Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems, Vol. XXXVIII, No.6, 2018
www.icp.az/2018/6-02.pdf

УДК 004.89

И.М. ИСМАИЛОВ, М.М. ИСАЕВ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ СУДНОМ

Рассмотрены вопросы создания интеллектуальных систем управления в условиях динамически изменяющейся полётной обстановки и предложен принцип построения бортовой интеллектуальной системы управления полетом. Приведена модель нечёткой экспертной системы в форме нечётких продукций и лингвистических переменных и реализация модуля экспертной системы на примере нечеткого регулятора, обеспечивающего управление продольным движением самолета.

Ключевые слова: системы управления самолетом, интеллектуальные системы управления, системы искусственного интеллекта, экспертные системы, нечеткая логика

1. Введение. По результатам анализа существующих методов управления определенным объектом (например, воздушным судном) или системой можно заключить, что для достижения цели управления необходимо принужденное воздействие на систему, которая является частью среды. Это воздействие призвано скорректировать естественное движение системы, определяемое начальными условиями, исходным состоянием и обменными процессами в системе и со средой.

Разрабатываемые сегодня технологии интеллектуального управления обеспечивают функционирование информационных систем при ограниченных у них ресурсах, без коррекции со стороны того или иного внешнего органа управления, при непредсказуемых динамических ситуациях относительно внешней среды, когда системе приходится принимать решения на основе анализа всей доставленной информации об окружающей обстановке. Интеллектуальное управление поддерживает функции по оценке текущего и прогнозируемого состояния системы и окружающей среды, по выбору способа действий, формированию и реализации целей управления, критерий оптимизации, способов управления и др. Это положение характерно для авиационных систем, где задачи получения интерпретируемой информации о наблюдаемой ситуации, а также оценка намерений участников полёта, являются едва ли не самыми главными, непосредственно влияющими на безопасность полётов.

При создании интеллектуальной системы управления, в ней знания о неизвестных характеристиках объекта управления и окружающей среды формируются в процессе обучения и адаптации, а полученная при этом информация используется в процессе автоматического принятия решений так, что качество управления улучшается.

Применительно к авиационным системам одним из факторов интеллектуализации решения целевых задач экипажем летательным аппаратом (ЛА) является совершенствование информационного обеспечения деятельности экипажа, так как это обстоятельство приобретает важное значение при оценке сложившихся ситуаций и принятия решений в полете. Исходя из того, что в настоящее время в условиях развития авиационной техники и постоянно растущего объема информации, которую необходимо обрабатывать в полете, это направление представляет особый интерес.

2. Постановка вопроса. Опыт авиационных катастроф показывает, что большое количество ошибок пилотирования связано, прежде всего, с ситуационной неопределённостью, когда пилот не понимает, какие действия выполняют бортовые системы автоматики. В этом случае на помощь пилоту приходят интеллектуальные системы, в которых больше употребляется термин «бортовой интеллект» [1]. Бортовой интеллект включает в себя совокупность знаний, используемых в полёте с целью выполнения полётного задания;

математическое, информационное и программное обеспечение бортовой ЭВМ; модель деятельности экипажа в различных (штатных и нештатных) ситуациях. Таким образом, активное внедрение бортовых интеллектуальных систем способствует уменьшению ситуационной неопределённости в условиях динамически изменяющейся полётной обстановки. Кроме того, в интеллектуальных системах управления (ИСУ) логическая (смысловая) обработка информации превалирует над вычислительной, что целесообразно, например, при анализе ситуаций и принятии решений [2].

В процессе управления воздушным судном (ВС) экипаж выполняет различные функции, которые заключаются в оперативном обнаружении и осознании возникшей проблемы, выявлении рациональных способов ее разрешения, реализации выбранного способа, контроле результатов своей деятельности. При этом отсутствие нужной информации и недостаток времени для ее анализа не являются причиной принятия пилотом определенного решения к определенному моменту времени. Причиной этому является то, что человек не обладает большой скоростью восприятия и переработки информации. Кроме того, он обладает малой пропускной способностью, ограниченной скоростью реакции, большой зависимостью функционирования от внешних условий и психофизиологического состояния, утомляемостью при напряженной и продолжительной работе.

3. Решение задачи. Для построения интеллектуальной системы управления полетом предлагается решение следующих задач:

- Разработка общей структуры бортовой интеллектуальной системы управления полетом
- Описание процессов на качественном уровне представления отдельных модулей интеллектуальной системы
- Разработка принципов построения экспертной системы интеллектуальной поддержки экипажа самолета
- Применение технологии нечеткой логики в структуре бортовой интеллектуальной системы управления

Рассмотрим структуру и функции отдельных модулей системы управления (рис.1), обладающей свойством интеллектуальности «в большом», т.е. обеспечивающий выбор и реализацию наилучшей стратегии управления полётом в условиях неопределённости [3]. Данная система организована и функционирует во взаимодействии с внешним миром. Кроме того, система использует информационные каналы связи и с целью повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения она принципиально открыта и имеет многоуровневую иерархическую структуру.

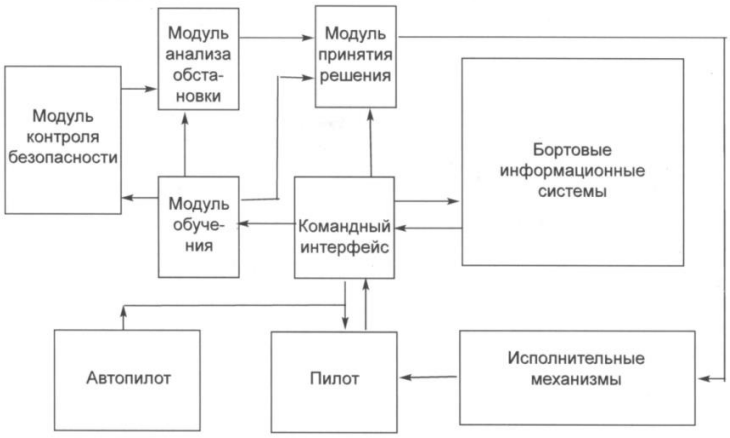

Рис.1. Структура бортовой интеллектуальной системы управления полетом

Основой *модуля анализа обстановки* (рис.2) является сенсорная информация, которая получается с датчиков ВС, и отображается системой контроля полетом. В результате анализа, проведенного с помощью данного модуля, выделяются существенные, с точки зрения принятия решений, ситуации. Далее на основании результатов прогноза оценивается сила опасности данной ситуации. Таким образом, с помощью модуля анализа обстановки уменьшается ситуационная неопределённость в условиях динамически изменяющейся полётной обстановки.

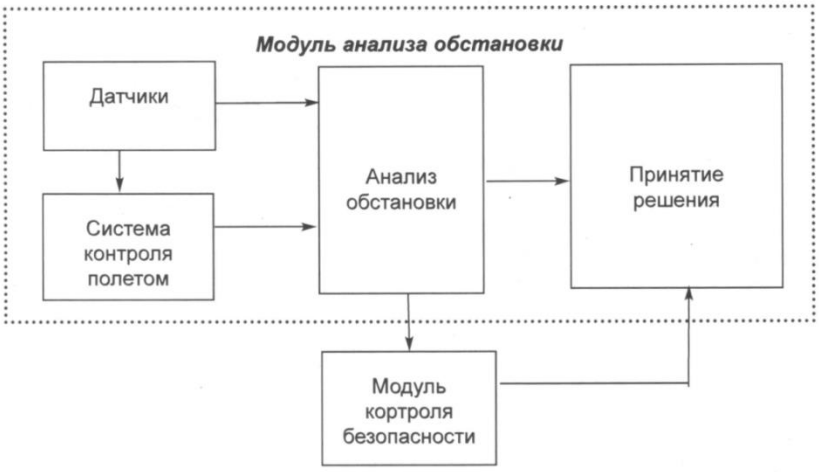

Рис.2. Модуль анализа обстановки бортовой интеллектуальной системы управления полетом

Модуль контроля безопасности прогнозирует развитие ситуаций, сложившихся на основании анализа обстановки (модуль анализа обстановки) и способствует упреждению принятия правильных решений до момента появления реальных угроз.

С помощью *модуля принятия решений* (рис.3) формируются рекомендации пилоту и управляющие воздействия. Рекомендации пилот получает через командный интерфейс и систему отображения пилотажной информации (СОИ), управляющие же воздействия подаются через автопилот непосредственно на исполнительные механизмы ВС с учётом характера развития ситуации.

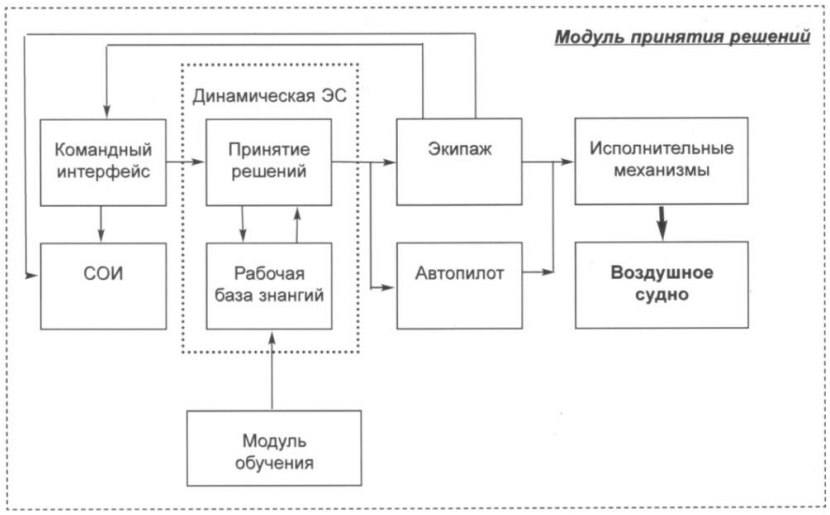

Рис.3. Модуль принятия решений интеллектуальной системы управления полетом

В интеллектуальных системах управления полетом возможны различные варианты управлений**.** Эти варианты содержатся в *рабочей базе знаний (БЗ)* и могут изменяться и уточняться по мере обновления текущей информации. В своем роде *модуль принятия решений* и *рабочая БЗ* образуют совместно динамическую экспертную систему (ДЭС), которая обеспечивает согласованную работу всех модулей бортовой ИСУ и формирование решений в реальном времени.

Используемые в модулях анализа обстановки и прогноза ситуаций базы знаний корректируются с помощью *модуля обучения***.** Этот модуль также реализует коррекцию начального заполнения БЗ. Взаимодействие пилота с ВС реализуется с помощью *командного интерфейса*, который с одной стороны сообщает пилоту о состоянии объекта управления и окружающей обстановке посредством бортовых информационных систем. Кроме того, этот интерфейс воздействует на ВС и его системы при помощи различных средств и органов управления.

Полученная информация о динамике ВС и техническом состоянии бортовых систем поступает в распоряжение пилота и автопилота. Одним из главных преимуществ человека является возможность совместить в своих действиях запрограммированность операций в реальном времени с выработкой решений при возникновении нестандартных ситуаций. С ростом автоматизации человек переходит на более высокий уровень управления. Однако, статистика авиационных инцидентов указывает на большое количество ошибок, совершаемых пилотами ВС. Основные причины возникновения ошибок у пилотов:

- Поступление неполной и неопределенной информации;
- Принятие решений в условиях жесткого лимита времени и в условиях действия факторов неопределенности;
- Недостатки оформления информационного поля кабины (панелей и приборов) и отсутствие механизма логического вывода;
- Сильные психоэмоциональные нагрузки и ограниченные психофизиологические возможности человека.

Исходя из вышеизложенного, возникает необходимость создания экспертной системы, способной предоставить необходимую помощь экипажу и взять на себя решение задач, связанных с определением целесообразной тактики действий в экстремальных ситуациях.

Применение экспертных систем интеллектуальной поддержки экипажа позволит:

- Внедрить в пилотажно-навигационный комплекс (ПНК) интеллектуальной составляющей, т.е. «виртуального эксперта», который будет аккумулировать опыт поведения реальных экспертов в области навигации и пилотирования ЛА в особых ситуациях;
- Своевременно и функционально диагностировать техническое состояние авиационной техники, техническим результатом которого будет повышение безопасности полета ЛА путем снижения уровня аварийной ситуации;
- Использовать системы высокой эффективности за счёт перебора большего числа альтернатив при выборе решения;
- Снизить психоэмоциональные нагрузки на экипаж при выполнении вычислений и рутинную работу.

Для управления ЛА как сложным динамическим объектом, совершающим полет в условиях неопределенности в качестве экспертной системы в последние годы широко применяется технология нечеткой логики, позволяющая описывать неточные категории, представления и знания, оперировать ими и делать соответствующие заключения и выводы, которые также характерны для авиационной техники. На рис. 4 показана обобщенная

структура алгоритма нечеткого логического вывода, основанного на логико-лингвистической модели.

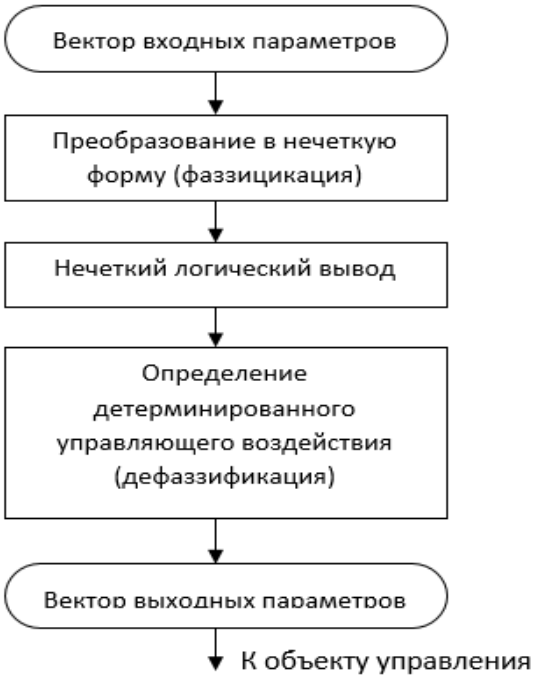

Рис.4. Структура нечетких вычислений при решении задач управления

Применение нечеткой логики обеспечивает принципиально новый подход к проектированию систем управления, позволяет решать широкий круг проблем, для которых характерны представление данных, целей и ограничений слишком сложными или плохо определенными и неподдающимися точному математическому описанию. С другой стороны, применение аппарата нечёткой логики для определения технического состояния объекта позволяет работать с существующей неопределенностью, неполнотой и нечёткостью информации [4]. Это связано с тем, что с каждым принимаемым решением связано некоторое множество возможных результатов с известными условными вероятностями. Поэтому использование аппарата нечёткой логики при разработке базы знаний и механизмов вывода экспертной системы позволяет формализовать процедуру оценки технического состояния на базе неточной информации и обоснованно принимать решения по идентификации неисправностей. Нечёткая экспертная система использует представление знаний в форме нечётких продукций и лингвистических переменных.

Последние годы показали возможности применения идей нечеткой логики для построения системы управления динамическим объектом, в том числе, таким как самолет с использованием нечеткого ПИД регулятора [5].

В работе приведена реализация одного из модулей экспертной системы с применением аппарата нечёткой логики в виде ПИД регулятора для идентификации неисправностей динамической системы (объекта) в условиях эксплуатации.

Процедура построения нечетких регуляторов, включает в себя два основных этапа [5]:

- синтез линейного многосвязного нечеткого регулятора, выступающего в качестве начального приближения (прототипа) синтезируемого регулятора;
- настройка нечеткого регулятора путем изменения состава базы правил.

Рассмотрим решение поставленной выше задачи на примере построения многосвязного нечеткого регулятора, обеспечивающего управление продольным движением самолета.

Структурная схема замкнутой системы управления полетом изображена на рис.5, где используются следующие обозначения: **V** и **H** − скорость и высота полета самолета соответственно; $\mathbf{V_{зад}}$ и $\mathbf{H_{зад}}$ − заданные значения скорости и высоты полета; Δ**V** и Δ**H** − ошибки управления по координатам **V** и **H;** Δυ и Δδт − команды на изменение угла тангажа и тяги двигателя.

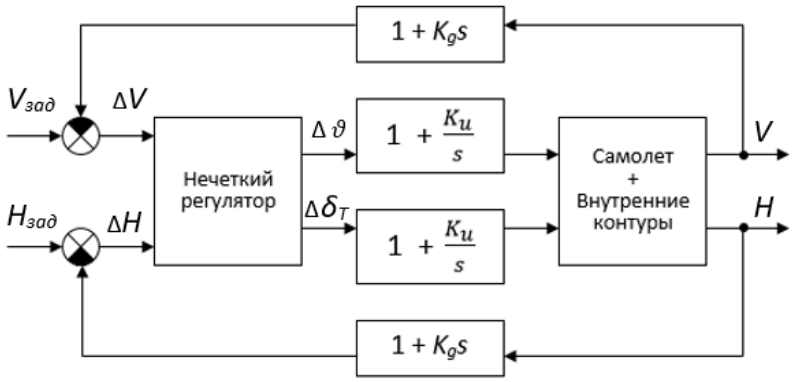

Рис.5. Структурная схема замкнутой системы управления полетом

Предполагается, что данная система управления содержит внутренние и внешние контуры управления. Во внутренних контурах управления САУ используются классические регуляторы, синтезированные для известной точной математической модели движения самолета. В состав внутренних контуров управления входят: регулятор тангажа, обеспечивающий управление длиннопериодическим движением самолета за счет отклонения руля высоты, и регулятор тяги, поддерживающий заданное значение тяги двигателя путем изменения расхода топлива в камеру сгорания.

Для обеспечения необходимого качества переходных процессов в замкнутой САУ и устранения статических ошибок по координатам **V** и **H** необходимо ввести во внешние контуры управления дополнительные дифференцирующие и интегрирующие звенья. Коэффициенты усиления этих звеньев приняты равными K_g=5 и $K_и$=0,1 соответственно.

На этапе синтеза линейного нечеткого регулятора требуется построить две базы правил − для формирования команды на изменение угла тангажа Δυ и формирования требуемого значения тяги двигателя) Δδт, в зависимости от текущих значений ошибок управления по высоте **(ΔH)** и скорости **(ΔV)** полета. Будем полагать, что каждая их двух входных переменных регулятора (ΔH) и (ΔV)рассматривается как лингвистическая переменная, принимающая 7 возможных значений (термов):

NB− большая отрицательная (NegativeBig);
NM− средняя отрицательная (NegativeMiddle);
NS− малая отрицательная (NegativeSmall);
ZE−около нуля (Zero);
PS−малая положительная (PositiveSmall);
PM−средняя положительная (PositiveMiddle);
PB−большая положительная (PositiveBig).

Соответствующие графики функций принадлежности приведены на рис.6.

Заметим, что при выборе функций принадлежности (рис.6а) использовалась операция масштабирования переменных ΔVи ΔH, т.е. перевод допустимых значений ΔVи ΔH в интервал [-1,1]. При этом ошибка управления по высоте, равная 50 м, считается «большой» (PB).

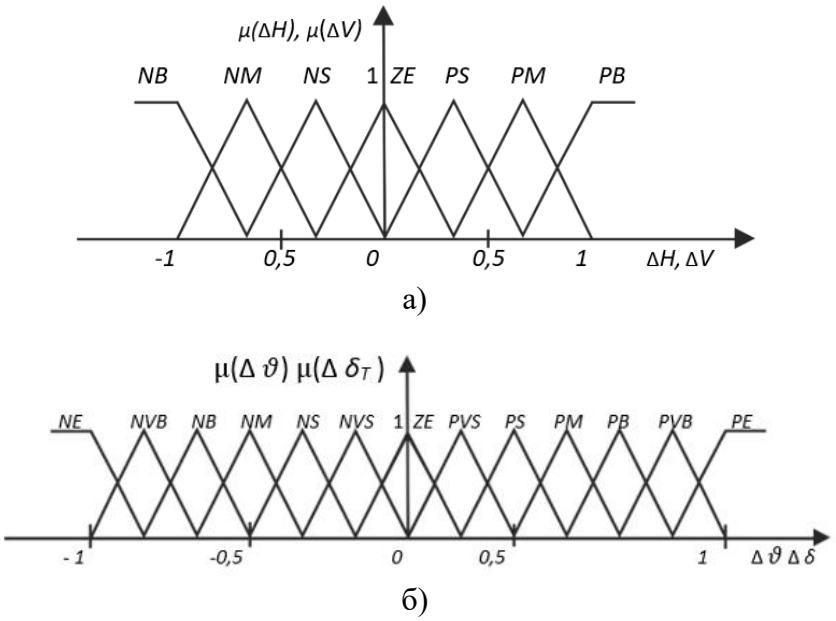

Рис.6. Функции принадлежности входов/выходов нечеткого регулятора: а − для ошибок по высоте и скорости полета; б − для управляющих воздействий.

При масштабировании переменных $\Delta\vartheta$ и$\Delta\delta_T$ также осуществлялось приведение их к интервалу [-1,1], с учетом минимальных и максимальных допустимых изменений этих переменных по отношению к некоторым их средним значениям. Число правил выбирается здесь достаточно большим для того, чтобы получить приемлемое «разрешение» по выходным переменным для последующей настройки этих правил.

Состав полной базы правил для определения требуемого значения угла тангажа, как функции ошибок по высоте и скорости полета приведен в табл.1. Из этой таблицы видно, например, что если ошибка по высоте ΔH = ZEи ошибка по скорости ΔV= PM, (т.е. самолет летит слишком медленно), то требуемое значение угла тангажа должно быть $\Delta\vartheta$ = NS(т.е. нос самолета следует слегка опустить).

Таблица 1

База правил 1 (по углу тангажа)

ΔV / ΔH	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	NVS	NS	NM	NB	NVB	NE
NM	PVS	ZE	NVS	NS	NM	NB	NVB
NS	PS	PVS	ZE	NVS	NS	NM	NB
ZE	PM	PS	PVS	ZE	NVS	NS	NM
PS	PB	PM	PS	PVS	ZE	NVS	NS
PM	PVB	PB	PM	PS	PVS	ZE	NVS
PB	PE	PVB	PB	PM	PS	PVS	ZE

Расшифровка перечисленных в таблице 1 значений лингвистических переменных:

NVS − очень малая отрицательная (NegativeVerySmall);
NVB − очень большая отрицательная (NegativeVeryBig);
NE − экстремальная отрицательная (NegativeExtreme);
PVS − очень малая положительная (PositiveVerySmall);
PVB − очень большая положительная (PositiveVeryBig);
PE − экстремальная положительная (PositiveExtreme).

Аналогично, полная база правил для определения требуемого значения тяги двигателя как функции ΔV и ΔH имеет вид, приведенный в табл.2. Согласно этой таблице, если ошибка по высоте ΔH =ZE и ошибка по скорости ΔV = PS, то требуемое значение тяги должно быть $\Delta\delta_T$ = PS (т.е тягу следует увеличить).

Таблица 2

База правил 1 (по тяге двигателя)

ΔH \ ΔV	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NE	NVB	NB	NM	NS	NVS	ZE
NM	NVS	NB	NM	NS	NVS	ZE	PVS
NS	NB	NM	NS	NVS	ZE	PVS	PS
ZE	NM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PM
PS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PM	PB
PM	NVS	ZE	PVS	PS	PM	PB	PVB
PB	ZE	PVS	PS	PM	PB	PVB	PE

Нечёткая экспертная система использует представление знаний в форме нечётких продукций и лингвистических переменных. Проектирование модели экспертной системы производилось по алгоритму нечёткого логического вывода Мамдани в пакете FuzzyLogicToolbox вычислительной среды MATLAB. Результаты моделирования экспертной системы приведены ниже:

В качестве входных сигналов для системы нечеткого вывода используют сигнал ошибки, приращение ошибки, квадрат ошибки и интеграл от ошибки. В нашем случае **ΔV** и **ΔH** − ошибки управления по координатам **V** и **H**.

В пакете Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB в качестве нечеткой системы выбрана система типа Мамдани и создана двухмерная модель управления самолетом (рис.7) Для описания входных переменных V и H выберем 3 треугольника (N, Z, P), для описания выходных переменных (**Δυ**и **$\Delta\delta_T$**) Out выберем 7 треугольников (NL, NM, N, Z, P, PM, PL). В этом же окне зададим диапазоны изменения переменных: V – [-1, 1]; H – [-1 1]; Out – [0 2].

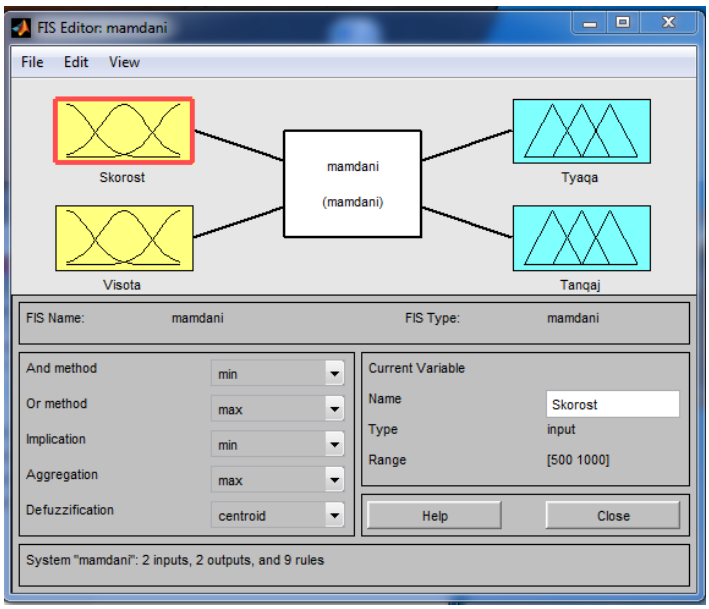

Рис.7. Двухмерная модель управления самолетом в нечеткой системе типа Мамдани

На рис.8 и 9 представлены функции принадлежности для входных переменных (скорость и высота) соответственно.

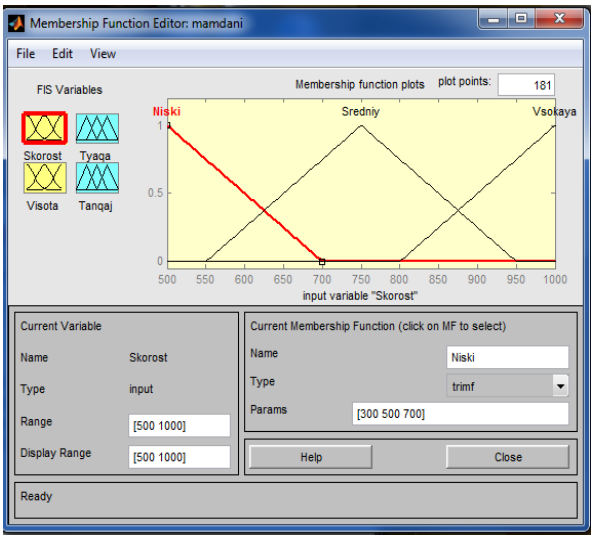

Рис.8. Функция принадлежности для входной переменной-скорости

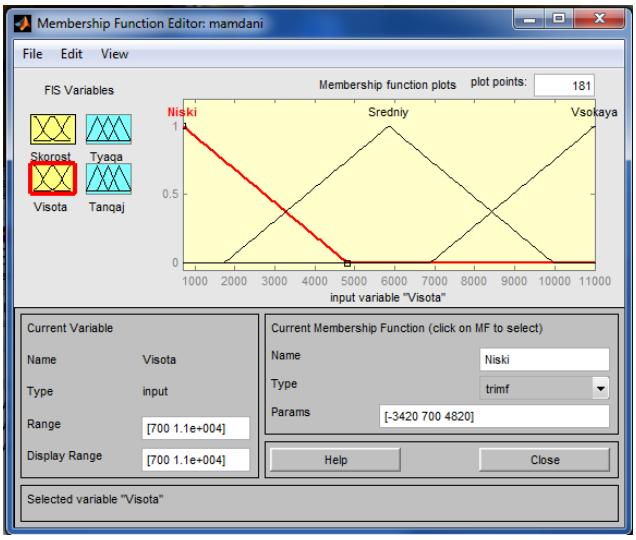

Рис.9. Функция принадлежности для входной переменной-высоты

На рис.10 и 11 представлены функции принадлежности для выходных переменных (тяга и тангаж) соответственно.

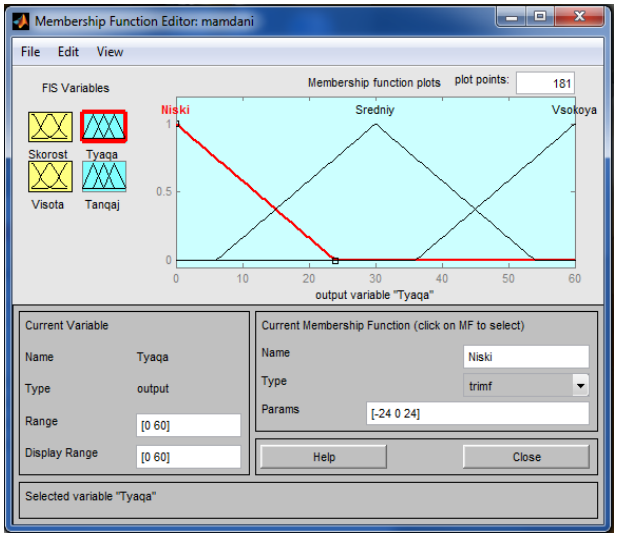

Рис.10. Функция принадлежности для выходной переменной-тяги

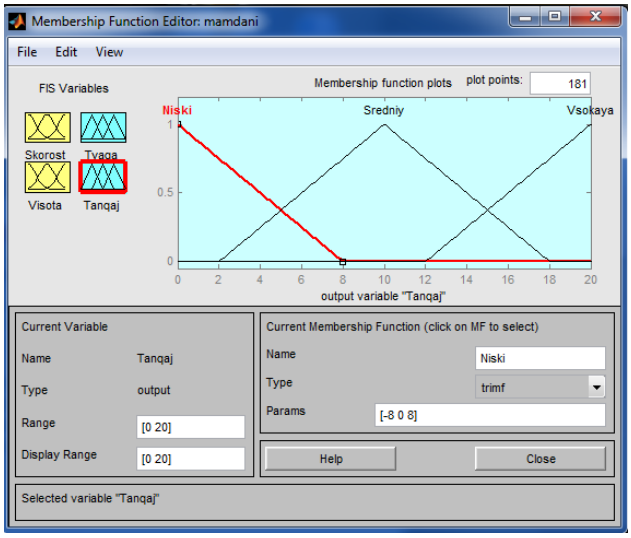

Рис.11. Функция принадлежности для выходной переменной-тангажа

Для различных ситуаций создаются правила задания режима работы (рис.12)

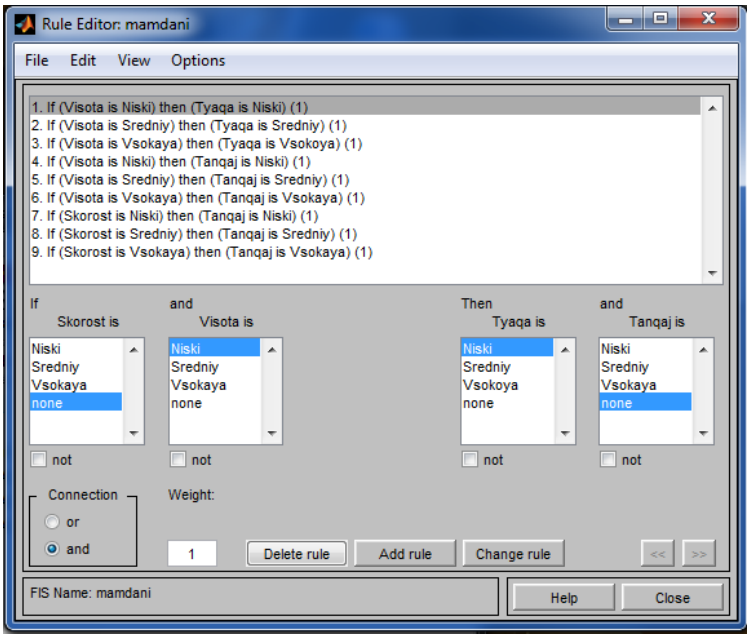

Рис.12. Правила задания режима работы для различных ситуаций

Эти правила можно представить графически (рис.13):

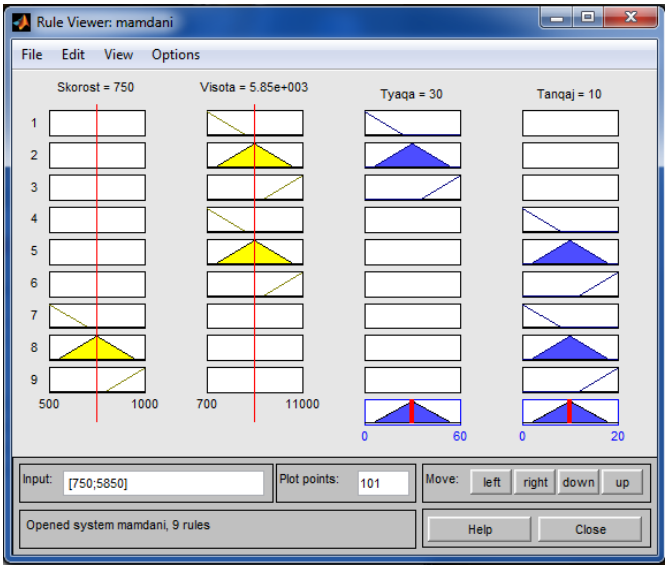

Рис.13. Графическое представление правил режима работы

Построим графики зависимости команды на изменение угла тангажа и тяги двигателя − $\Delta\upsilon$ и $\Delta\delta_T$, а также ошибки управления по координатам **V** и **H**-Δ**V** и Δ**H** (рис.14):

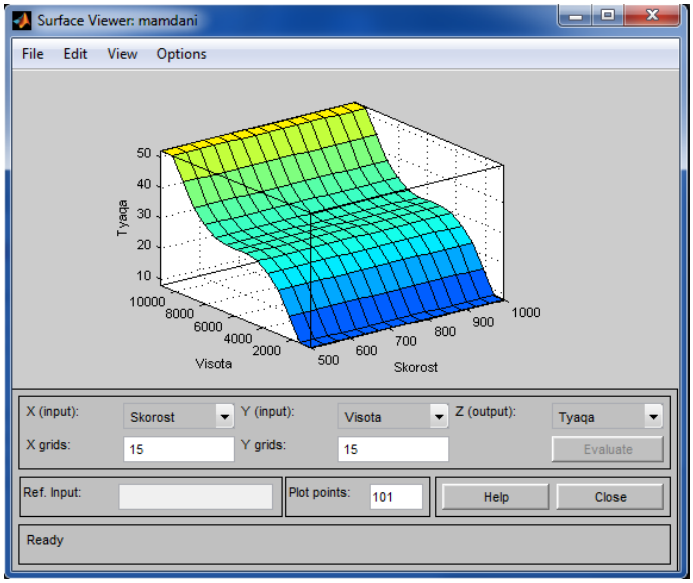

Рис.14. Графики зависимости команды на изменение угла тангажа и тяги двигателя

4. Заключение. Обосновано активное внедрение бортовых интеллектуальных систем, способствующих уменьшению ситуационной неопределённости в условиях динамически изменяющейся полётной обстановки и, предложена структура бортовой интеллектуальной системы управления полетом в модульном исполнении. Приведены принципы построения нечёткой экспертной системы, в которой используется представление знаний в форме нечётких продукций и лингвистических переменных. Проектирование модели экспертной системы производилось по алгоритму нечёткого логического вывода Мамдани в пакете Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB. Показана реализация модуля экспертной системы на примере нечеткого регулятора, обеспечивающего управление продольным движением транспортного самолета.

Литература

1. Нейрокомпьютеры в авиации (самолеты) / Под ред. В.И. Васильева, Б.Г. Ильясова, С.Т. Кусимова. Кн.14: учеб.пособие для вузов. − М.: Радиотехника, 2003, 496 с.
2. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем: учеб. пособие. − М.: Финансы и статистика, ИНФРА, 2010, 432 с.
3. Кирилкин В.С, Цыбова Е.А. Интеллектуальные системы как инструмент ценностно ориентированного метода управления воздушным судном. «Менеджмент в России и за рубежом». №1, 2012, с.101-106.
4. Апостолюк В.А., Басанец О.П., Кривенко Е.И. Исследование нечеткой системы управления продольным движением самолета. Proc. of VI Int. Conf. on Gyro Technology, Navigation, and Motion Control. Kiev, 2007, vol. 2, pp.7-14.
5. Исмаилов И.М., Гусейнов К.К. Основы систем управления (аэрокосмическая техника). Bakı, MAA, 2016, с.264-270.
6. Полковникова Н.А., Курейчик В.М. Разработка модели экспертной системы на основе нечёткой логики. Известия ЮФУ. Технические науки, 2014, с.83-92.
7. Курейчик В.М. Особенности построения систем поддержки принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012, № 7 (132), с.92-98.
8. Материалы сайта http://www.rusrep.ru/2008/36/interview_konkov/
9. Пашаев А.М, Исмаилов И.М. Интеллектуальные измерительно – вычислительные комплексы аэрокосмического применения. «MAA Elmi məcmuələri». Bakı, 2009, Cild 11, №3, с.47-54.

UOT 004.89

İ.M. İsmayılov, M.M. İsayev

Hava gəmisinin idarə olunmasının intellektual sistemlərinin qurulması prinsipləri

Dinamik dəyişən uçuş şəraitlərində intellektual idarəetmə sistemlərinin yaradılması məsələlərinə baxılmış və uçuşun idarə olunmasının bort intellektual sisteminin qurulması prinsipi təklif edilmişdir. Qeyri-səlis produksiyalar və linqvistik dəyişənlər formasında qeyri-səlis ekspert sisteminin modeli, həmçinin təyyarənin uzununa hərəkətini təmin edən qeyri-səlis tənzimləyici misalında ekspert sisteminin modelinin realizəsi verilmişdir.

Açar sözlər: təyyarənin idarə olunması sistemləri, intellektual idarəetmə sistemləri, süni intellekt sistemləri, ekspert sistemləri, qeyri-səlis məntiq

I.M. Ismailov, M.M. Isayev

The principles of building intelligent aircraft control systems

The development of intelligent control systems in conditions of dynamically changing flight conditions are considered and the principle of construction of an onboard intelligent flight control system is proposed. The model of the fuzzy expert system in the form of fuzzy products and linguistic variables and the implementation of the expert system module are illustrated by the example of a fuzzy regulator providing control of the longitudinal movement of the aircraft.

Keywords: aircraft control systems, intelligent control systems, artificial intelligence systems, expert systems, fuzzy logic

AMEA İdarəetmə Sistemləri İnstitutu

Təqdim olunub 06.06.2018