

УДК 681.3

Б. Г. ИЛЬЯСОВ, Ю. В. СТАРЦЕВ, К. Э. ГОЛОВАЦКИЙ, Б. М. БЕЛАЛОВ**УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ
В УСЛОВИЯХ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ**

Рассматриваются вопросы управления автономными мобильными системами (АМС). Предложены алгоритмы стабилизации движения АМС относительно заданной сложной траектории и обхода препятствий, основанные на правилах нечеткой логики. Разработана система управления АМС, работоспособность которой проверена методом математического моделирования. Автономные мобильные системы; моделирование; динамическая модель; нечеткая логика; обход препятствия; система управления

КОНЦЕПЦИЯ

Сегодня для практического использования в различных областях техники и производства требуются роботы и робототехнические системы. Возрастает роль автономных мобильных систем (АМС), которые могут функционировать в условиях, опасных для жизнедеятельности человека. В связи с этим становится актуальной разработка алгоритмов управления АМС, основанных на современных достижениях теорий управления и искусственного интеллекта.

К решению проблем управления АМС в настоящее время привлечено внимание многих ученых и научных школ как в России, так и за рубежом. К их числу можно отнести вопросы планирования оптимальных траекторий движения АМС, стабилизации движения АМС относительно плановой траектории, оптимального маневрирования АМС в различных фазах движения (в том числе и при обходе препятствий), проблемы построения сенсорных систем АМС и систем обработки информации о состоянии внешней среды с целью формирования модели окружающей обстановки. Все задачи по обработке информации и принятию управляющих решений должны решаться бортовой аппаратурой АМС в реальном масштабе времени. В то же время широко используемый к настоящему времени аппарат оптимального управления не пригоден для решения в реальном времени задач по управлению сложными динамическими объектами, к которым могут быть отнесены все виды АМС, в условиях неопределенности и дефицита ресурсов. Однако в настоящее время существуют подходы, которые позволяют достаточно эффективно управ-

лять сложными динамическими объектами в условиях неопределенности в реальном времени. К ним относятся, например, системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта, в частности, реализованные в виде нечетких регуляторов или нейронных сетей.

Рассмотрим задачу управления АМС в следующей постановке. Пусть автономная мобильная система перемещается в некотором рабочем пространстве. Возможные перемещения АМС ограничены:

- границами рабочего пространства;
- неподвижными препятствиями, которые могут образовывать коридоры для разрешенных перемещений, а также тупики;
- подвижными препятствиями (например, в виде других подвижных объектов), местоположение и перемещения которых заранее неизвестны;
- подвижными препятствиями с известными законами изменения местоположения.

Требуется произвести синтез системы управления АМС, которая обеспечивала бы перемещение АМС из произвольного начального положения в произвольное конечное положение по оптимальной в смысле некоторого критерия траектории движения.

Предлагается общую задачу оптимального управления АМС решать путем ее расчленения на ряд частных задач, каждая из которых имеет меньшую сложность, чем общая задача. Некоторые из этих задач представляется возможным решать аппаратными средствами, что более всего соответствует требованиям управления в реальном масштабе времени. В качестве таких частных задач можно выделить:

- а) планирование траектории движения АМС из начальной точки в конечную;
- б) управление перемещением АМС между заданными точками плановой траектории;
- в) управление АМС при обходе препятствий, не учтенных при решении задачи планирования.

Планирование траектории движения АМС заключается в нахождении кратчайшего пути в ограниченном рабочем пространстве с известными препятствиями, связывающего начальное и конечное положения АМС. Это самостоятельная задача, которую обычно решают без связи с динамическими свойствами АМС. Плановая траектория может быть представлена в упрощенном виде — в форме отрезков прямых и дуг окружностей, проходящих по средним линиям коридоров, т. е. на одинаковом удалении от препятствий. При планировании траектории возможно учесть только неподвижные препятствия и такие подвижные препятствия, для которых известен закон изменения положения. Планирование траектории можно осуществить только один раз и затем реализовать движение АМС вдоль плановой траектории. Очевидно, что планирование траектории должно исключить возникновение тупиковых ситуаций при обходе неподвижных препятствий. Если же тупиковая ситуация возникает при обходе подвижного препятствия, то потребуется дополнительное решение задачи планирования траектории, но это решение будет инициировано только фактом возникновения тупиковой ситуации.

Задача управления перемещениями АМС между заданными точками плановой траектории и задача обхода препятствий тесно связаны между собой и представляют собой задачи траекторного управления подвижным объектом, обладающим определенными динамическими свойствами.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АМС

Для синтеза системы управления АМС и ее исследования необходимо иметь динамическую модель объекта управления. Динамическая модель должна описывать основные свойства АМС как объекта управления — инерционность поступательного и вращательного движений и зависимость характера движения от взаимодействия АМС с подстилающей поверхностью.

Будем считать АМС твердым телом, осуществляющим плоское движение по опорной поверхности. Как известно, любое плос-

кое движение твердого тела можно разложить на поступательное движение его характерной точки (например, центра масс) и вращательное движение тела вокруг вертикальной оси, проходящей через характерную точку. При этом характерная точка движется по некоторой траектории, а ориентация тела изменяется.

Пусть в рабочем пространстве определена глобальная система координат Oxy (рис. 1). Начало координат и направление осей Ox и Oy фиксированы в рабочем пространстве.

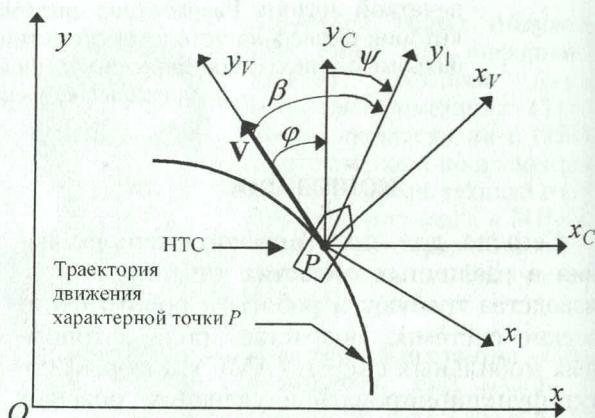


Рис. 1. Системы координат

Кроме глобальной, используются также следующие системы координат, привязанные к характерной точке АМС:

- стартовая система координат $Px_c y_c$: оси параллельны осям глобальной системы координат;
- связанная система координат $Px_1 y_1$: ось Px_1 совпадает с продольной осью АМС, ось Px_1 дополняет систему координат до правой;
- скоростная система координат $Px_V y_V$: ось Px_V совпадает с направлением вектора скорости АМС V и направлена по касательной к траектории движения характерной точки, ось Px_V дополняет систему координат до правой.

Стартовая система координат повернута относительно скоростной на угол курса φ . Связанная система координат повернута относительно скоростной системы на угол скольжения β , а относительно стартовой системы — на угол рысканья ψ . Связь между тремя углами, определяющими взаимные повороты систем координат, задается очевидным равенством: $\varphi = \beta - \psi$. Все повороты — вокруг вертикальной оси, перпендикулярной плоскости движения АМС. Положительное направление угла курса отмечено на

рис.1 стрелкой. Вектор скорости всегда направлен по касательной к траектории характерной точки.

В зависимости от того, как траектория движения АМС и его ориентация связаны с положением органов управления направлением движения (для колесных АМС — с углом поворота управляемых колес), динамические модели АМС можно разделить на два класса:

- модели с одной степенью свободы;
- модели с двумя степенями свободы.

Для моделей первого класса характерным является отсутствие скольжения АМС относительно опорной поверхности ($\beta = 0$). Траектория движения характерной точки представляет собой при фиксированном положении органов управления направлением движения дугу окружности, в частном случае — прямую. Вращение АМС вокруг вертикальной оси жестко связано с кривизной траектории и скоростью движения характерной точки. Ориентация АМС, задаваемая углом рысканья ψ , не может быть произвольной, а изменяется строго в соответствии с кривизной траектории. Моделями первого класса описывается, например, движение автомобиля при отсутствии проскальзывания колес относительно опорной поверхности. Единственной степенью свободы является перемещение характерной точки вдоль траектории.

Уравнения движения АМС в этом случае имеют следующий вид:

$$m \frac{dV}{dt} = F_T - F_R, \quad (1)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = f(R, V), \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \cos \varphi, \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \sin \varphi, \quad (4)$$

где m — масса АМС, V — модуль скорости характерной точки, F_T — сила тяги двигателя, F_R — сила сопротивления движению, R — радиус дуги траектории, $\varphi = \psi$.

Уравнение (1) описывает тангенциальное ускорение характерной точки АМС, уравнение (2) — угловую скорость вращения АМС вокруг характерной точки, уравнения (3) и (4) — скорости изменения линейных координат характерной точки в глобальной системе координат.

Для моделей второго класса характерно то, что АМС может скользить относительно опорной поверхности ($\beta \neq 0$). Примеры такого движения — автомобиль на скользкой до-

роге (проскальзывание колес по опорной поверхности) или аппарат на воздушной подушке, вообще не имеющий жесткой связи с опорной поверхностью. Для таких АМС траектория движения не связана жестко с положением органов управления направлением движения, а вращение АМС вокруг вертикальной оси может происходить произвольно, вне зависимости от траектории движения характерной точки. Ориентация АМС в процессе движения может быть произвольной. Очевидно, в этом случае АМС обладает двумя степенями свободы: перемещение характерной точки вдоль траектории и вращение АМС вокруг нее осуществляются независимо.

Уравнением тангенциального ускорения характерной точки по-прежнему является (1), а угловое ускорение вращения АМС вокруг нее определяется по формуле

$$J \frac{d^2\psi}{dt^2} = M_C - M_R, \quad (5)$$

где J — полный момент инерции АМС при его вращении вокруг вертикальной оси, M_C — управляющий момент, вызываемый отклонением органов управления направлением движения, M_R — момент сопротивления вращению АМС вокруг его вертикальной оси (демпфирующий момент).

Скорости изменения линейных координат характерной точки в глобальной системе координат определяются по (3), (4).

Из всего многообразия АМС различных типов приведем только модель четырехколесного автомобиля с передними ведущими колесами. В [1–3] можно найти уравнения для динамических моделей и других типов АМС. Динамическая модель переднеприводного автомобиля без скольжения имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} \left(m + \sum_{i=1}^4 \frac{J_{K_i}}{r_{K_i}^2} \right) = & \left(\frac{M_{\text{ном}} i_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТР}}}{r_K} \frac{h}{h_{\text{max}}} - \frac{J_{\text{ДВ}} i_{\text{ТР}}^2 \eta_{\text{ТР}}}{r_K^2} \frac{dV}{dt} \right) \times \\ & \times \cos \theta - \\ & - 2 \left(\frac{Q \xi l}{I_{\text{max}}} + Q f \cos \alpha \right) (1 + \cos \theta) - \\ & - mg \sin \alpha - (kF + D) V^2; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{V}{L \operatorname{ctg} \theta};$$

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \psi;$$

$$\frac{dy}{dt} = V \sin \psi,$$

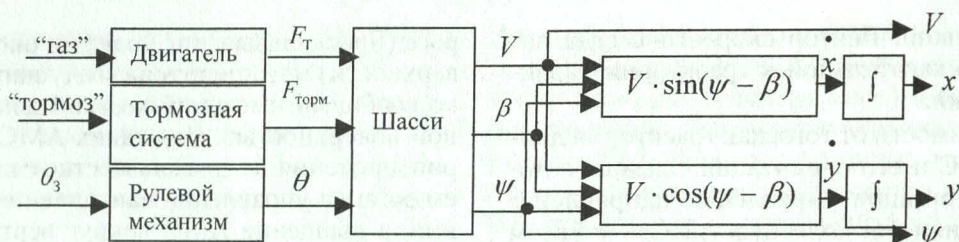


Рис. 2. Модель автомобиля как объекта управления: θ_3 — заданный угол поворота колес; $F_{\text{торм}}$ — сила торможения

где $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент двигателя, h — положение дроссельной заслонки, h_{max} — положение дроссельной заслонки при максимальном ее открытии, $i_{\text{тр}}$ — передаточное число трансмиссии, $\eta_{\text{тр}}$ — КПД трансмиссии, r_k — радиус колеса, $J_{\text{дв}}$ — момент инерции вращающихся частей двигателя, k — коэффициент обтекаемости АМС, F — площадь поперечного сечения АМС; D — суммарный коэффициент трения в узлах и механизмах, l_{max} — максимальный ход педали тормоза АМС, l — положение педали тормоза АМС, f — коэффициент сопротивления качению колеса, g — ускорение свободного падения, α — угол подъема дороги, Q — нормальная реакция дороги, действующая на колесо, ξ — коэффициент сцепления колес с дорогой, L — расстояние между передней и задней осями АМС, θ — угол поворота передних управляемых колес.

При скольжении движение автомобиля описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} \left(m + \sum_{i=1}^4 \frac{J_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^2} \right) &= \\ &= \sqrt{\Phi^2 + F_1^2 + 2\Phi F_1 \cos(\theta + \psi - \psi')} - \\ &\quad - 2Q\xi_{\text{ск}} \sin(\beta + \theta) - 2Q\xi_{\text{ск}} \sin \beta; \\ J \frac{d^2\psi}{dt^2} &= \frac{1}{2}(F_1 - F_2)L \sin \beta + \frac{1}{2}F_1 L \sin \theta; \\ \frac{dx}{dt} &= V \cos(\psi - \beta); \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin(\psi - \beta), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Phi = m \frac{dv'}{dt}$ — сила инерции, ψ' — угол рыскания автомобиля до входа в занос, v' — скорость автомобиля до входа в занос, $\xi_{\text{ск}}$ — коэффициент сцепления колес с дорогой при скольжении, F_1 — сила трения, приложенная к передней оси автомобиля, F_2 — сила трения, приложенная к задней оси автомобиля.

В общем виде модель автомобиля как объекта управления можно представить следующим образом (рис. 2).

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АМС

Рассмотрим задачу управления перемещениями АМС между заданными точками плановой траектории. Поскольку любую сложную плановую траекторию можно представить совокупностью отрезков прямых и дуг окружностей, эту задачу можно разбить на две: задачу стабилизации движения относительно прямой и задачу стабилизации движения относительно дуги окружности.

Схема положения АМС относительно прямой стабилизации представлена на рис. 3. Требуется перевести АМС из произвольного положения 1 в точку цели 2 вдоль прямой стабилизации 1–2.

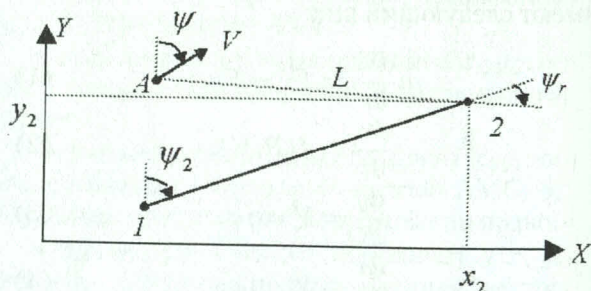


Рис. 3. Схема положения АМС относительно прямой стабилизации

Прямая стабилизации имеет наклон ψ_2 в глобальной системе координат. Угол ψ_r назовем углом ракурса, он описывает отклонение АМС от прямой стабилизации, L — расстояние от АМС до точки цели.

Как показали исследования [4], для эффективного управления АМС целесообразно применять интеллектуальные алгоритмы, основанные на правилах нечеткой логики.

Для нечеткого регулятора входными величинами удобно выбрать величины L , $\psi_2 - \psi$, ψ_r , которые вычисляются с использованием текущих координат АМС и координат

точки цели и описывают отклонение АМС от прямой стабилизации и точки цели. Величины требуемого угла поворота рулевых колес АМС θ_T и требуемой скорости движения V_T являются выходными параметрами нечеткого регулятора.

Для построения базы правил управления углом поворота управляющих колес АМС рассматривается множество всех возможных положений АМС относительно прямой стабилизации. Каждому положению должно соответствовать определенное значение угла поворота колес. При движении АМС ее положение меняется, что приводит к изменению задаваемого угла поворота колес. Таким образом, базой правил можно смоделировать желаемую траекторию движения АМС относительно прямой стабилизации из любой точки плоскости.

База правил нечеткого регулятора для вычисления скорости движения строится таким образом, что при движении АМС вдоль прямой стабилизации или при приближении к ней скорость движения возрастает, в противном случае снижается, повышая маневренность АМС. В качестве механизма вывода удобно использовать метод максимума-минимума [5]. Дефазификация выходных лингвистических переменных осуществляется методом центра тяжести. Полная база правил нечеткого регулятора скорости и угла поворота колес опубликована в [6].

Для решения задачи стабилизации движения АМС относительно дуги окружности можно использовать полученное решение задачи стабилизации относительно прямой (рис. 4).

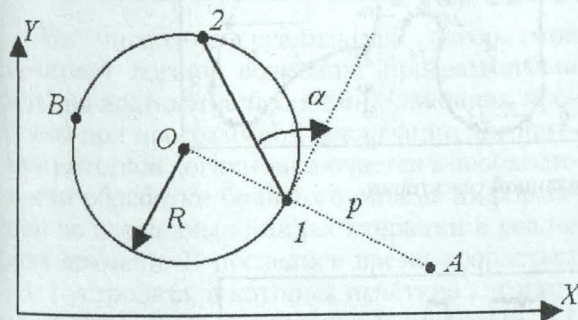


Рис. 4. Положение прямой стабилизации относительно дуги окружности

Прямая стабилизации 1–2 строится под углом α к касательной в точке пересечения дуги окружности и прямой, проведенной из точки А (текущего положения АМС) в точку О — центр окружности. При этом точка 2 пря-

мой стабилизации лежит на дуге окружности. Угол α находится следующим образом:

$$\alpha = k_1 \frac{p}{R} + \frac{k_2}{R}, \quad \alpha \leq 90^\circ,$$

где p — расстояние от точки А до точки 1; k_1 и k_2 — коэффициенты управления.

В процессе движения АМС касательная и прямая стабилизации меняют положение, заставляя АМС двигаться по дуге. Таким образом, задача проведения АМС вдоль заданной сложной траектории решается путем переключения законов управления на разных ее сегментах (прямых и дугах окружностей).

Для точного движения АМС вдоль заданной траектории необходимо согласовывать скорость движения при переходе от одного сегмента плановой траектории к другому. Это удобно сделать с использованием нечеткого регулятора, для которого входными величинами будут расстояние от точки положения АМС до точки перехода между сегментами и разность максимальных допустимых скоростей движения вдоль текущего сегмента и следующего. Максимальная допустимая скорость движения — это максимальная скорость, при которой АМС еще не теряет сцепления колес с дорогой, она зависит от радиуса кривизны траектории. Выходной величиной регулятора будет максимальная допустимая скорость $V_{\max \text{ тр}}$ в текущий момент времени.

Задача обхода препятствий решается путем корректировки управляющего воздействия θ_T , ведущего АМС вдоль заданной траектории, составляющей $\Delta\theta_T$, которую необходимо вычислить. При этом скорость АМС и угол поворота управляемых колес должны плавно изменяться в зависимости от обстановки (расстояния до препятствия и степени перекрытия им плановой траектории). Этого можно добиться с использованием алгоритмов нечеткой логики. Для нечеткого регулятора входными величинами будут расстояние до препятствия $L_{\text{п}}$ и необходимый угол отклонения от заданной траектории γ . Выходными параметрами будут допустимая скорость $V_{\max \text{ пр}}$ и корректирующая составляющая $\Delta\theta_T$.

Общий вид системы автоматического управления АМС показан на рис. 5. Здесь блок стабилизации движения реализует алгоритмы стабилизации движения относительно прямой и дуги окружности. Блок формирования допустимой скорости ограничивает

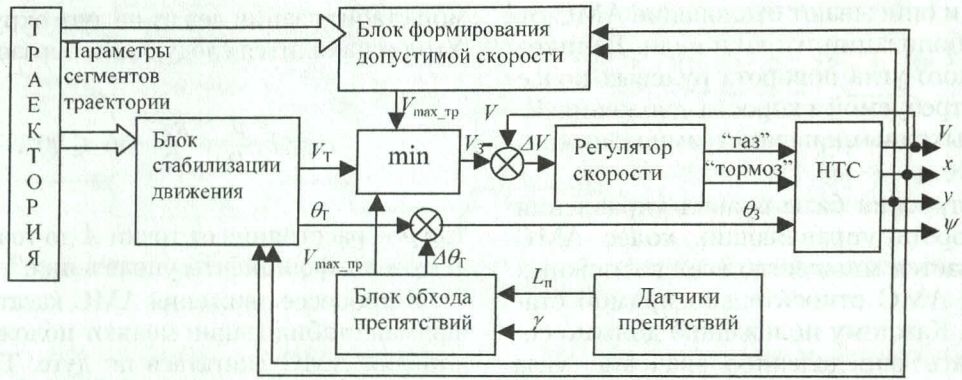


Рис. 5. Структурная схема системы управления АМС

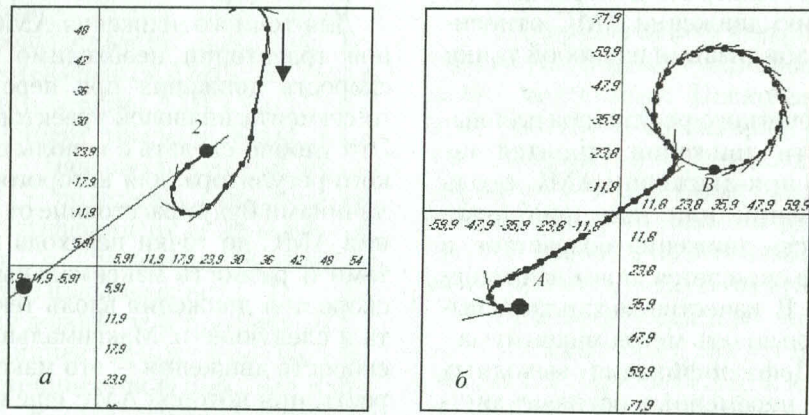


Рис. 6. Стабилизация движения АМС относительно прямой (а) и дуги окружности (б)

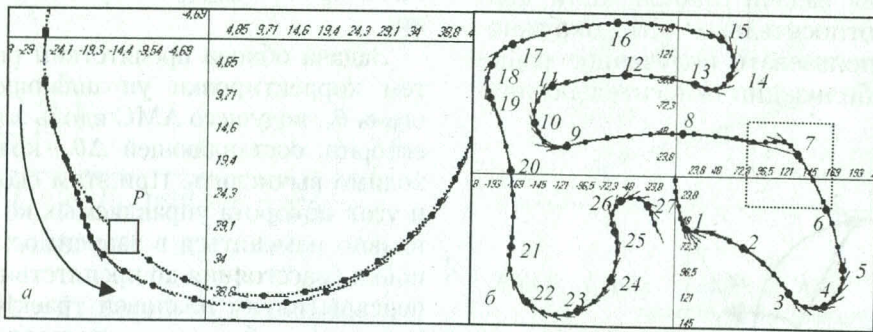


Рис. 7. Движение АМС по заданной траектории

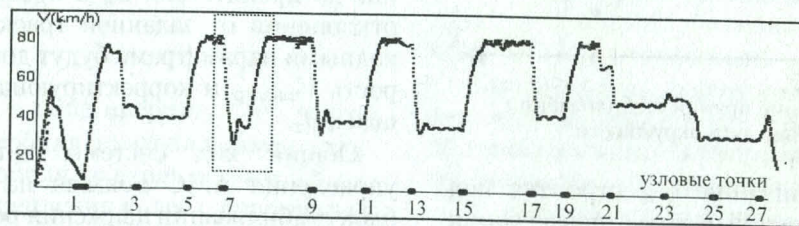


Рис. 8. График изменения скорости

скорость на переходных участках между различными сегментами траектории. Блок обхода препятствий корректирует скорость и отклонение органов управления направлением движения АМС при обходе препятствий. Регулятор скорости преобразует значение $\Delta V = V_3 - V$ в управляющие воздействия «газ» и «тормоз».

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Работоспособность синтезированной системы автоматического управления была проверена экспериментально путем математического моделирования на динамических моделях автомобилей с различными типами приводов. На рис. 6 показаны траектории движения АМС при управлении по алгоритмам стабилизации относительно прямой и дуги окружности.

На рис. 7 показаны траектория отклонения АМС от заданной траектории при обходе препятствия (а) и траектория движения АМС, полученная при стабилизации относительно сложной траектории (б), где 1–27 — узловые точки сопряжения сегментов траектории.

При движении вдоль сложной траектории система управления изменяет скорость движения в соответствии с параметрами каждого сегмента траектории (рис. 8).

При возникновении ошибки отклонения от заданной траектории скорость также снижается, повышая маневренность АМС, что позволяет ему быстро вернуться к заданной траектории.

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

На практике реализация алгоритмов нечеткой логики возможна программными или аппаратными способами. Основная проблема при программной реализации алгоритмов нечеткой логики заключается в необходимости обработки большого объема информации во вложенных циклах итерации в реальном времени. В последнее время возрастает доля устройств, в которых нечеткие алгоритмы реализуются аппаратными методами [7]. Это связано с высоким быстродействием и относительной дешевизной новейшей элементной базы микроэлектроники. При этом достигается значительное повышение быстродействия нечетких регуляторов. Различают 3 поколения специального аппаратного обеспечения нечетких регуляторов [5]. Первое поколение основано на аналоговой микроэлек-

тронике и было выпущено в 1987 году. Второе поколение — это СБИС, сочетающие аналоговый и цифровой принципы действия с возможностью программирования пользователем (1990). Третье поколение (1992) представляют собой «нечеткие» компьютеры или процессоры, обеспечивающие не только взаимодействие оператора и ЭВМ, но и повышенные скорости обработки информации за счет организации параллельных вычислений. Очевидно, дальнейшее развитие устройств, реализующих нечеткую логику, будет двигаться в сторону интеграции программируемых устройств с аппаратным распараллеливанием выполняемых операций.

В параллельных вычислениях достаточно хорошо себя зарекомендовали нейронные сети. Аппаратная реализация нейронной сети дает высокое быстродействие регулятора, формирующего несколько выходных сигналов управления в зависимости от нескольких входных переменных, в соответствии с большим количеством правил управления. Поскольку алгоритмы управления АМС описываются нечеткими понятиями, а для построения нейронной сети необходимы точные числовые значения входных и выходных координат, то для обучения сети можно использовать нечеткий регулятор. Быстродействие нечеткого регулятора при обучении не имеет большого значения, поэтому для быстроты и дешевизны его можно реализовать программными средствами. Способности нейронных сетей к аппроксимации могут помочь дополнить базу правил управления в случае, если функции принадлежности всех лингвистических переменных монотонны и равномерны. В отличие от нейронных сетей нечеткие регуляторы легко перестраиваемые. Им не требуется длительный процесс обучения, для изменения их характеристик достаточно заменить базу правил управления и функции принадлежности лингвистических переменных.

Таким образом, наиболее выгодно реализовать бортовую нечеткую систему управления АМС на базе аппаратных средств второго или третьего поколений, допускающих их программную настройку и корректировку алгоритмов в процессе функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ильясов Б. Г., Старцев Ю. В., Головацкий К. Э. и др.** Автономные наземные транспортные средства как объекты автоматического управления // Мехатроника. 2001. № 6. С. 5–10.
2. **Старцев Ю. В., Белалов Б. М., Альмухаметов Р. Р.** Моделирование динамики движения транспортного средства // Вопросы управления и проектирования в информационных и кибернетических системах: Межвуз. науч. сб. Уфа, 2002. С. 64–70.
3. **Модели систем автоматического управления и их элементов:** Учеб. пособие / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев и др. М.: Машиностроение, 2003. 214 с.
4. **Старцев Ю. В., Головацкий К. Э., Ильясов Б. Г.** Нечеткие алгоритмы управления движением автономного мобильного робота // Первая международная конференция по мехатронике и робототехнике «МиР 2000»: Сб. тр. Т. 2. СПб.: НПО «Омега», 2000. С. 305–308.
5. **Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики:** Учеб. пособие / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов Уфа: УГАТУ, 1995. 80 с.
6. **Pyasov B. G., Startsev Yu. V., Belalov B. M.** Automatic car stabilization system based on fuzzy logic // Proc. of the 5th Int. Workshop on Computers Science and Information Technologies (CSIT'2003). Ufa: USATU, 2003. Vol. 2. P. 96–99.
7. **Уоссермен Дж.** Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 240 с.

ОБ АВТОРАХ



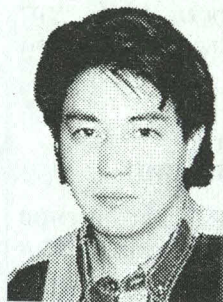
Ильясов Барый Галеевич, проф., зав. каф. технической кибернетики. Дипл. инж.-электромех. (МАИ, 1962). Д-р техн. наук в обл. системного анализа и теории управления (ЦИАМ, 1983). Иссл. многосвязных, нелинейн., адаптивн. и интеллектуальных систем.



Старцев Юрий Валентинович, доц. той же каф. Дипл. инж. электронной техники (УАИ, 1974). Канд. техн. наук в обл. эл-тов и устройств систем управления (УАИ, 1979). Иссл. в обл. систем автоматич. управления.



Головацкий Константин Эрнстович, ведущ. программист той же каф. Дипл. инж.-системотехник (УГАТУ, 1996). Канд. техн. наук в обл. системн. анализа, управления и обр. информации (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. управления автономными мобильными системами.



Белалов Булат Мансурович, аспирант той же каф. Дипл. инж.-системотехник (УГАТУ, 2000). Работает над дис. об управлении автономн. мобильн. системами.