

# Системы навигации и управления авиационно-космической техники

УДК 697.34:62-52

DOI: 10.14529/ctcr170112

## НЕЧЕТКИЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ САМОЛЕТА ИЛ-76

*А.Н. Торопов, С.В. Панферов, Н.А. Тренин*

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске*

Рассматривается вариант модернизации тормозной системы самолета Ил-76 и методика формирования алгоритма работы антиюзовой системы. В связи с тем, что данное воздушное судно проектировалось давно, и текущая схема распределения тормозных усилий достаточно устарела, применение данного самолета в боевых действиях требует постоянного совершенства его летно-тактических характеристик, поэтому идея модернизации антиюзовой автоматики достаточно актуальна. Задача в целом решается путем внедрения в исполнительную часть тормозной системы электронно-вычислительной машины с комплексной системой сбора данных и параметров воздушного судна и взлетно-посадочной полосы. Предложен алгоритм формирования и распределения тормозных усилий на базе нечеткого контроллера, для чего необходимо описать лингвистические переменные и с помощью нечеткого вывода вычислить задающую величину, которая через цифроаналоговый преобразователь поступит на исполнительный механизм. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и модернизации алгоритма работы тормозной (антиюзовой) системы в военно-транспортной авиации.

*Ключевые слова: тормозная система самолета, антиюзовая автоматика, нечеткий контроллер, лингвистические правила управления, выбор тормозных моментов, распределение тормозных моментов между колесами воздушного судна.*

### Введение

Тормозная система воздушного судна – сложная высокотехнологическая структура, которая совместно с другими взлетно-посадочными механизмами и системами обеспечивает торможение воздушного судна. Тормозная система работает с огромными скоростями и нагрузками при максимально возможном весе и размерах воздушного судна, поэтому к ней предъявляются достаточно серьезные требования. При рассмотрении тормозной системы, применяемой в военно-транспортной авиации, в частности, в самолете Ил-76, можно сказать, что используется достаточно надежная классическая схема, состоящая из гидравлической и механической части.

На самолете Ил-76 управление тормозами колес главных ног шасси осуществляется тормозными подножками педалей руля направления с места правого или левого летчиков. Правая подножка затормаживает все колеса правых ног, а левая подножка – левых ног, тормозной момент пропорционален ходу тормозных подножек. Установленные в системе антиюзовой автоматики двухинтегральные автоматы торможения сбрасывают давление из тормозных цилиндров при возникновении углового замедления колес, превышающего допустимую величину (в момент, предшествующий юзу), а также при падении числа оборотов ниже допустимых пределов. Давление сбрасывается одновременно из тормозных цилиндров двух колес, расположенных симметрично относительно оси ноги.

Применение в тормозной системе Ил-76 антиюзовой автоматики позволяет сократить тормозное расстояние, пройденное воздушным судном по взлетно-посадочной полосе в зависимости от сцепной способности опорной поверхности, тем не менее, необходима дальнейшая модернизация антиблокировочной системы с целью повышения эффективности торможения и уменьшения износа авиационной шины.

### Постановка задачи

Одним из вариантов модернизации антиюзовой автоматики в рамках тормозной системы является применение электронной вычислительной техники, которая, в свою очередь, осуществляет управление тормозными моментами на колесах на основе большего количества внешних параметров и факторов.

Существуют проблемы, связанные с построением автоматических систем управления тормозным моментом и его распределением на колесах на базе цифровой техники с учетом особенностей рабочих процессов систем и агрегатов воздушного судна. Выбор рациональной структуры, параметров и построение алгоритмов функционирования таких систем, включающих множество элементов, работа которых основана на различных физических принципах, связаны со значительными трудностями. При модернизации антиюзовой системы необходим учет особенностей функционирования каждого элемента в отдельности и процессов их взаимодействия и взаимовлияния при движении воздушного судна по взлетно-посадочной полосе.

Для модернизации антиюзовой системы необходимы теоретические исследования комплекса «автоматическая система управления – самолет – внешняя среда» с использованием математического моделирования рабочих процессов на электронно-вычислительной машине. Вышеприведенные обстоятельства требуют проведения углубленных исследований процессов, происходящих в тормозной системе. В связи с этим задача определения и исследования закономерностей приложения тормозного момента к колесу, его распределения между колесами и разработка на их основе алгоритма управления, влияющего на повышение эффективности торможения, является весьма актуальной.

### Вариант решения

Для разработки алгоритма работы антиюзовой системы по растормаживанию колес (приложению тормозного момента) предлагается применить нечеткую систему управления в связи с тем, что до соприкосновения колеса с взлетно-посадочной полосой часть параметров будет неизвестна. При решении задачи необходимо описать лингвистические переменные, которые будут поступать в цифровой сигнал с датчиков на аналого-цифровой преобразователь (АЦП); функции их принадлежности; стратегию управления посредством нечетких правил, которые можно объединить в единую базу правил или знаний о системе. Создание алгоритма необходимо проводить на основе CASE-технологии, которая позволяет все действия выполнять только посредством общения с экраном электронно-вычислительной машины, не заглядывая в программный код.

На стадии *offline*-оптимизации проверяется работоспособность созданной системы, чтобы в дальнейшем на этапе *online*-оптимизации разработать систему управления, в которой все ее элементы, в частности, исполнительные механизмы и элементы регистрирующего комплекса соединены физической линией связи. Такой вид отладки позволяет наблюдать поведение системы в реальных условиях и при необходимости вносить изменения в систему управления.

На этапе реализации получаем окончательный вариант кода для конкретного микроконтроллера и, если нужно, связываем его с основной программой. Основу программного кода составляет ядро, аппаратно-ориентированное на конкретный тип процессора. В результате после поступательной проработки всей методики разработки алгоритма получим нечеткий алгоритм распределения тормозных моментов.

Особенностями нечеткого управления являются возможность представления техники и знаний о посадке, которыми обладает летчик, с помощью лингвистических правил управления (ЛПУ), что позволяет обойтись без количественной модели объекта управления. Поэтому в качестве устройства управления с функциями адаптации к изменениям параметров, характеризующих взаимодействие колеса с опорной поверхностью взлетно-посадочной полосы, разработан нечеткий контроллер (НК), который построен на основе качественных соотношений между частотой вращения колеса и его подтормаживанием, т. е. правил и знаний управления. В НК выполняются нечеткие выводы, следуя правилам управления, и вычисляются задающая величина, причем в качестве входной информации для НК используются отклонение частоты вращения.

Для повышения робастности системы управления ограничением тормозного момента спроектирован НК с функцией обучения. Это означает, что параметры НК настраиваются в реальном времени или итеративно по результатам оценки реакций на управляющие воздействия. Инфор-

## Системы навигации и управления...

мация о замеряемых параметрах воздушного судна в виде напряжения с датчиков поступает в АЦП, который преобразует их в цифровые данные, понятные программному обеспечению электронно-вычислительной машины. Затем на основе нечетких ЛПУ с использованием нечеткого вывода вычисляем задающую величину, которая через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) поступает на исполнительный механизм.

Следуя [1], будем использовать в НК следующие лингвистические правила управления (ЛПУ):

- ЛПУ 1: если  $e_k$  есть  $P_1$ , то  $\Delta u_k$  есть  $P_{u1}$ ;  
 ЛПУ 2: если  $e_k$  есть  $N_1$ , то  $\Delta u_k$  есть  $N_{u1}$ ;  
 ЛПУ 3: если  $\Delta e_k$  есть  $P_2$ , то  $\Delta u_k$  есть  $P_{u2}$ ;  
 ЛПУ 4: если  $\Delta e_k$  есть  $N_2$ , то  $\Delta u_k$  есть  $N_{u2}$ ;  
 ЛПУ 5: если  $\Delta^2 e_k$  есть  $P_3$ , то  $\Delta u_k$  есть  $P_{u3}$ ;  
 ЛПУ 6: если  $\Delta^2 e_k$  есть  $N_3$ , то  $\Delta u_k$  есть  $N_{u3}$ .

Здесь для момента времени  $k$ :  $e_k = r - y_k$ ;  $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$  (разность отклонений 1-го порядка);  $\Delta^2 e_k = \Delta e_k - \Delta e_{k-1}$ , (разность отклонений 2-го порядка);  $\Delta u_k = u_k - \Delta u_{k-1}$  (приращение задающей величины);  $r, y_k$  – заданная и текущая скорости самолета соответственно;  $P, N$  – положительное и отрицательное значения.

При нечетком управлении, благодаря нечеткому выводу, задающая величина определяется путем установления компромисса между правилами, приводящими к таким противоположным действиям.

Если сравнить эти правила с ПИДК (ПИД-контроллер), то можно заметить, что ЛПУ 1 и ЛПУ 2 соответствуют интегральному, ЛПУ 3 и ЛПУ 4 – пропорциональному, ЛПУ 5 и ЛПУ 6 – дифференциальному воздействиям. Однако обработка правил выполняется с помощью нечетких выводов, и в результате будет построен нелинейный ПИДК.

Величины  $P_i, P_{ui}, N_i, N_{ui}$  ( $i = 1, 2, 3$ ), входящие в правила, представляют собой нечеткие множества, которые имеют функции принадлежности для каждой переменной (рис. 1).

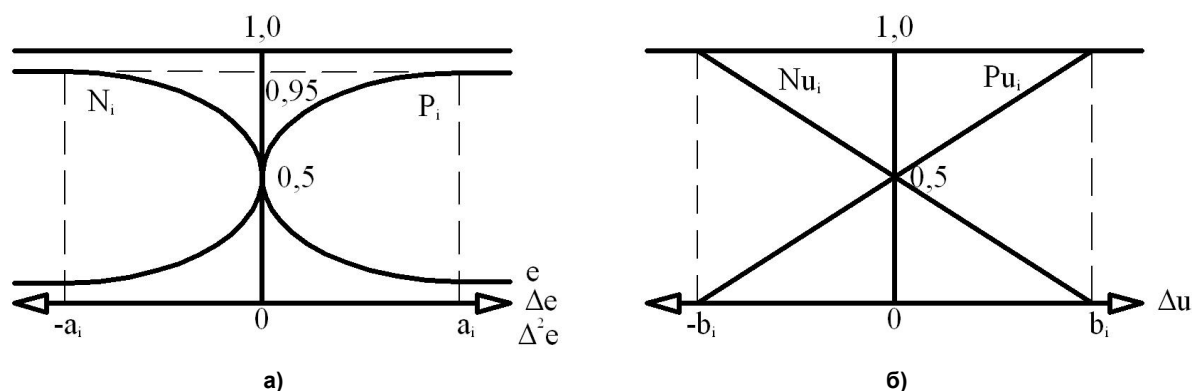


Рис. 1. Функции принадлежности: а – предпосылка; б – заключение

Функции принадлежности предпосылок имеют вид арктангенсов, а функции принадлежности заключений – прямых линий. Представление предпосылки в виде кривой с насыщением необходимо для того, чтобы усиление контроллера при почти нулевом отклонении от заданной величины было большим, а если отклонение будет возрастать, то происходило бы насыщение усиления. Благодаря этому задающую величину ограничиваем даже при вводе в контроллер очень больших ошибочных данных. Важным аспектом, связанным со структурой НК, является определение параметров  $a_i, b_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) функций принадлежности.

Для нечеткого вывода используем формулы на основе сложных правил косвенного метода, предложенного Цукамото [2]. Нечеткий вывод представляем следующей формулой:

- Предпосылка 1: если  $e_k$  есть  $P_1$ , то  $\Delta u_k$  есть  $P_{u1}$  (ЛПУ1)  
 Предпосылка 2:  $e_k$  есть  $P'$   
 Заключение  $\Delta u_k$  есть  $C_1$

Здесь  $P'$  и  $C_1$  – нечеткие (лингвистические) переменные. Смысл этой формулы заключается в том,

что при задании нечеткого словного предложения предпосылки 1 и  $P'$  в качестве нечеткого входного значения определяется заключение (нечеткое выходное значение)  $C_1$ .

Нечеткий вывод может быть прямым, когда значение принадлежности нечеткого множества трактуется как значение истинности, а вывод осуществляется с использованием этого значения, или косвенным, когда вывод осуществляется с использованием нечеткого (лингвистического) значения истинности, полученного в результате нечеткого представления значения истинности.

Для определения обратного значения истинности используем нечеткое правило «модус поненс».

По нечеткому тезису « $e_k$  это  $P_1$ » предпосылки 1 и нечеткому тезису « $e_k$  это  $P'$ » предпосылки 2 в формуле (2) определяется нечеткое множество степени истинности « $e_k$  это  $P_1$ », т. е. нечеткое значение истинности  $\tau_{P_1}$ . Иначе говоря, определяется  $\tau_{P_1}$  такое, что « $e_k$  есть  $P_1$ » есть  $\tau_{P_1} \leftrightarrow$  « $e_k$  есть  $P'$ » (это называют определением обратного значения истинности). Нечеткое множество определяем следующей формулой:

$$\mu_{\tau_{P_1}}(v) = \mu_{P'}(\mu_{P_1}^{-1}(v)), \quad v \in [0,1]. \quad (3)$$

Нечеткий «модус поненс» предназначен для вывода степени истинности заключения « $\Delta u_k$  есть  $P_{u1}$ » или нечеткого значения истинности  $\tau_{P_{u1}}$  по заданным степени истинности  $\tau_{P_1 \rightarrow P_{u1}}$  (нечеткого значения истинности) нечеткого условного предложения (записывается как  $P_1 \rightarrow P_{u1}$  задается в виде

$$P_1 \rightarrow P_{u1} = 1 \wedge (1 - p_1 + p_{u1}), \quad p_1, p_{u1} \in [0,1], \quad (4)$$

где  $p_1, p_{u1}$  – числовые значения истинности.

С помощью этой формулы представляем нечеткое значение истинности  $\tau_{P_1 \rightarrow P_{u1}}$  нечеткого условного предложения  $P_1 \rightarrow P_{u1}$  следующим образом:

$$\tau_{P_1 \rightarrow P_{u1}} = 1 \wedge (1 - \tau_{P_1} + \tau_{P_{u1}}), \quad (5)$$

где « $\wedge$ » и « $\rightarrow$ » – это нечеткие операции, определенные по принципу расширения.

Используя множество  $\alpha$ -уровней для нечеткого значения истинности в формуле (5), получаем

$$\tau_{P_1 \rightarrow P_{u1}}^\alpha = 1 \wedge (1 - \tau_{P_1}^\alpha + \tau_{P_{u1}}^\alpha), \quad (6)$$

где  $\tau^\alpha = \{t | \mu_\tau(t) \geq \alpha\}$ ,  $\alpha \in [0,1]$ .

Отсюда следует, что при заданных  $\tau_{P_1 \rightarrow P_{u1}}$  (обычно предполагается истинным) и  $\tau_{P_1}$  значение  $\tau_{P_{u1}}$  определяем, решив уравнение (6). Если величина  $\tau_{P_1}$  нормализована (высота равна 1) и выпукла, а  $\tau_{P_1 \rightarrow P_{u1}}$  очень мала в диапазоне  $[0, 1]$ , записываем  $\tau_{P_1}^\alpha = [a_1(\alpha), a_2(\alpha)]$ ,  $\tau_{P_1 \rightarrow P_{u1}} = [r(\alpha), 1]$ , поэтому величину  $\tau_{P_{u1}}^\alpha$  определяем из следующей формулы:

$$\tau_{P_{u1}}^\alpha = [\{a_1(\alpha) + r(\alpha) - 1\} \vee 0, 1]. \quad (7)$$

По полученному с помощью «модус поненс» нечеткому значению истинности  $\tau_{P_{u1}}$  заключения « $\Delta u_k$  есть  $P_{u1}$ » и нечеткому множеству заключений  $P_{u1}$  определяем нечеткое множество  $C_1$  заключений « $\Delta u_k$  если  $C_1$ » с помощью « $\Delta u_k$  есть  $P_{u1}$ » есть  $\tau_{P_{u1}} \leftrightarrow$  « $\Delta u_k$  есть  $C_1$ » (это называют определением значения истинности).

Нечеткое множество  $C_1$  определяем следующим выражением:

$$\mu_{C_1}(\Delta u_k) = \mu_{P_{u1}}(\mu_{P_1}(\Delta u_k)). \quad (8)$$

Используя вышенаписанные определения, определим нечеткое множество  $C_1$  задающих величин  $\Delta u_k$  для случая, когда относительно отклонения  $e_k$  от заданного значения имеется нечеткая информация. Аналогично определяем  $\mu_{C_i}$  ( $i = 2 \dots 6$ ) для ЛПУ 2–ЛПУ 6. Функция принадлежности  $C$  величины  $\Delta u_k$  при объединении правил находится с помощью формулы

$$\mu_C(\Delta u_k) = \min_i \mu_{C_i}(\Delta u_k). \quad (9)$$

## Системы навигации и управления...

Однако, поскольку на выходе контроллера необходимо получить четкое значение, в качестве задающей величины определяем значение, удовлетворяющее следующему выражению:

$$\mu_C(\Delta u_k^*) = \sup_{\Delta u_k \in U} \mu_{C_i}(\Delta u_k), \quad (10)$$

где  $U$  – полное множество задающих величин.

На практике при проектировании НК системы управления тормозными моментами к колесу в качестве входной информации используем четкие значения. Задающую величину  $\Delta u_k^*$  для этого случая находим следующим образом:

$$\begin{cases} \mu_{P_i}(e_i) = \frac{1}{\pi} \arctg(d_i \cdot e_i) + 0,5, \\ \mu_{N_i}(e_i) = \frac{1}{\pi} \arctg(-d_i \cdot e_i) + 0,5, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3. \quad (11)$$

Пусть  $e_1 = e$ ,  $e_2 = \Delta e$ ,  $e_3 = \Delta^2 e$ . Функция принадлежности предпосылки (см. рис. 1) для  $e$  имеет вид, где

$$d_i = \operatorname{tg}(0,45\pi)/a_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (12)$$

Функция принадлежности заключения имеет вид:

$$\begin{cases} \mu_{P_{u1}}(\Delta u) = \frac{1}{2b_i} \Delta u + 0,5, \\ \mu_{N_i}(\Delta u) = -\frac{1}{2b_i} \Delta u + 0,5, \end{cases} \quad i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

С помощью процедур 1–3 нечеткого вывода определяем нечеткое множество  $C$  задающих величин (рис. 2) [3]. Таким образом, если точки пересечения  $\Delta u_1$ ,  $\Delta u_2$ ,  $\Delta u_3$  всех функций принадлежности выразить в виде

$$\begin{cases} \Delta u_1 = \frac{1}{\pi} \{ \arctg(d_1 e_k) + \arctg(d_2 \Delta e_k) \} / (g_1 + g_2), \\ \Delta u_2 = \frac{1}{\pi} \{ \arctg(d_2 \Delta e_k) + \arctg(d_3 \Delta^2 e_k) \} / (g_2 + g_3), \\ \Delta u_3 = \frac{1}{\pi} \{ \arctg(d_3 \Delta^2 e_k) + \arctg(d_1 e_k) \} / (g_3 + g_1), \end{cases} \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

где  $g_i = 1/(2b_i)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , то

$$\Delta u_k^* = \operatorname{medium} \{ \Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3 \}, \quad (15)$$

где  $\operatorname{medium}$  означает среднее значение.

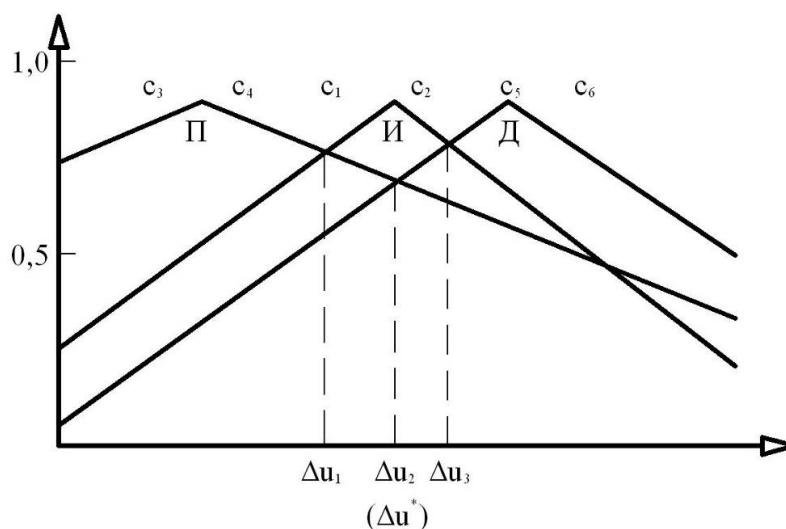


Рис. 2. Функция принадлежности задающей величины

Задающая величина  $\Delta u_k^*$ , полученная из формул (14) и (15), выражена двумя линейными связями относительно  $\arctg(d_1 e_k)$ ,  $\arctg(d_2 \Delta e_k)$  и  $\arctg(d_3 \Delta^2 e_k)$ , а относительно  $e_k$ ,  $\Delta e_k$  и  $\Delta^2 e_k$  – нелинейной связью. Поэтому считаем, что НК – это нелинейный ПИД-контроллер [4].

### Выводы

Разработана методика формирования алгоритма управления тормозным моментом на основе принципов нечеткой логики, включающая этапы описания системы; offline-оптимизации; online-оптимизации и реализации. Обоснованы лингвистические переменные для реализации нечеткого контроллера, описываемые арктангенциальными и S-функциями принадлежности. Разработанная методика рекомендуется при проектировании тормозной (антиюзовой) системы в военно-транспортной авиации.

### Литература

1. Маэда, М. Проектирование нечетких логических контроллеров / М. Маэда, С. Мураками // Сборник научных трудов технологического института Кюсю. – 1984. – Вып. 49. – С. 43–51.
2. Tsukamoto, Y. Fuzzy logic based on Lukasiewicz logic and its application to diagnosis and control: Doctoral dissertation of T.I.T. / Y. Tsukamoto, 1979.
3. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Вамада, С. Иваи и др. – М.: Мир, 1993. – 342 с.
4. Druckluftanlagen für Nutzfahrzeuge 1. Grundlagen, Systeme und Pläne: Mit ABS/ASR und EBS. Technische Unterrichtung von Robert Bosch GmbH und Horst Bauervon Christiani, Konstanz – ATZ/VNZ – Fachbuch, 1998.

**Торопов Александр Николаевич**, канд. техн. наук, старший преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске.

**Панферов Сергей Владимирович**, канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске; tgsiv@mail.ru.

**Тренин Николай Александрович**, канд. воен. наук, начальник кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске; treninnickolai76@rambler.ru.

Поступила в редакцию 4 октября 2016 г.

DOI: 10.14529/ctcr170112

## FUZZY CONTROLLER BRAKE FOR MODERNIZATION OF IL-76

**A.N. Toropov,**

**S.V. Panferov,** tgsiv@mail.ru,

**N.A. Trenin,** treninnickolai76@rambler.ru

Military and Air Academy Named by Professor N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin,  
Chelyabinsk Branch, Chelyabinsk, Russian Federation

We consider the option of upgrading the brake system of the aircraft IL-76 and the method of forming the algorithm of anti-skid system. Due to the fact that the aircraft was designed for a long time and the current brake force distribution scheme sufficient, but outdated, the use of aircraft in

military operations requires constant perfections of his flight and tactical characteristics, so the idea of modernization of anti-skid automatics is quite relevant. Generally, the problem is solved by introduction of the electronic computer with complex system of data collection and parameters of the aircraft and a runway in an executive part of the brake system. An algorithm for the formation and distribution of braking forces on the basis of the fuzzy controller, which is necessary to describe the linguistic variables and using fuzzy inference to calculate the predetermined value, which is through the digital-to-analog converter post-pit on the actuator. The results can be used in projection and modernization of the algorithm of the brake (anti-skid) system in the military transport aircraft.

*Keywords: aircraft brake system, anti-skid automatics, fuzzy controller, linguistic control rules, selection of braking torque, braking torque distribution between the wheels of the aircraft.*

### References

1. Maeda M., Murakami S. *Proektirovanie nechetkikh logicheskikh kontrollerov* [Design of Fuzzy Logic Controllers]. *Coll. Of Scientific Works of Institute of Technology Kyusyu*, 1984, vol. 49, pp. 43–51.
2. Tsukamoto Y. *Fuzzy Logic Based on Lukasiewicz Logic and its Application to Diagnosis and Control*: Doctoral Dissertation of T.I.T., 1979.
3. Asai K., Vatada D., Iwai S. et al. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied Fuzzy Systems]. Moscow, Mir Publ., 1993. 342 p.
4. *Druckluftanlagen für Nutzfahrzeuge 1. Grundlagen, Systeme und Pläne: Mit ABS / ASR und EBS*. Technische Unterrichtung von Robert Bosch GmbH und Horst Bauervon Christiani, Konstanz – ATZ / VNZ – Fachbuch, 1998.

*Received 4 October 2016*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Торопов, А.Н. Нечеткий контроллер для модернизации тормозной системы самолета Ил-76 / А.Н. Торопов, С.В. Панферов, Н.А. Тренин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 112–118. DOI: 10.14529/ctcr170112

### FOR CITATION

Toropov A.N., Panferov S.V., Trenin N.A. Fuzzy Controller Brake for Modernization of IL-76. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 112–118. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170112