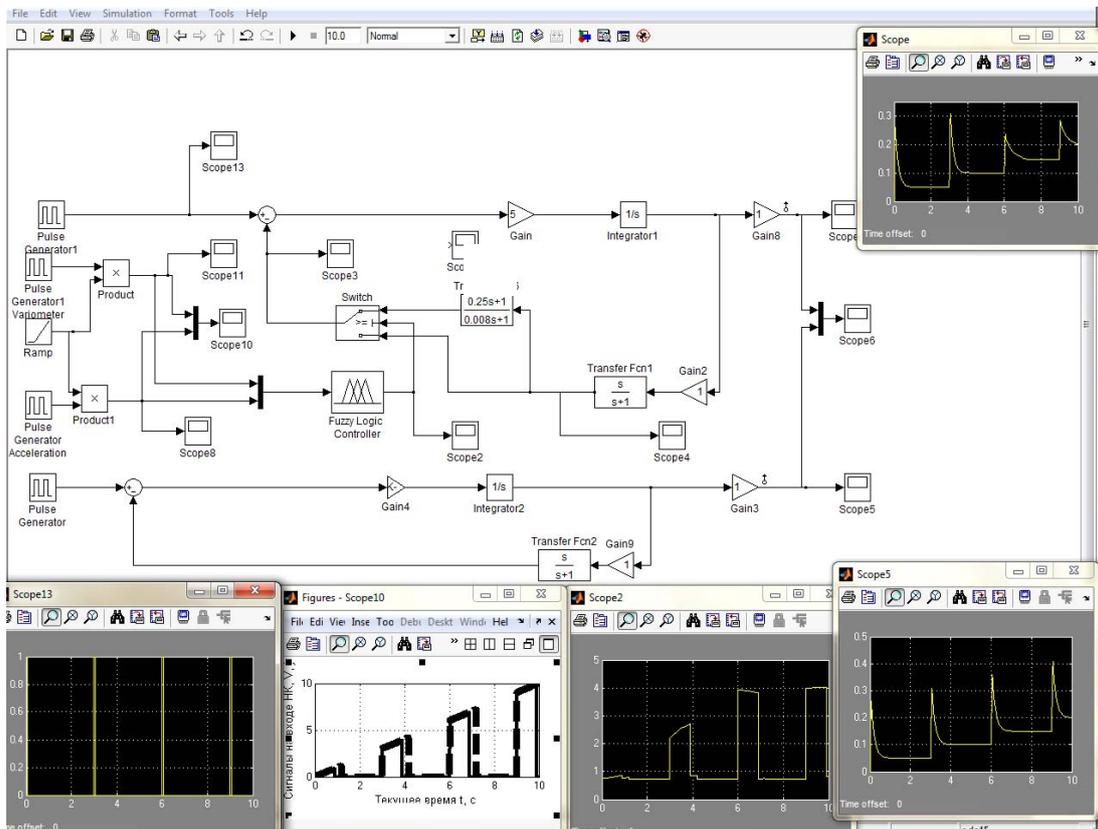
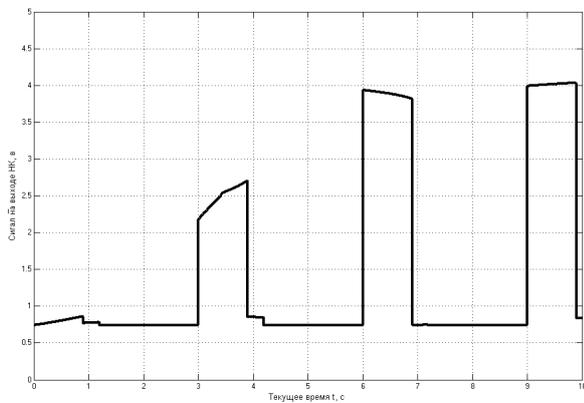
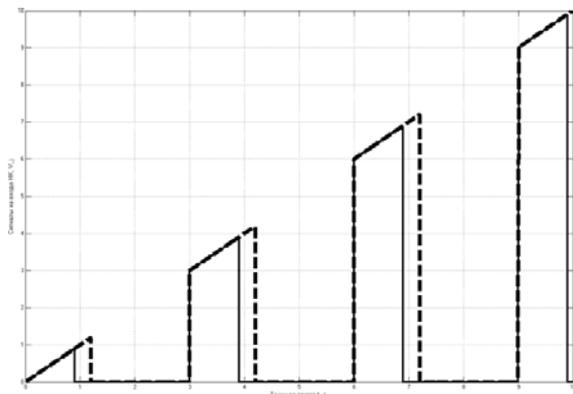


Рис. 9. Имитационное моделирование рулевого привода с изменяемой нечетким контроллером полосой пропускания и осциллограммы в различных точках привода

В более крупном масштабе некоторые из этих сигналов показаны на рис. 10, 11.



а)



б)

Рис. 10. Сигналы на входе (а) и выходе (б) нечеткого контроллера системы ИПП рулевого привода

На рис. 10 а) сплошной линией показан сигнал, поступающий от вариометра, а пунктирной – от датчика ускорений, причем их амплитуда линейно нарастает с коэффициентом наклона, равным 1.

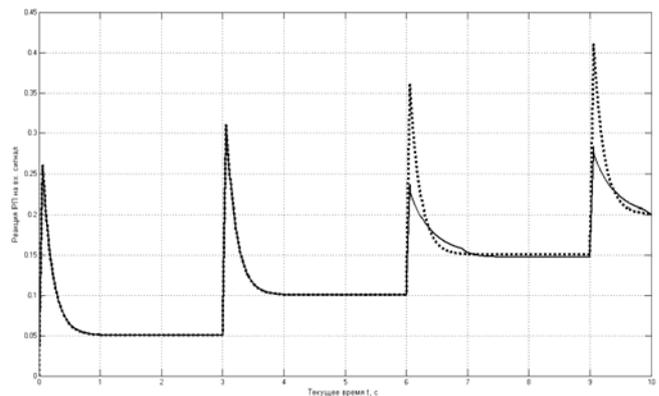


Рис. 11. Сигналы, характеризующие реакцию рулевого привода в стандартном исполнении (пунктирная линия) и с НК, изменяющим полосу пропускания привода (сплошная линия)

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 10 и 11 показывает, что при нарастании параметров, характеризующих турбулентность (вертикальной скорости, ускорения ЛА, вызванных болтанкой), нечеткий контроллер формирует сигнал (на 6 с. на рис. 10-11) на включение коммутатора, подключающего форсирующее звено последовательно к издромному звену в цепи обратной связи РП (рис. 2). При этом уменьшается полоса пропускания РП и, как следствие этого, привод обрабатывает входной сигнал (входное возмущение) не полностью. Например, для принятых в модели (рис. 9)

параметров издромного и форсирующего звеньев, в соответствии с [1] полоса пропускания РП уменьшается в 12 раз, что вызывает, как видно из рис. 11, снижение амплитуды реакции привода на турбулентные возмущения в 1.93 раза. При этом эквивалентная постоянная времени привода возрастает только на 0.015 с.

Таким образом, использование предлагаемой системы автоматического изменения полосы пропускания РП позволит ослабить реакцию ЛА на турбулентные возмущения. Это снизит вероятность возникновения резонансных явлений, когда могут совпасть направления воздействия пилота на органы управления ЛА и турбулентной среды на ЛА, за счет уменьшения как амплитуды реакции РП, так и увеличения ее инерционности.

Для разработки конкретных рекомендаций по требуемой величине снижения полосы пропускания РП необходимо проведение исследований по определению статистических характеристик реакции РП на случайные возмущающие воздействия, характеризующие турбулентность в различных слоях атмосферы. Однако, эти вопросы выходят за рамки настоящей работы.

Таким образом, на основе исследований, выполненных в работе, можно сделать следующие выводы:

- разработанные модели (нечеткая и имитационная) адекватно реагирует на изменения условий полета в турбулентной атмосфере;

- результаты, полученные при отладке НК и на имитационных моделях рулевого привода, совпадают.

При этом программа, описывающая процесс функционирования системы в кодах программ *Fuzzy Logic Toolbox*, после преобразования в нотации языка FCL в соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 61131-7-2017 может использоваться в ряде внешних программах как процедура, формальными параметрами которой являются входные переменные блока правил, а возвращаемыми значениями – дефазифицированные значения выходных переменных. Порядок организации вызова таких процедур во внешних программах рассмотрен в [8].

Представленная модель автоматической системы изменения полосы пропускания РП является открытой и может быть расширена за счет введения новых переменных, и правил вывода, а также уточнена путем изменения диапазонов значений ФП и редактирования правил нечеткого вывода.

Нечеткий контроллер для этой системы может быть реализован на базе зарубежных нечетких процессоров, например, типа SAE81 C99, широко применяемых в современных системах интеллектуального управления [8] или отечественных контроллеров типа *TREI-5B-04*. Например, процессор фирма Siemens SAE81C99 может обрабатывать 256 входных переменных, формировать до 64 выходных значений по 16384 правилам с высокой скоростью ($10 \cdot 10^6$ правил в секунду)[18].

Заключение

В статье рассмотрен возможный подход к построению алгоритмов функционирования системы автоматического изменения полосы пропускания рулевого привода, основанный на представлении параметров воздействия турбулентности на ЛА в лингвистической

форме и реализации управляющих решений с использованием методов нечеткой логики.

Результаты работы алгоритмов нечеткого вывода, реализованных в нечетком контроллере в среде расширения *Fuzzy Logic Toolbox*, иллюстрируются на конкретных гипотетических примерах с использованием имитационных моделей рулевого привода, построенных в среде *Simulink* программы *MATLAB*.

С использованием предложенного подхода может быть разработана автоматическая система изменения полосы пропускания рулевого привода, обеспечивающая повышение безопасности и устойчивости полетов ЛА в условиях турбулентности атмосферы, реализованная на базе отечественных, программируемых на языке FCL, логических контроллеров, например на базе контроллера *TREI-5B-04*.

Литература

1. Замыслов М.А., Мальцев А.М., Михайленко С.Б., Штанькова Н.В., Дедяев А.А. Повышение безопасности полетов летательных аппаратов в турбулентной атмосфере за счет применения рулевого привода с изменяемой полосой пропускания//ВИНИТИ. Проблемы безопасности полетов.- 2019.- № 2.- С. 11-22.
2. Новости авиации. Авиакатастрофы Ту-154. [Электрон. ресурс].-2018.-URL: <http://www.aero-news.ru/katastrofa-tu-154/> (дата обращения: 18.11. 2018).
3. Пассажиры самолета Qantas пострадали из-за турбулентности. [Электрон. ресурс].-2018.-URL: https://forbes.kz/news/2017/04/13/newsid_141161 (дата обращения: 18.11. 2018).
4. Десятки пассажиров пострадали из-за мощной турбулентности [Электрон. ресурс].-2018.-URL: https://travel.rambler.ru/news/41844063-desyatki-passazhirov-postradali-iz-za-turbulentnosti/?utm_source=head&utm_campaign=self_promo&utm_medium=news&utm_content=news (дата обращения:11.03.19).
5. Влияние метеорологических условий на авиакатастрофы. [Электрон. ресурс].-2018.-URL: <http://www.aero-news.ru/katastrofa-tu-154/> (дата обращения: 18.11. 2018).
6. Справочник летчика и штурмана. Под ред. засл. воен. штурмана СССР генерал-лейтенанта авиации М.В. Лавского. -М.: Воениздат, 1974.- С.33-36, 512 с., ил.
7. Красовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И. Системы автоматического управления летательных аппаратов.- М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986.- С.249, 477 с., ил.
8. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH . – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.-736 с, ил.
9. Агеев А.М., Замыслов М.А., Мальцев А.М., Мальцев М.А., Михайленко С.Б. Система автоматизированного распознавания летных ситуаций, опасных для пилотирования ЛА, на основе нечеткой логики. //ВИНИТИ. Транспорт: наука, техника, управление.- 2017.- № 10. –С. 34-40.
10. Оболенский Ю.Г. Управление полетом маневренных самолетов. М.: филиал Воениздат, 2007, с. 480, 154 с, ил.

11. Кривицкий Б.Х. Автоматические системы радиотехнических устройств. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962, 664 с, 302 с, ил.
12. Основы автоматического управления. Под ред. В.С. Пугачева. М.: Наука, 1974, с. 720, 226 с, ил.
13. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. SystemsManCybernet. 1985. Vol. 15. No. 116. P. 116–132.
14. Mamdani E.H. Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant // Proc. IEEE. 1974. V. 121. № 12.
15. В.П.Дьяконов. MATLAB7*/R2006/R2007: Самоучитель.-М.:ДМК Пресс, 2008.
16. Замыслов М.А., Мальцев А.М., Мальцев М.А., Михайленко С.Б. Автомат продольного управления летательного аппарата с адаптивным регулированием коэффициентов передачи методами нечеткой логики // ВИНТИ. Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 6. С. 10–19.
17. Замыслов М.А., Мальцев А.М., Мальцев М.А., Михайленко С.Б. , Штанькова Н.В. Система автоматического спасения экипажа пилотируемого летательного аппарата в катастрофических ситуациях на основе нечеткой логики//Проблемы безопасности полетов. ВИНТИ РАН.- 2018.- №11. –С. 34-63.
18. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления: учебное пособие.- М.6 Радиотехника, 2009. -392 с., ил.

Сведения об авторах:

Замыслов Михаил Александрович, старший научный сотрудник.

Телефон 8 950 762 2234;
e-mail: mzam48@mail.ru.

Мальцев Александр Михайлович, старший научный сотрудник..

Телефон 8 906 589 3616;
e-mail: aleksamalcev@yandex.ru.

Михайленко Сергей Борисович, ведущий научный сотрудник.

Телефон 8 904 211 2437;
e-mail: mikhserbor@yandex.ru.

Тарасов Сергей Васильевич, младший научный сотрудник.

Телефон 8 904 211 2437;
e-mail: tarasov772@mail.ru.

Штанькова Надежда Викторовна, младший научный сотрудник.

Телефон 8 903 8561228;
e-mail: nadia_shtankova@mail.ru.

Место работы всех авторов: ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина.

Адрес организации: 394064, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, д. 54