

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИНИМАКСНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БОКОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ САМОЛЕТА

Репин А.И. *, Кашкина Т.И.

Московский государственный университет приборостроения и информатики,
ул. Стромьнка, 20, Москва, 107996, Россия

* e-mail: airepin@mail.ru

Приводится структурная схема классической системы автоматического управления боковым движением самолета при заходе на посадку. Рассматривается задача обеспечения безопасности при посадке самолетов путем автоматизации системы управления на основе нечетко-множественного математического аппарата. Разработан алгоритм управления боковым движением самолета в бортовых системах автоматического управления с нечеткой логикой, а также создана и описана программа для воспроизведения операций MIN и MAX в бортовых системах автоматического управления с применением логико-лингвистических операций.

Ключевые слова: структурная схема, алгоритм управления, теория нечеткого управления, операции MIN и MAX, язык программирования СИ++, функция совместимости.

С целью обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов (ЛА) применяются детерминированные или стохастические системы автоматического управления [1]. При хорошей метеевидимости (2 категория) их использование оправданно [2, 3]. Для полета в более сложных метеоусловиях (3 категория) известные методы и средства не дают должного эффекта [4]. Тогда целесообразно воспользоваться для проектирования систем управления методами теории нечеткого управления.

Прежде чем описывать нечеткую систему управления полетом ЛА, рассмотрим действия летчика (в дальнейшем — оператор) на этапе полета и его логико-лингвистический (нечеткий) подход к выбору управляющих стратегий. Предполагаем, что существуют три подхода по лингвистическому описанию устройства управления с размытой логикой. Поскольку не ставится цель логического исследования в целом физической картины бокового возмущенного движения ЛА (она достаточно сложна), для решения ряда практических задач представляется возможным ввести некоторые упрощения:

1. Управление движением ЛА осуществляется координировано. Угол скольжения при этом равен нулю.

2. Боковая составляющая ветра $U_6 = 0$.

Управляющие правила, используя нечетко-множественный математический аппарат, можно пост-

роить без упрощений. Следует только учесть возмущающие воздействия при составлении матриц нечеткого отношения R на множестве X .

Когда необходимо подчеркнуть, что возможно управление боковым движением ЛА с помощью нечеткой системы управления, допустимо исключение некоторых второстепенных параметров из закона управления, так как при синтезе нечеткой системы наиболее сложными этапами оказываются:

- отыскание отображений по эвристическим заданным правилам;
- обеспечение расчетов нечеткими моделями объекта.

Не останавливаясь подробно на характеристиках оператора, работающего в системе «человек-машина», отметим, что он способен приспосабливаться к динамическим характеристикам управляемого им ЛА и обладает свойством обучаемости.

Выявлено, что приближенно

$$W_0(p) = \frac{Ke^{-pt}(\alpha\tau_1 p + 1)}{(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)}.$$

Реакция оператора имеет дискретный характер. Его полоса пропускания ограничена частотой 0,5 Гц. Доказано, что легче и точнее всего оператор выполняет функции простого усилителя [5]. Хуже,

но выполняются им более сложные функции, в частности дифференцирование, интегрирование. Однако оператор удовлетворительно реагирует не только на сигнал отклонения, но и на его производную. При этом

$$W_0(p) = K_0(1 + K'p).$$

Иначе говоря, оператор реализует законы, представленные в [5].

Решение задачи обеспечения безопасности полетов ЛА при посадке на взлетно-посадочную полосу (ВПП) в сложных метеоусловиях связано не только с необходимостью создания легких и прочных устройств, но и, главным образом, с изысканием новых принципов (методов и средств) построения систем управления [6, 7].

Повышение безопасности достигается путем автоматизации управления заходом на посадку и посадкой самолета [8]. Не стоит забывать, что с уменьшением времени протекания переходных процессов в системе управления (автопилоте) непосредственно увеличивается и уровень безопасности полетов [9, 10, 11].

Создание технических средств управления самым сложным этапом полета летательного аппарата — посадкой — является трудоемким процессом и во многом нерешенной задачей на сегодняшний день.

Очевидно, что применение стандартных методов для моделирования, анализа и управления сложными многоуровневыми системами становится менее возможно с увеличением их сложности. В данной ситуации именно методы нечеткого управления являются наиболее применимыми к таким сложным технологическим процессам, как управление посадкой самолета.

Системы управления ЛА, основанные на принципах нечеткой логики, позволяют повысить курсовую устойчивость самолета. В таких ситуациях одновременно уменьшаются энергозатраты и повышается время срабатывания системы. Кроме того, можно сделать систему в целом более устойчивой к воздействию возмущающих факторов по сравнению с традиционными системами автоматического управления ЛА.

Известно [12], что посадка ЛА на интервале 4000 м является стационарным процессом (установившимся полетом). Тогда управление продольным и боковым движениями ЛА можно рассматривать как отдельные режимы.

Поэтому рассмотрим более подробно вопрос управления боковым траекторным движением самолета.

Структурная схема системы управления креном (курсом) без автопилота изображена на рис. 1 [13, 14]. Данная система позволит стабилизировать угол крена (курса) при разных его значениях.

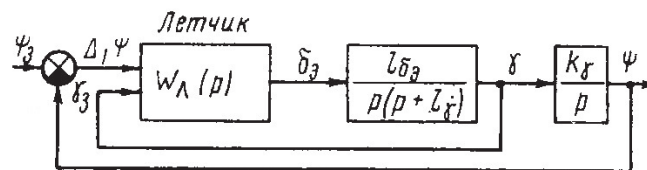


Рис. 1. Структурная схема бортовой системы автоматического управления полетом ЛА в контуре с передаточной функцией оператора

На рис. 1 введены следующие обозначения: $W_\Lambda(p)$ — передаточная функция оператора; γ_3 — заданный угол крена; α — угол атаки; ν — угол тангажа; V — скорость полета; ω_Z — угловая скорость вращения вокруг оси Z ; β — угол скольжения; U_6 — боковая составляющая ветра; $p = d/dt$; γ — угол крена ЛА; Z — линейное боковое отклонение; $\Delta\Psi$ — отклонение текущего курса ЛА от заданного значения; $K_\gamma = g/V$ — передаточный коэффициент; g — ускорение свободного падения.

Система управления для успешного захода на посадку реализует следующие законы управления:

$$\gamma_{\text{зад}} = -K_\epsilon \cdot \epsilon - K_\epsilon \cdot p\epsilon \text{ или } \gamma_{\text{зад}} = -K_z \cdot Z - K_z \cdot pZ.$$

На вход передаточного звена летчика подается сигнал отклонения текущего крена от его заданного значения. Ошибка состояния образуется сравнением желаемого состояния и оценкой фактического. Более того, оценки могут вычисляться при неполной априорной информации об объекте.

В общем случае ошибка управления может определяться по следующей формуле:

$$\Delta_1\gamma = \gamma_2 - \gamma_1.$$

Данная зависимость применима и для системы управления креном с автопилотом, изображенной на рис. 2.

На основе приведенных законов управления могут быть выполнены две структурные схемы си-

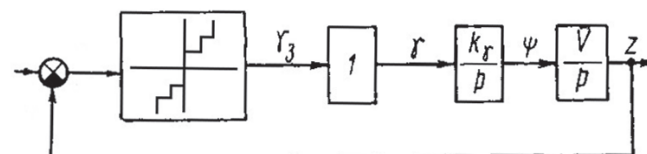


Рис. 2. Структурная схема бортовой системы автоматического управления полетом ЛА в контуре с нечеткой передаточной функцией

стем автоматического управления полетом ЛА (см. рис. 1 и 2).

Структурные схемы двух систем различаются тем, что в первом случае вместо звена с передаточной функцией $W_o(p)$ оператора включено звено с передаточной функцией $W_a(p)$ автопилота. Введение вместо функции $W_o(p)$ в схему функции $W_a(p)$, т.е. передаточной функции автопилота, вызывает ряд проблем. Одна из них — обеспечение безопасности автоматического полета в случае отказа автопилота. Частным решением указанной проблемы и является разделение в 10 раз продолжительности протекания переходных процессов двух движений. Оператор в этом случае работает в качестве контролера за состоянием системы управления.

Практика показывает, что оператор в условиях хорошей метеовидности удовлетворительно производит посадку ЛА без помощи системы программного управления (СПУ) и системы траекторного управления (СТУ).

Поэтому включение звена с нечеткой передаточной функцией $W_N(p)$ вместо звеньев с функциями $W_o(p)$ или $W_a(p)$ позволит взять за основу при синтезе нечеткого регулятора поведение оператора в такой ситуации [15, 16].

При плохой метеовидности, когда нет визуального контакта с ВПП, для посадки ЛА применяются радиотехнические системы. В системе управления они используются в качестве датчиков первичной информации, так что синтез нечеткого регулятора будет сводиться к синтезу нечеткой системы, в контуре управления которой применяется радиотехническая (оптико-электронная) система посадки. Подобные системы называются курсоглиссадными, они определяют положение ЛА по курсу и на глиссаде.

В данной ситуации именно методы нечеткого управления являются наиболее применимыми к таким сложным технологическим процессам [17, 18].

Была создана программа для воспроизведения операций \min и \max на языке программирования СИ++ в бортовых системах автоматического управления с применением нечеткой логики [19, 20].

Для построения функции совместимости программой в пустые поля следует ввести само множество данных и степень принадлежности каждой переменной данного множества, она характеризует совместимость этого введенного значения с нечетким ограничением.

На первом этапе следует ввести имеющиеся данные в программу (рис. 3).

Рис. 3. Листинг программы

На языке программы это выглядит следующим образом:

```
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{double[] values; double[] grades;
  if (textBox1.TextLength == 0) {MessageBox.
Show(«Введите данные»); return;}
  if (textBox2.TextLength == 0) {MessageBox.
Show(«Введите имя массива»); return;}

  try {values = Array.ConvertAll(textBox1.Text.Split(' '),
Double.Parse);
    grades = Array.ConvertAll(textBox3.Text.Split(' '),
Double.Parse);}
}
```

Программой наложены ограничения на ввод данных.

В поле «Множество данных» возможно использование как положительных, так и отрицательных значений без ограничения их диапазона.

В поле «Степень принадлежности» могут быть введены значения строго от 0 до 1.

Ввод корректных данных контролируется следующими функциями:

```
catch (Exception) {MessageBox.Show(«Ошибка при вводе»); return;}

foreach (double grade in grades) {if (grade>1 || grade<0)
{MessageBox.Show(«Класс принадлежности от 0 до 1»);
return;}

if (values.Length != grades.Length) {MessageBox.Show
(«Массивы не совпадают»); return;}
}
```

Таким образом, если не будет заполнено хоть одно из полей, программа выдаст ошибку и предложит повторить ввод (рис. 4).

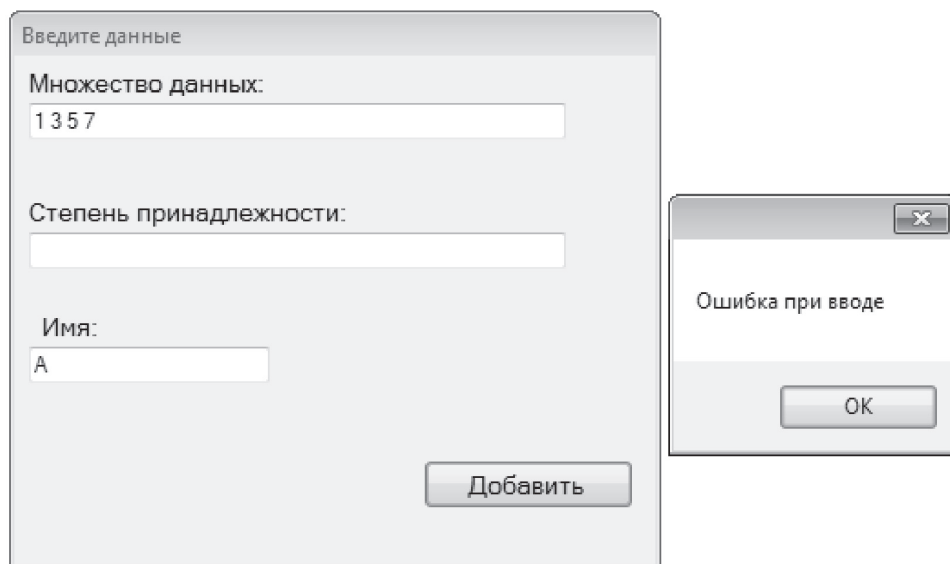


Рис. 4. Листинг программы

При вводе некорректной степени принадлежности (в нашем примере — 2) программа выведет на экран следующее окно (рис. 5).

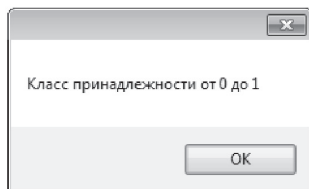
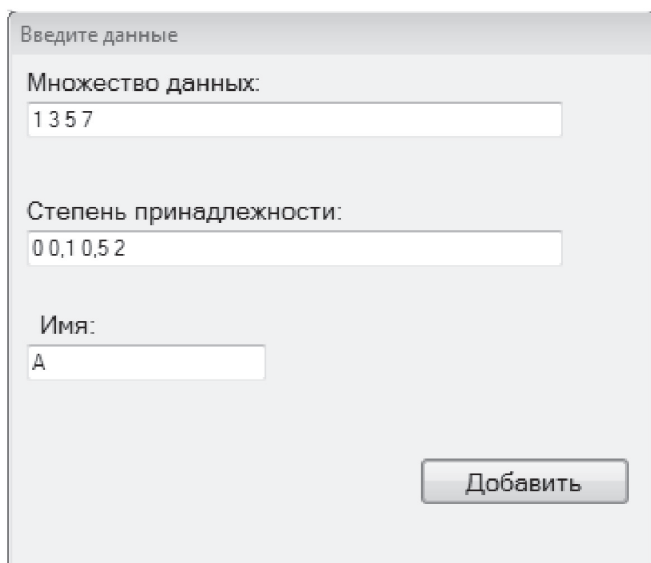


Рис. 5. Листинг программы

При попытке ввести еще одно окно (рис. 6) программа проинформирует о несоответствии количества множеств данных и их степеней принадлежности.

При правильных введенных данных программа переходит непосредственно к построению графика функции совместимости (рис. 7 и 8).

За построение графика функции совместимости отвечает следующая часть программы:

```
Series sc = new Series(«Main»); sc.BorderWidth = 2;
sc.ChartType = SeriesChartType.Line;
sc.ChartArea = «ChartArea1»;
for (int c=0; c<values.Length; c++)
{sc.Points.AddXY(values[c], grades[c]);}
sc.Name = textBox2.ToString();
mw.chart1.Series.Add(sc);
mw.chart1.Update()
this.Hide();
```

В возможности данной программы входит построение сразу нескольких графиков функций совместимости в одном окне (рис. 9).

Как видно из последнего окна, с помощью программы выведены графики функций совместимости с различными цветовыми оттенками введенных значений множества данных с нечетким ограничением степеней принадлежности каждой переменной.

Выводы

1. Применение в системах управления боковым движением ЛА при посадке методов теории нечеткого управления позволяет повысить качество переходных процессов, в частности быстродействие в два—три раза, так как оптимальное управление ищется среди приближенных, а не точных стратегий.

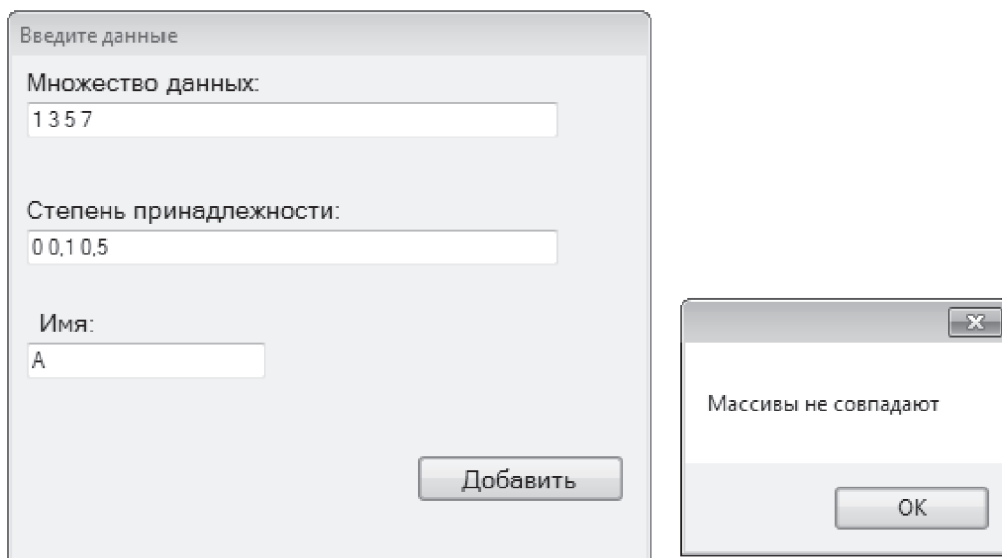


Рис. 6. Листинг программы

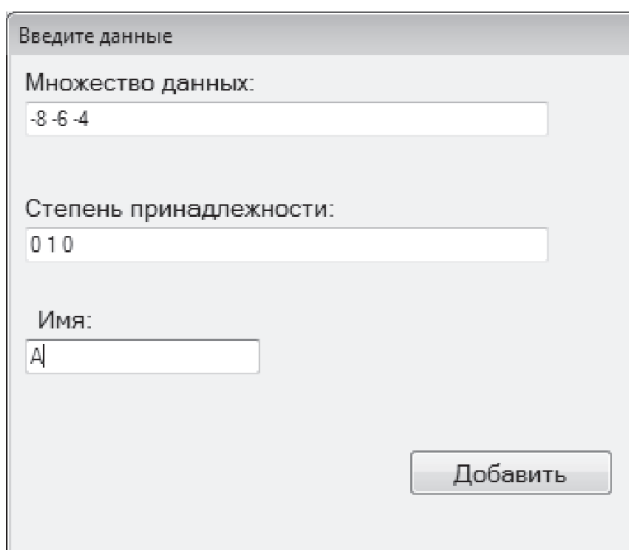


Рис. 7. Листинг программы

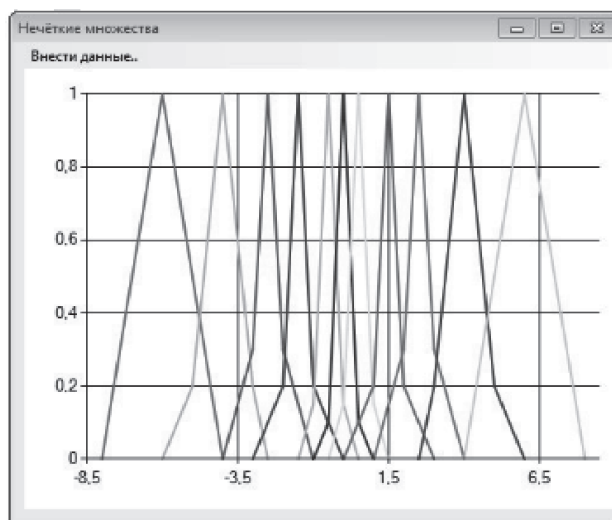


Рис. 9. Листинг программы

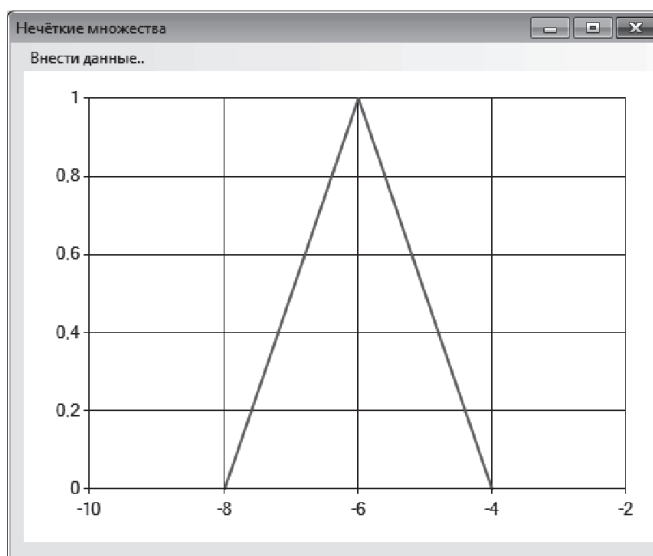


Рис. 8. Листинг программы

2. Низкая алгоритмическая сложность позволяет использовать маломощные бортовые самолетные ЦВМ.

3. Системы нечеткого управления обладают высокой технической надежностью.

4. Системы с нечеткой логикой обладают высокой устойчивостью по отношению к внутренним и внешним возмущающим воздействиям.

5. Известные системы управления процессом посадки ЛА при внедрении предлагаемых методов и средств не требуют каких-либо серьезных доработок (изменяется только алгоритм управления, реализация на ЦВМ).

Библиографический список

1. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и ИК-лучей. — М.: Советское радио, 1966. — 354 с.
2. Бюллетень ИКАО. — Монреаль, Канада: ИД ИКАО, 1972. — 44 с.
3. Бюллетень ИКАО. — Монреаль, Канада: ИД ИКАО, 1974. — 46 с.
4. Lim Nat/76 — WP/1/4/6/76, Limited North Atlantic Regional Air Navigation MEETJNG. — Montreal, Canada, ICAO, 1977. — 103 с.
5. Белгородский С.Л. Автоматизация управления посадкой самолета. — М.: Транспорт, 1972. — 352 с.
6. Александров А.Г. Методы построения систем автоматического управления. — М.: Физматлит, 2008. — 230 с.
7. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. и др. Управление воздухоплавательными комплексами: теория и технологии проектирования. — М.: Физматлит, 2010. — 394 с.
8. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1973. — 504 с.
9. Зубов В.И. Лекции по теории управления: Учебное пособие. — СПб.: Лань, 2009. — 494 с.
10. Малафеев С.И. Основы автоматики и системы автоматического управления. — М.: Издательский центр «Академия», 2010. — 384 с.
11. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: Учебное пособие для вузов. — СПб.: Лань, 2010. — 624 с.
12. Белгородский С.Л. К вопросу о стационарности процесса автоматической стабилизации самолета в зоне КРМ на ограниченном интервале // Системы навигации, посадки и УВД ГА: реф. сборник №1. — М.: МГА, 1976. — 64 с.
13. Юревич Е.И. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. — СПб.: ВHV, 2016. — 560 с.
14. Репин А.И., Снедков А.Б., Кашкина Т.И. Анализ переходных процессов в нечеткой системе управления боковым движением самолета. Постановка задачи // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Приборостроение и информационные технологии. 2014. № 50. С. 40-46.
15. Репин А.И., Меркишин Г.В., Лосев В.Ю. Переходные процессы в нечеткой системе управления боковым движением самолета // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 4. С. 159-163.
16. Репин А.И., Яшин М.М. Временной автоселектор с нечетким дискриминатором в кольце слежения // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 5. С. 178-183.
17. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. Issue 1, 13 p. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2
18. Давыдов Ю.Т., Репин А.И. Основы оптимизации и комплексирования бортовых информационных систем: Учебное пособие для вузов. — М.: Изд-во МАИ, 1996. — 170 с.
19. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. — 802 с.
20. Fischle K., Schröder D. Stabile adaptive Fuzzy-Regelung ohne Differentiation der Regelgröße // Automatisierungstechnik. 1997. Vol. 45. No. 8, pp. 360-367.

SPECIFICS OF APPLICATION OF MINIMAX OPERATIONS FOR AIRCRAFT LATERAL MOVEMENT CONTROL

Repin A.I.* , Kashkina T.I.

*Moscow State University of Engineering and Computer Science,
20, Stromynka str., Moscow, 107996, Russia*

** e-mail: airepin@mail.ru*

Abstract

The safety of aircraft landing on approaching the landing strip in difficult weather conditions is associated not only with the need to create light and strong devices, but also, mainly, the search for new principles (methods and tools) for building control systems, since the aircraft landing is the most laborious process and largely unsolved problem to date.

Safety upgrading is achieved by control automating while approaching the landing strip and aircraft landing. It is obvious that the use of standard methods for modeling, analyzing and managing of complex multi-level systems becomes less possible with complexity

increasing. In this situation, fuzzy control methods are the most applicable to such complex technological processes as the control of aircraft landing.

Aircraft control systems based on the principles of fuzzy logic, allow increase the course stability of the aircraft. In such situations, energy consumption is reduced and the response time of the system is increased simultaneously. Besides, it is possible to make the system as a whole more stable to the effect of disturbing factors compared to the traditional aircraft automatic control systems.

Practice shows that the operator, in conditions of good meteorological visibility range, satisfactorily lands

an aircraft without the help of a program control system and a trajectory control system.

In the case of poor meteorological visibility, with the lack of visual contact with the runway strip, radio technical, optoelectronic and inertial navigation systems are employed for aircraft landing. They are used in the control system as sensors of primary information for the automatic control system (ACS). Such systems are termed course-glissade systems. They determine the position of an aircraft on the course and on the glide path.

But, even with modern control systems provision equipped with computerized hardware and software systems, which functionality is largely determined by software, applied diagnostic models, information processing algorithms, etc., the final decision-making is delegated to the human, which is a consequence of the insufficient effectiveness of diagnostic models, reflecting real ACS and the environment.

Thus, the structure schemes of similar systems in the following stages should include the links with fuzzy transfer function $W_N(p)$ instead of links with functions $W_o(p)$ or $W_a(p)$. To this effect, it is rational to implement the of the operator's behavior in such a situation as the basis for the fuzzy controller synthesis. In this situation, namely the methods of fuzzy control are the most applicable to such complex technological processes that will allow reduce by 10 times the duration of the longitudinal and horizontal movements' transients. The pilot in this case operates as a controller for the state of the control system.

Thus, the task consisted in developing models and algorithms for the design of control systems based on the methods of the theory of fuzzy-multiple apparatus.

A program in the C++ programming language was created to reproduce the min and max operations in on-board systems for automatic control of the aircraft lateral movement with applicaiton of fuzzy logic.

Keywords: block diagram, control algorithm, fuzzy control theory, MIN and MAX operations, C++ programming language, compatibility function.

References

1. Zuev V.E. *Prozrachnost' atmosfery dlya vidimyykh i IK-luchei* (Transparency of the atmosphere for visible and infrared rays), Moscow, Sovetskoe radio, 1966, 354 p.
2. Newsletter ICAO. Monreal, Kanada, ICAO, 1972, 44 p.
3. Newsletter ICAO. Monreal, Kanada, ICAO, 1974, 46 p.
4. Lim Nat / 76 - WP / 1/4/6/76, Limited North Atlantic Regional Air Navigation MEETJNG. Monreal, Kanada, ICAO, 1977, 103 p.
5. Belogorodskii S.L. *Avtomatizatsiya upravleniya posadkoi samoleta* (Automation of aircraft landing control), Moscow, Transport, 1972, 352 p.
6. Aleksandrov A.G. *Metody postroeniya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Automatic control systems construction methods), Moscow, Fizmatlit, 2008, 230 p.
7. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. *Upravlenie vozdukhoplavatel'nymi kompleksami: teoriya i tekhnologii proektirovaniya* (Management of aeronautical systems: theory and design technology), Moscow, Fizmatlit, 2010, 394 p.
8. Bodner V.A. *Sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami* (Aircraft control systems), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 504 p.
9. Zubov V.I. *Lektsii po teorii upravleniya* (Lectures on control theory), St. Petersburg, Lan', 2009, 494 p.
10. Malafeev S.I. *Osnovy avtomatiki i sistemy avtomaticheskogo upravleniya* (Fundamentals of automatics and automatic control system), Moscow, Akademiya, 2010, 384 p.
11. Pervozvanskii A.A. *Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Course of automatic control theory), St. Petersburg, Lan', 2010, 624 p.
12. Belogorodskii S.L. *Sistemy navigatsii, posadki i UVD GA. Sbornik statei*. Moscow, MGA, 1976. No.1, 64 p.
13. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automatic control), St. Petersburg, BHV, 2016, 560 p.
14. Repin A.I., Snedkov A.B., Kashkina T.I. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroeniya i informatiki. Seriya: Priborostroenie i informatsionnye tekhnologii*, 2014, no. 50, pp. 40-46.
15. Repin A.I., Merkishin G.V., Losev V.Yu. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no 4, pp. 159-163.
16. Repin A.I., Yashin M.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no 5, pp. 178-183.
17. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975, vol. 7, issue 1, 13 p. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2
18. Davydov Yu.T., Repin A.I. *Osnovy optimizatsii i kompleksirovaniya bortovykh informatsionnykh sistem* (Basics of optimization and integration of on-board information systems), Moscow, MAI, 1996, 170 p.
19. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Springer Science & Business Media, 2001, 728 p.
20. Fischle K., Schröder D. Stabile adaptive Fuzzy-Regelung ohne Differentiation der Regelgröße // *Automatisierungstechnik*, 1997, vol. 45, no. 8, pp. 360-367.