

УДК 629.7.062.5(075)

# ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ АНТИЮЗОВОЙ АВТОМАТИКИ

**А. С. Коновалов,**

д-р техн. наук

**П. Е. Шумилов,**

канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

*Нечеткая логика уже получила широкое признание в задачах управления сложными системами. В настоящей статье рассматриваются возможности использования нечеткой логики для синтеза регулятора систем антиюзовой автоматики, характеризующихся наличием существенных нелинейностей и высоким порядком математической модели объекта управления и представляющих существенные сложности для классических методов синтеза регулятора, обеспечивающего эффективное торможение в различных условиях.*

*Fuzzy logic has been already widely recognized in complex system control. Aircraft antilock braking system (ABS) is a typical task for fuzzy logic, combining a number of significant non-linearities with high order of mathematical model of control object. For classical synthesis methods it is difficult to design an ABS regulator, which would have provided effective control in various braking conditions.*

## Введение

Проблема эффективного торможения существует практически для всех колесных транспортных средств, которые должны иметь возможность остановиться за определенное время или на определенном отрезке пути. Особое значение эта проблема имеет для самолетов и автомобилей, используемых для перевозки людей.

Остановка осуществляется посредством создания тормозной силы, препятствующей движению и преобразующей кинетическую энергию самолета или автомобиля в другие виды энергии: в тепло, рассеиваемое колесными тормозами и шинами, или, например, в электроэнергию при рекуперативном торможении электромобилей.

В большинстве случаев колесные тормоза являются основным источником тормозной силы. Для автоматического управления торможением колес предназначены системы антиюзовой автоматики (САА), задачей которых является обеспечение эффективного и безопасного торможения с предупреждением блокирования колес и поддержанием коэффициента сцепления колес с опорной поверх-

ностью (взлетно-посадочной полосой или дорожным покрытием) на максимально возможном уровне.

Начало активных исследований по созданию САА приходится на 1940-е годы, когда существенно возросшие взлетно-посадочные скорости самолетов потребовали изменений в конструкции шасси и более интенсивного использования колесных тормозов. Проблемы надежности конструкции шасси при переходе на трехопорную схему шасси с поворотным носовым колесом были успешно решены М. В. Келдышем в 1945 г. в ставшей классической работе «Шимми носового колеса трехопорного шасси» [1]. Проблема же создания высокоэффективных систем торможения не теряет своей актуальности и сегодня.

Необходимость автоматизации управления процессом торможения особенно актуальна в авиации, поскольку летчику во время посадки, находясь в кабине на значительном расстоянии от тормозных колес, практически невозможно определить состояние колес и эффективно управлять тормозным моментом. Поэтому первые САА появились в авиации (первая механическая САА была разработана корпорацией «Boeing» в 1947 г.), хотя изучением

движения колес автомобилей ученые занимались еще с конца XIX в.

На коммерческий автомобильный рынок САА, более известные как антиблокировочные системы (АБС), вышли лишь в 1966 г. (модифицированный вариант авиационной САА Maxaret фирмы «Dunlop» был установлен на первом серийном полноприводном автомобиле Jensen FF), но из-за технической сложности и высокой стоимости эти системы получили признание и стали входить в стандартную комплектацию автомобилей только с середины 1980-х годов. На сегодняшний день более половины производимых автомобилей оборудуются САА, которые, однако, постепенно утрачивают собственное значение и все в большей степени рассматриваются как часть общей системы безопасности автомобиля, включающей также антипробуксовочную систему, систему курсовой устойчивости и другие системы.

### Динамика торможения

В общем случае динамика колеса может быть описана системой нелинейных дифференциальных уравнений, отражающих его упругие и демпфирующие свойства при изменении нагрузки на колесо и проезде неровностей [2]:

$$\begin{cases} M_{сц} = [F_N + F_d][R_0 - \delta_{пн}](\mu + \Delta\varphi); \\ \Delta\ddot{\varphi} = -\frac{J_k + J}{J_k J} [C_\varphi \Delta\varphi + q_\varphi \Delta\dot{\varphi}] + \frac{1}{J} M_{сц} + \frac{1}{J_k} M_T; \\ \dot{\omega}_k = \frac{1}{J_k} [C_\varphi \Delta\varphi_k + q_\varphi \Delta\dot{\varphi} - M_T], \end{cases} \quad (1)$$

где  $M_{сц}$  — момент сцепления колеса с опорной поверхностью, Н·м;  $F_N$  — нормальная реакция пневматика колеса на обжатие, Н;  $F_d$  — демпфирующая составляющая реакции пневматика колеса на обжатие, Н;  $\delta_{пн}$  — осредненное по длине контакта обжатие пневматика, м;  $R_0$  — радиус необжатого пневматика колеса, м;  $\Delta\varphi$  — угол закручивания наружной части пневматика относительно центральной, рад;  $\omega_k$  — угловая скорость вращения центральной части пневматика и обода колеса (измеряемая датчиком скорость вращения колеса), рад/с;  $J_k$  — момент инерции центральной части пневматика колеса с ободом и тормозом, Н·м·с<sup>2</sup>;  $J$  — момент инерции наружной части пневматика колеса, Н·м·с<sup>2</sup>;  $C_\varphi$  — тангенциальная жесткость пневматика колеса, Н·м;  $q_\varphi$  — коэффициент демпфирования пневматика колеса в тангенциальном направлении, Н·м·с;  $M_T$  — тормозной момент на колесе, Н·м;  $\mu$  — коэффициент сцепления пневматика колеса с опорной поверхностью.

Без приложения тормозного момента угловая скорость колеса определяется поступательной скоростью его оси, и тормозная сила практически отсутствует в силу малости коэффициента трения качения.

Если к колесу прикладывается тормозной момент, то колесо начинает двигаться с некоторым проскальзыванием относительно опорной поверхности и сцепление колеса с опорной поверхностью в данном случае можно рассматривать как трение скольжения [2]. При рассмотрении движения колеса большее практическое значение имеет не скорость колеса, а его скольжение  $s$  (относительное проскальзывание), которое при постоянной нормальной нагрузке на колесо определяет коэффициент сцепления колеса с поверхностью ВПП. Скольжение представляет собой относительную разность поступательной скорости оси колеса и тангенциальной скорости точек на наружной поверхности колеса [2]:

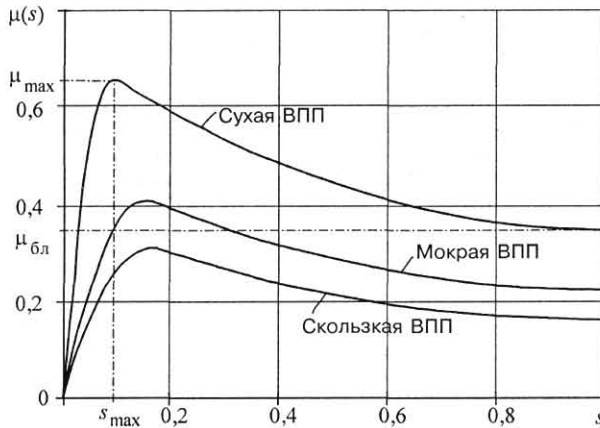
$$s = 1 - \frac{V_x}{V_t}, \quad (2)$$

где  $V_x$  — поступательная скорость колеса, т. е. линейная скорость оси колеса относительно опорной поверхности, м/с;  $V_t$  — тангенциальная скорость колеса, которой обладает точка, расположенная на наружной поверхности колеса, м/с.

Зависимость коэффициента сцепления  $\mu$  от скольжения колеса  $s$  для различных состояний твердой опорной поверхности приведена на рис. 1 [2, 3, 4]. Свободному качению колеса соответствует нулевое скольжение, а полному блокированию (юз) соответствует  $s = 1$ . Эта зависимость является основной нелинейностью в контуре управления САА и во многом определяет специфику систем данного типа. Максимальный коэффициент сцепления обеспечивается при значении тормозного момента, равном проворачивающему моменту (моменту сцепления колеса с опорной поверхностью) и зависит от многих факторов, включая материал и состояние опорной поверхности, давление в шине и скорость колеса. Движение колеса на правом склоне характеристики сцепления неустойчиво, и при достижении максимального коэффициента сцепления  $\mu_{max}$  начинается быстрое увеличение скольжения колеса и уменьшение коэффициента сцепления. Вопреки распространенному мнению, торможение с заблокированными колесами (юзом) не является наиболее эффективным торможением. При юзе уменьшается не только продольный коэффициент сцепления (до значения  $\mu_{бл}$ ), но и поперечный коэффициент сцепления, что помимо увеличения тормозного пути приводит также к резкому снижению устойчивости и заносу самолета или автомобиля.

Зависимость коэффициента сцепления от скорости колеса определяется экспериментально, при этом параметры этой зависимости непостоянны и зависят от типа шины и давления в ней, от состояния протектора пневматика и скорости колеса. Обычно при моделировании процесса торможения учитывается влияние на характерные точки зависимости  $\mu(s)$  ( $\mu_{max}$ ,  $\mu_{бл}$ ,  $s_{max}$ ) нормированной нагрузки на колесо и путевой скорости движения оси колеса [2].

При рассмотрении систем торможения и оценке эффективности САА помимо описания динамики



■ Рис. 1. Зависимость коэффициента сцепления от скольжения для различных состояний твердой опорной поверхности (взлетно-посадочной полосы)

колеса необходимо также учитывать динамику и нелинейности исполнительного устройства (гидравлического или пневматического), нестационарность параметров системы торможения, наличие случайных возмущений в виде неровностей опорной поверхности и флуктуаций коэффициента сцепления.

Динамика исполнительного устройства при моделировании автомобильных САА обычно аппроксимируется аperiодическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием. Точность такой аппроксимации достаточна, поскольку длина трубопроводов и инерционность тормозных дисков автомобиля невелики.

В отличие от автомобильных, авиационные тормозные системы (рис. 2) имеют гораздо более мощные гидроусилители, длинные гидролинии и массивные тормоза, см. 3-ю сторону обложки. Поэтому математическая модель исполнительного устройства авиационных САА должна включать описание динамики движения жидкости в гидролиниях, переменную жесткость силовых тормозных цилиндров и гистерезис многодискового фрикционного тормоза.

Кроме того, при анализе эффективности авиационной САА следует учитывать взаимное влияние динамических параметров контура управления САА

и летательного аппарата: при работе тормозной системы всегда существует опасность возникновения резонансных раскачиваний самолета по тангажу и автоколебаний стойки шасси и колесной тележки, что сопровождается резким снижением эффективности торможения и приводит к разрушению элементов конструкции самолета.

Несмотря на многообразие подходов и технических решений, можно составить обобщенную структуру современной САА, которая состоит из перечисленных ниже основных структурных элементов (рис. 3) [2].

- Датчики первичной информации поставляют в электронный блок управления БУ информацию о параметрах движения объекта управления; обычно в качестве датчиков первичной информации используются датчики угловой скорости ДУС, измеряющие угловую скорость тормозных колес  $\omega_{т,к}$ , и датчики тормозного давления ДД, измеряющие тормозное давление  $P_T$ .

- Для вычисления скольжения тормозного колеса необходима информация о продольной скорости движения оси колеса или угловой скорости нетормозного колеса («свободной скорости»). В большинстве случаев эта информация отсутствует, и для ее оценки используются специальные алгоритмы, определяющие свободную скорость исходя из угловой скорости и ускорения тормозных колес. Также возможны варианты оценки свободной скорости с помощью датчиков угловой скорости нетормозного колеса на носовой стойке шасси самолета или акселерометра, измеряющего горизонтальное ускорение самолета или автомобиля (такое решение довольно широко применяется в автомобильных САА).

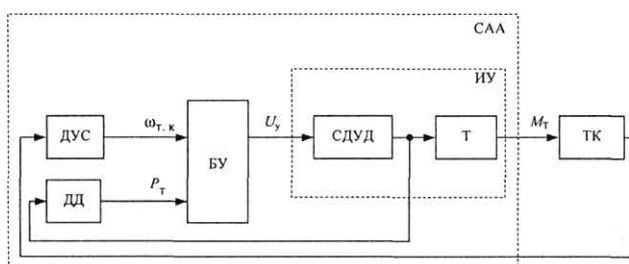
- На основе текущей информации о динамике колес и тормозном давлении блок управления в соответствии с принятым законом управления вырабатывает сигнал управления  $U_y = f(U_{\omega_{т,к}}, U_{P_T})$ , управляющий работой исполнительного устройства ИУ.

- Исполнительное устройство формирует тормозной момент  $M_T$ , прикладываемый к тормозному колесу, в соответствии с сигналом управления  $U_y$ ; ИУ обычно состоит из системы дистанционного управления давлением СДУД и фрикционного тормоза Т.

### Специфика САА

При разработке регуляторов САА возникают определенные сложности, не типичные для обычных систем регулирования и ограничивающие возможности классических методов синтеза регулятора.

САА отличается от классических следящих систем, систем стабилизации и систем программного управления невозможностью непосредственного и точного формирования заданного значения регулируемой координаты вследствие невозможности для регулятора САА определить параметры характеристики сцепления и измерить текущее



■ Рис. 3. Обобщенная структурная схема системы антиюзовой автоматики

значение коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью. Для формирования заданного значения скольжения тормозного колеса необходимо иметь информацию о свободной скорости, которая в большинстве случаев недоступна и может быть оценена лишь приближенно.

САА должна работать в области максимума характеристики сцепления с минимизацией времени нахождения тормозного колеса на правом склоне кривой  $\mu(s)$  для обеспечения поперечной устойчивости колес и снижения износа шин.

Поведение колеса на правом склоне характеристики сцепления неустойчиво, соответственно для предотвращения блокирования колеса требуется высокое быстродействие регулятора САА.

Система функционирует в условиях высокого уровня внешних возмущений, имеющих случайный характер. Параметры объекта управления САА (включая нагрузку на колесо, аэродинамические характеристики, реализуемый тормозами тормозной момент) нестационарны и меняются в процессе торможения.

Процесс торможения скоротечен (обычно не более 30 с при посадке самолета), а следующее торможение часто происходит при других параметрах объекта управления и характеристиках опорной поверхности.

В большинстве случаев регулятору САА доступны для измерения только две координаты: угловая скорость тормозного колеса и давление в гидросистеме. При этом высокий уровень случайных возмущений ограничивает возможности использования производных угловой скорости второго и более высоких порядков. В автомобильных САА в связи с широким распространением других систем автоматики (таких как круиз-контроль, автоматическое управление подвеской и двигателем) могут быть доступны и другие координаты, повышающие точность оценки коэффициента сцепления и скольжения. В авиационной, однако, обоснованием для установки дополнительных датчиков может быть только очень существенное повышение эффективности САА при их использовании.

### **Синтез регулятора САА на основе нечеткой логики**

САА относятся к системам управления, для которых можно создать в достаточной степени адекватную математическую модель объекта управления, но сложность этой модели, а также недостаточность и неопределенность доступной регулятору информации не позволяют использовать классические аналитические методы синтеза регулятора. В то же время в последние десятилетия активно развиваются методы интеллектуального управления, включающие теорию нечетких множеств и нечеткую логику, теорию возможностей, искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы.

Особенно удачно в задачах управления сложными и нелинейными системами в условиях неопределенности зарекомендовало себя управление

с использованием нечеткой логики, позволяющее реализовать простые, но робастные решения, покрывающие широкий диапазон возможных изменений параметров объекта и справляющиеся со значительными возмущениями [7].

Одним из основополагающих принципов, приведших к появлению интеллектуальных технологий управления, и в частности нечеткого управления, является «принцип несовместимости», согласно которому «...сложность системы и точность, с которой ее можно анализировать, обратно пропорциональны в первом приближении», и, следовательно, «... по мере того, как сложность возрастает, точные утверждения теряют значимость, а значимые утверждения теряют точность» [5, 6].

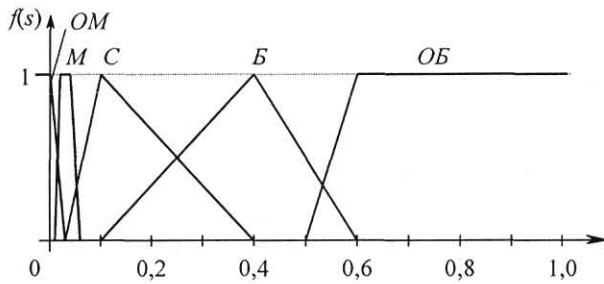
Алгоритмы управления большинства САА построены в основном на основе экспериментального опыта и результатов моделирования и испытаний. Лингвистическое представление закона управления в этом случае наиболее эффективно, делая его прозрачным для эксперта и позволяя легко изменять и подстраивать алгоритм работы системы. В отличие от других систем управления, основанных на знаниях, нечеткой логике, для того чтобы охарактеризовать определенное состояние объекта, требуется меньшее количество правил управления, так как сам алгоритм нечеткого вывода производит интерполяцию для каждой конкретной ситуации.

В случае авиационных САА, учитывая динамические характеристики исполнительного устройства, целесообразно использовать двухконтурную схему регулятора САА, в которой быстродействующий контур резко сбрасывает тормозное давление при большом скольжении колеса, а медленнодействующий контур подстройки тормозного давления представляет собой нечеткий регулятор, сигнал управления на выходе которого определяет скорость изменения тормозного давления.

Для формирования закона управления входные координаты регулятора САА (обычно это скольжение и угловое ускорение тормозного колеса) разбиваются на несколько нечетких переменных, различные сочетания которых характеризуют текущее состояние объекта управления, а также позволяют судить о соответствующем изменении сигнала управления.

Параметры функций принадлежности нечетких переменных вследствие сложности объекта управления определяются с привлечением знаний эксперта и по результатам моделирования процесса торможения. Дальнейшая оптимизация функций принадлежности может осуществляться с помощью методов численной оптимизации, причем, принимая во внимание сложность объекта управления и наличие существенных нелинейностей в контуре управления, для этой цели наиболее подходящим представляется использование генетических алгоритмов.

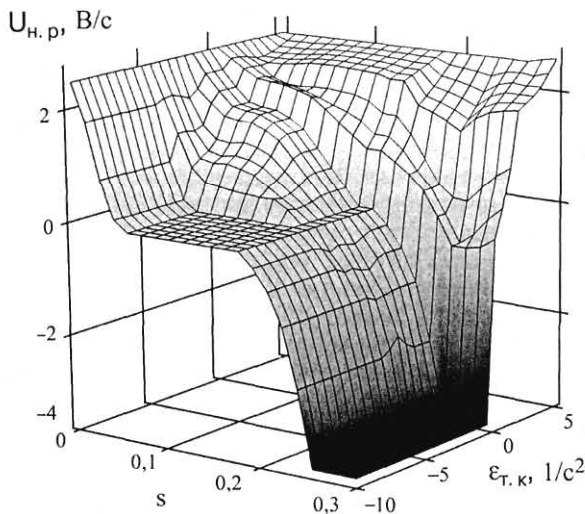
Таким образом, лингвистическая переменная скольжения может быть разбита на пять нечетких переменных: «очень малое», «малое», «среднее», «большое», «очень большое». Очень малое скольже-



■ Рис. 4. Функции принадлежности нечетких переменных скольжения (ОМ — очень малое; М — малое; С — среднее; Б — большое; ОБ — очень большое)

ние ( $s \approx 0$ ) соответствует качению колеса без тормозного момента. Малое скольжение соответствует диапазону, в котором находится оптимум скольжения при высоком коэффициенте сцепления ( $s \approx 0,1$ ), а среднее скольжение ( $s \approx 0,18$ ) — оптимуму при малых коэффициентах сцепления. Большое скольжение соответствует диапазону ( $s \approx 0,3$ ), в котором следует сбрасывать давление, чтобы вернуть скольжение к оптимальному значению. Очень большое скольжение ( $s > 0,35$ ) свидетельствует о юзе колеса и требует максимального сброса давления. Функции принадлежности значений нечетких переменных скольжения тормозного колеса представлены на рис. 4.

Аналогичным образом определяются нечеткие переменные углового ускорения колеса и сигнала управления регулятора. База правил регулятора составляется экспертом и описывает различные ситуации, в которых может находиться тормозное колесо, и необходимый при этом сигнал управления, который будет выводить колесо на максимальное значение коэффициента сцепления. Полученная в результате зависимость сигнала управления



■ Рис. 5. Сигнал управления нечеткого регулятора САА  $U_{н.р}(s, \epsilon_{т.к})$

■ Таблица

Состояние ВПП	Максимальное значение коэффициента сцепления	Реализуемое значение коэффициента сцепления	
		Среднестатистическая оценка [10]	Моделирование САА с нечетким регулятором
Сухо	0,65–0,80	0,2–0,3	0,35
Мокро	0,4–0,5	0,07–0,1	0,26–0,32
Слякоть, мокрый снег	0,30–0,35	0,05–0,07	0,21–0,24

нечеткого регулятора от скольжения и углового ускорения тормозного колеса показана на рис. 5.

Как показывает практика, во многих случаях алгоритмы управления, построенные на основе нечеткой логики, достаточно робастны и обеспечивают стабильное качество регулирования при значительных изменениях параметра объекта управления и внешних воздействиях. Однако при функционировании САА характеристики сцепления меняются очень существенно, и для расширения диапазона эффективной работы регулятора САА необходимо использовать механизмы адаптации к изменяющемуся коэффициенту сцепления. Наиболее подходящим в данном случае может быть применение метода декомпозиции закона управления [8, 9], при котором для существенно различных состояний поверхности ВПП (сухой, мокрой, скользкой) синтезируется свой нечеткий регулятор или своя база правил управления. Для вычисления результирующего сигнала управления также используется система нечеткого вывода, которая в зависимости от состояния ВПП отдает приоритет тому или иному нечеткому регулятору. Косвенная и приближенная оценка состояния ВПП может выполняться по величине сигнала управления регулятора САА, осредненного за предшествующий отрезок времени. Благодаря использованию нечеткой системы для выбора наиболее подходящего нечеткого регулятора обеспечивается плавное и постепенное переключение с одного регулятора на другой, а регулятор САА сохраняет высокую эффективность в различных условиях торможения.

Как показывают результаты моделирования, регулятор САА с использованием нечеткой логики позволяет не только повысить средний реализуемый коэффициент сцепления, но и существенно снизить количество юзов колес даже при торможении в плохих условиях сцепления, в том числе и на ВПП с переменным коэффициентом сцепления (на «миксте»).

Для иллюстрации эффективности нечеткого регулятора САА в таблице приведены значения среднего за время послепосадочного пробега коэффициента сцепления, реализуемого САА, используемые в работе [10] для приблизительных расчетов длины пробега различных моделей существующих самолетов и полученные в результате моделирования процесса торможения с нечетким регулятором для самолета типа Ил-86.

## Выводы

Применение нечеткой логики в авиационных системах антиюзовой автоматики повышает эффективность системы торможения самолета, обеспечивая высокий коэффициент сцепления и снижая число юзов колес в различных условиях торможения. Тем

самым сокращается тормозной путь, повышается устойчивость самолета на пробеге и уменьшается износ пневматиков тормозных колес, благодаря чему повышается безопасность посадки самолета, а также увеличивается ресурс колес шасси и тормозной системы в целом, что позволяет говорить и о повышении экономической эффективности полетов.

## Литература

1. **Келдыш М. В.** Шимми переднего колеса трехопорного шасси // Тр. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского. — Вып. 564. — М.: Изд-во Бюро новой техники НКАП, 1945. — 34 с.
2. **Богачева Н. А., Жуков А. Д., Коновалов А. С.** Авиационные системы антиюзовой автоматики: Учеб. пособие. — СПб.: СПбГУАП, 1999. — 84 с.
3. **Yager T.** Aircraft and Ground Vehicle Winter Runway Friction Assessment. — NASA Technical Memorandum NASA/TM. — 1999-209142, 1999. — 12 p.
4. **Von Altrock C.** Fuzzy Logic in Automotive Engineering//Circuit Cellar. — 1997. — Issue 88. — P. 12-27.
5. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 165 с.
6. **Ерофеев А. А., Поляков А. О.** Интеллектуальные системы и технологии // Матер. второй междунар. конф. «Логико-лингвистическое управление динамическими объектами DOLLC'99». 21-25 июня 1999 г. — СПб., 1999. — С. 20-25.
7. **Васильев С. Н.** От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2001. — № 2. — С. 5-22.
8. **Бураков М. В., Коновалов А. С.** Декомпозиция закона управления // Управление в условиях неопределенности / Под ред. А. Е. Городецкого. — СПб.: СПбГТУ, 2002. — 398 с.
9. **Бураков М. В.** Механизм адаптации нечеткого регулятора // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 1998. — № 1. — С. 84-87.
10. **Гилерсон А. Г.** Эффективность реверсивных устройств при торможении самолетов. — М.: Машиностроение, 1995. — 192 с.
11. **Layne J. R., Passino K. M., Yurkovich S.** Fuzzy Learning Control for Antiskid Braking Systems // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 1993. — Vol. 1. — N 2. — P. 122-129.
12. **Takahashi H., Ishikawa Y.** Antiskid Brake Control System Based on Fuzzy Inference: U. S. patent US4842342, 1989.
13. **Yen Edge C., Roan G. K., Ton J. H.** Fuzzy Controller for Anti-Skid Brake System: U.S. patent US5416709, 1995.
14. **Mertens A.** Anti Lock System for a Vehicle Electromechanical Brake System Based on a Fuzzy Controller: Patent EP0985586, 2000.
15. **Becker R., Cao C.-T., Belzner U., Moeler T.-W., Lieberoth-Leden B.** System for Controlling Brake Pressure Based on Fuzzy Logic Using Steering Angle and Yaw Speed: U.S. patent US5634698, 1997.
16. **Wiel C. T.** Fuzzy Logic Antiskid Control System for Aircraft: U.S. patent US6088646, 2000.

# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПОЛИТЕХНИКА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ

**Ляликов А. П.**

Трактат об искусстве изобретать. — СПб.: Политехника, 2002. — 416 с.: ил.

В книге изложены основные аспекты — философский, исторический, психологический, системный и эвристический — важнейшей отрасли общечеловеческой культуры, которая является источником и основой бытия, личного и социального, — технического творчества.

Книга предназначена для широкого круга читателей: от учащихся и студентов до умудренных жизнью и размышлениями о ее сущности специалистов, собирающихся изобретать, уже изобретающих и даже совсем никогда и ничего не изобретавших.

