

УДК 519.711

В. Г. Ко нь ко в, Д. А. Ан дри ко в,  
Б. Б. Ку ла ко в

## **СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

*Рассмотрены некоторые аспекты синтеза системы торможения, обеспечивающей повышение безопасности, путем создания дополнительных воздействий в базовой антиблокировочной системе. Предлагаемая система позволяет повысить устойчивость и управляемость колесного транспортного средства при торможении в наиболее сложных условиях дорожного движения.*

Предпосылками к построению интеллектуализированных систем управления (ИСУ) торможением колесного транспортного средства (КТС) с антиблокировочной системой (АБС) явились: исследование динамических свойств модели объекта управления [1], синтез робастного регулятора [2, 3], изучение характеристик водителя и дорожных условий среды [4–13], а также опыт предыдущих работ, посвященных созданию ИСУ [14–19]. В концепции ИСУ при наличии мотивации предполагается организация взаимодействия ИСУ с окружающей средой на основе знаний, используемых для синтеза цели, оценок, принятия решений, выработки управления и контроля его реальных результатов и сопоставления их с прогнозируемыми динамической экспертной системой результатами действия с корректировкой цели (в случае необходимости).

Для синтезируемой ИСУ характерна оценка взаимодействия пары “колесо–дорога”, т. е. прогнозирование изменений текущих условий при наступлении возможной аварийной дорожной ситуации, а также выбор цели управления в соответствии с текущими и прогнозируемыми дорожными условиями.

Неправильное определение типа дорожного полотна, параметры которого неявно входят в закон управления системы торможения, могут привести к существенному неуправляемому увеличению скорости изменения курсового угла корпуса КТС, т. е. к его курсовой неустойчивости (закрутке), к кардинальному ухудшению качества работы ИСУ. Наиболее опасная ситуация — микст — торможение на поверхностях с различными по бортам КТС свойствами сцепления колес, поэтому

высокая точность оценки микста — это важная задача, напрямую влияющая на эффективность торможения, а следовательно, и на ослабление развития (вплоть до предотвращения) аварийной ситуации.

Точно определить параметры поверхности торможения не удастся, однако, при помощи аппарата нечеткой логики можно добиться смягчения степени влияния неконкретности знания о характере неопределенности исходных данных на качество работы ИСУ.

Не полностью или с ошибкой известна и некоторая другая информация, необходимая для дальнейшего расчета алгоритма управления, поэтому нечеткая логика используется здесь еще и при формировании оценки опасности (риска попадания в аварийную ситуацию в условиях текущей дорожной обстановки), зависящей еще от способа вождения, ситуации на дороге, качества используемых шин. Функции принадлежности соответствующих размытых множеств вводятся на основе мнений экспертов, основных положений правил безопасного дорожного движения и данных о психологии поведения водителя.

Нечеткий подход управления является, таким образом, способом повышения эффективности ИСУ вследствие комплексирования алгоритма ее функционирования, обеспечивающего повышение точности ее работы при сохранении высокой практической работоспособности.

**Анализ модели торможения КТС.** Движение КТС с проскальзыванием колес – сложный динамический процесс, на основе описания которого [1] можно составить упрощенную модель, достаточную для представления его в рамках исследуемого режима. На рис. 1 приведена расчетная схема КТС, где приняты следующие упрощения:

- рессоры не имеют массы;
- масса подрессоренной части (РЧ)  $m_p$  сосредоточена в точке  $C$ , масса неподдресоренной части (НЧ) —  $m_n$ ;

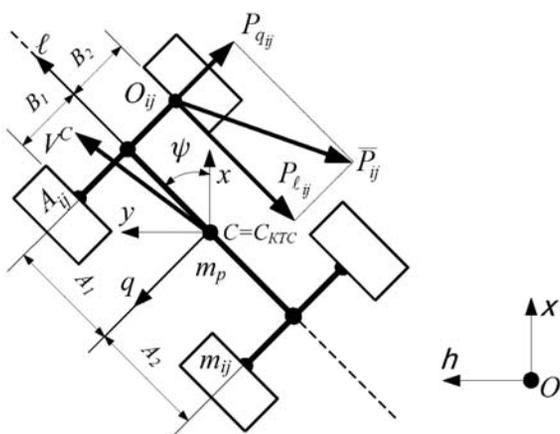


Рис. 1. Упрощенная расчетная схема КТС. Вид сверху (с положительного направления оси  $z$ , проходящей через точку  $C_{\text{КТС}}$ )

- стержни, которые вместе с колесами представляют НЧ, не имеют массы и абсолютно жесткие;

- центры масс колес расположены в точках  $A_{ij}$  на осях их вращения, причем индекс  $i$  задает переднюю ( $i = 1$ ) и заднюю ( $i = 2$ ) оси, а индекс  $j$  – левую ( $j = 1$ ) и правую ( $j = 2$ ) стороны по ходу движения КТС;  $\ell$ ,  $q$  – продольная и поперечная оси его корпуса;  $m_{nij}$  и  $R$  – масса каждого колеса и его радиус в ненагруженном состоянии;

- конструкция КТС такова, что  $B_1 = B_2$ ,  $A_1 \neq A_2$ ;

- вращение  $ij$ -го колеса вокруг оси задается абсолютной угловой скоростью  $\Omega_{y_{ij}}$ ;

- центр масс КТС – точка  $C_{\text{КТС}}$ ;

$O\xi\eta\zeta$  – неподвижная система отсчета. Точки  $O$  и  $C$  – проекции  $C_{\text{КТС}}$  на опорную плоскость  $O_{11} O_{12} O_{22}$  в начальный момент времени и плоскость, проходящую через оси колес. Плоскость  $O\xi\eta$  принадлежит опорной плоскости, ось  $O\zeta$  – вертикальна, а ось  $O\xi$  направлена по ходу движения вдоль проекции начального вектора скорости центра масс КТС  $V_0^C$  на опорную плоскость. В начальный момент времени точка  $C \equiv C_0$  в системе  $O\xi\eta\zeta$  имеет координаты  $(0, 0, R)$ ;

$C_0xyz$  – рабочая неподвижная система отсчета. В начальный момент времени  $C_0xyz$  полностью совпадает с  $O\xi\eta$  за исключением координаты  $z = \zeta - R$ . Угол рыскания  $\psi$  – это угол поворота РЧ вокруг оси  $z$ .

Упрощенная модель описывается линейными дифференциальными уравнениями пятого порядка [1], при этом верхний индекс показывает относительно какой точки, а нижний – относительно какой оси следует рассматривать соответствующий параметр:

$$\dot{V}_x^C = \frac{1}{m_p + 4m_n} \left( - \sum_{ij} P_{\ell_{ij}} - \psi \sum_{ij} P_{q_{ij}} \right);$$

$$\dot{V}_y^C = \frac{1}{m_p + 4m_n} \left( - \psi \sum_{ij} P_{\ell_{ij}} - \sum_{ij} P_{q_{ij}} \right);$$

$$J_{y_{ij}} \frac{dQ_{y_{ij}}}{dt} = -M_{T_{ij}} + P_{\ell_{ij}} R;$$

$$\begin{aligned} J\ddot{\psi} - 2(A_1 - A_2)m_n \dot{V}_x^C \psi + 2(A_1 - A_2)m_n \dot{V}_y^C &= \\ = P_{q_{11}} A_1 + P_{q_{12}} A_1 - P_{q_{21}} A_2 - P_{q_{22}} A_2 + B \sum_{i,j=1}^2 (-1)^{j+1} P_{\ell_{ij}}, \end{aligned}$$

где  $M_{T_{ij}}$  – тормозной момент на  $ij$ -колесе;  $P_{\ell_{ij}}$ ,  $P_{q_{ij}}$  – продольная и поперечная проекции силы трения между  $ij$ -м колесом и дорогой, соответственно;  $\psi$  – угол рыскания;  $V_x^C$ ,  $V_y^C$  – проекции скорости

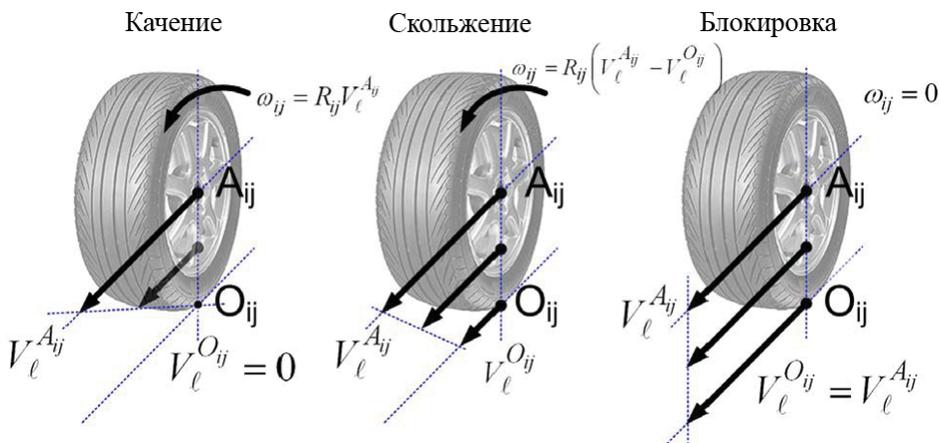


Рис. 2. Режимы движения колеса

центра масс КТС на оси  $x, y$ ;  $J_{y_{ij}}$  — полярный момент инерции  $ij$ -го колеса;  $\Omega_{y_{ij}} \triangleq \omega_{ij}$  — угловая скорость  $ij$ -го колеса.

На рис. 2 показаны различные варианты режимов движения колеса: качение (относительное проскальзывание равно нулю), блокировка (угловая скорость вращения колеса равна нулю, относительное проскальзывание вдоль оси  $\ell$  равно единице), скольжение (относительное проскальзывание принимает промежуточное значение).

Относительное проскальзывание  $ij$ -го колеса вдоль осей  $\ell$  и  $q$  определяется по выражениям из работы [1]:

$$s_{l_{ij}} = \frac{V_x^{A_{ij}} \cos \psi - V_y^{A_{ij}} \sin \psi - \Omega_{y_{ij}} R}{V_x^{A_{ij}} \cos \psi - V_y^{A_{ij}} \sin \psi}; \quad s_{q_{ij}} = \frac{-V_x^{A_{ij}} \sin \psi + V_y^{A_{ij}} \cos \psi}{V_x^{A_{ij}} \cos \psi - V_y^{A_{ij}} \sin \psi}.$$

В зависимости от того, в каком режиме движения находится колесо, изменяется его уравнение движения. При качении колеса порядок уравнений, описывающих его движение, снижается на единицу в виду того, что угловая скорость перестает быть независимой переменной [20].

Условие качения колеса без проскальзывания [20] имеет вид

$$P_{q_{ij}} \leq \sqrt{(\varphi_{ij})^2 (N_{ij})^2 - (P_{l_{ij}})^2}, \quad (1)$$

где  $N_{ij}$  — нормальная к поверхности реакция  $ij$ -го колеса;  $\varphi_{ij}$  — коэффициент сцепления  $ij$ -го колеса с дорогой, зависящий от типа покрытия.

Экспериментальные данные для коэффициентов сцепления  $\varphi_{ij}$  в зависимости от различных покрытий приведены в табл. 1 [20]

Коэффициенты сцепления для различных покрытий

| Тип покрытия     |             | Коэффициент сцепления |
|------------------|-------------|-----------------------|
| Асфальт          | сухой       | 0,7–0,8               |
|                  | мокрый      | 0,5–0,6               |
|                  | грязный     | 0,25–0,45             |
|                  | снег (5 см) | 0,20–0,40             |
| Сухой бетон      |             | 0,60 – 0,80           |
| Грунтовая дорога | сухая       | 0,50–0,60             |
|                  | влажная     | 0,20–0,40             |
| Лед              |             | 0,005–0,10            |

Если условие (1) нарушается, то колесо движется с проскальзыванием относительно дорожного полотна. Режим “скольжение” — промежуточный вариант, позволяющий совместить качество торможения с сохранением АБС-управляемости [2]. Эпюры скоростей показывают распределение скорости точек колеса, в том числе и в точке контакта с дорогой. При блокировке колеса угловая скорость вращения колеса равняется нулю. В этом режиме КТС неуправляемо. Скорость  $V_{\ell}^{A_{ij}}$  определяет режим движения и является параметром расчета силы трения между колесом и дорогой [1, 20].

Влияние рулевого управления не учитывается, так как здесь предполагается добиваться улучшения характеристик движения КТС путем формирования воздействий в тормозной системе при индивидуальном управлении на каждом колесе (в том числе и с помощью АБС).

Рассмотрим необходимость автоматического торможения КТС в рамках развития аварийной ситуации в условиях микста. Один из самых опасных вариантов развития такой ситуации, например, попадание колес с одной стороны КТС на лед. В этом случае суть аварийной ситуации состоит в возрастании угла рыскания и его скорости (в закрутке), а также бокового сноса и его скорости [1].

Параметры исследуемого КТС:  $m_p = 2$  т,  $m_{н_{ij}} = 35$  кг  $\forall ij$ ,  $R = 35$  см,  $A_1 = 2$  м,  $A_2 = 1,5$  м,  $B_1 = B_2 = 1$  м, тормозной момент, приводящий к блокировке колеса  $M_{br} = 1463$  Н·м<sup>2</sup>. Значения аэродинамических сил и моментов полагаем равными нулю. В силу наличия АБС относительное проскальзывание принимаем для всех колес равным 12%. Считаем, что микст оценивается показателем  $\mu = \Delta_{11} - \Delta_{22}$ , если  $\Delta_{11} = \Delta_{21}$ ;  $\Delta_{12} = \Delta_{22}$ , где  $\Delta_{ij}$  — коэффициенты уменьшения сил трения соответствующих колес. Начальные условия движения КТС следующие:  $V_{x_0}^C = 60$  км/ч;  $V_{y_0}^C = 0$ ;  $\psi_0 = 0$ ;  $\dot{\psi}_0 = 0$ .

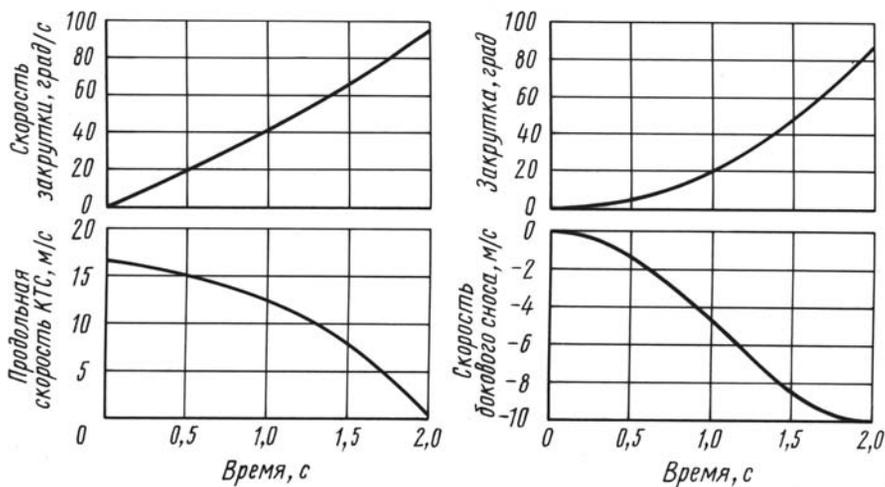


Рис. 3. Развитие аварийной ситуации при торможении с  $\mu = 0,9$  (попадание на лед) с тормозным моментом  $1,5M_{br}$

Анализ результатов моделирования показывает, что за 2 с угол закрутки КТС возрос до  $90^\circ$  и продолжает возрастать с увеличивающейся скоростью, боковой снос составляет около 10 м/с (в условиях моделирования принято, что микст одинаков для передних и задних колес КТС, что позволяет рассмотреть, например, лишь колеса 11 и 12, рис. 3).

Движение начиная с 0,1 с происходит в режиме “блокировка” (рис. 4), в котором снижается потенциальная возможность активно бороться при помощи тормозов с закручиванием (снижение АБС-управляемости КТС [15]). Предотвратить такой режим водитель не успевает, даже, если бы он и имел возможность на него влиять (среднее время реакции водителя около 0,5 с).

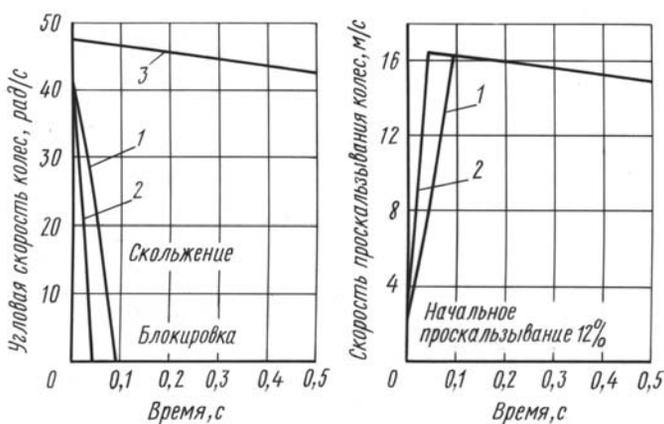


Рис. 4. Режимы торможения при  $\mu = 0,9$  (попадание на лед): кривые 1 и 2 — торможение колес 11 и 12 соответственно; 3 — кривая временной зависимости угловой скорости качения

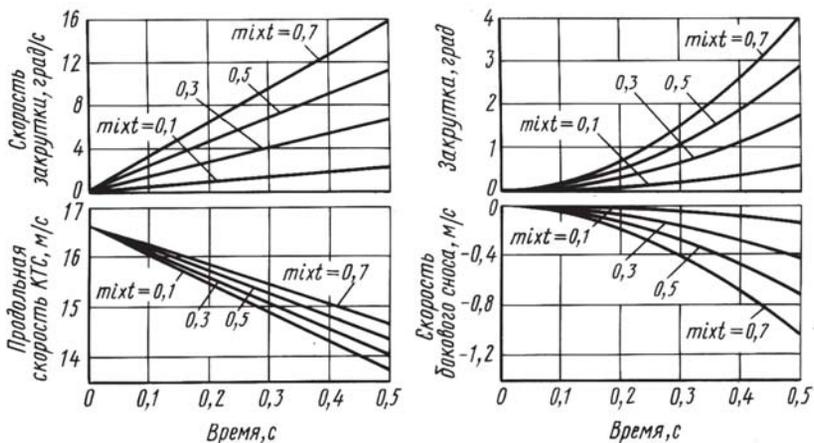


Рис. 5. Влияние микста на развитие аварийной ситуации при торможении на различных поверхностях без регулятора

Повышать степень влияния АБС на курсовую устойчивость нужно уже при [18]

$$\frac{\varphi_{high}}{\varphi_{low}} \geq 2, \quad \varphi_{low} \geq 0,3, \quad (2)$$

где  $\varphi_{low}$  — низкое сцепления покрытия под колесами справа;  $\varphi_{high}$  — высокое сцепление покрытия под левыми колесами.

Для формирования эффективной стратегии действия ИСУ необходима информация о поведении КТС с АБС не только в случае (2), но и для всего разнообразия поверхностей. Для этого промоделируем характер поведения КТС при торможении на различных микстах, вызванных попаданием одного колеса на снег ( $\mu = 0,7$ ), воду ( $\mu = 0,5$ ), изморось ( $\mu = 0,3$ ), сухую дорогу с неравномерным покрытием ( $\mu = 0,1$ ). График моделирования для торможения на льду ( $\mu = 0,9$ ) приведен ранее на рис. 3.

Из рис. 5 видно, что при увеличении  $\mu$  снижается АБС-управляемость и увеличивается опасность возникновения дорожно-транспортного происшествия.

Робастные регуляторы ориентированы на некоторое, наихудшее из возможных значение микста, на обеспечение гарантированного результата. Робастность, из-за сильной неопределенности внешних условий необходимая в начале движения, покупается ценой снижения возможной эффективности системы.

В работах [1, 2, 15, 16] проведено сравнение эффективности линейного и нелинейного робастных регуляторов. Результаты моделирования (рис. 6, 7) свидетельствуют не только о том, что линейный и нелинейный  $H_\infty$ -регуляторы робастны (в частности, и по отношению к  $\mu$ , причем нелинейный робастный регулятор справляется с задачей уменьшения скорости рыскания лучше, чем линейный).

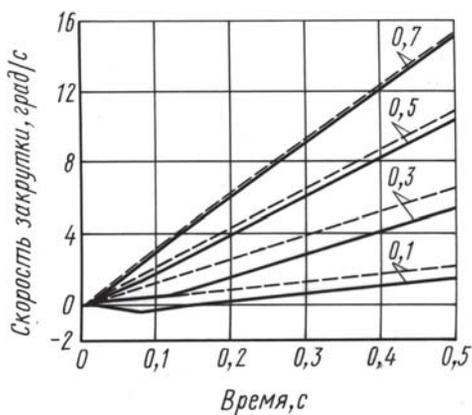


Рис. 6. Скорость угла рыскания КТС при  $\mu = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$  для нелинейного (сплошная линия) и линейного робастных регуляторов

выработку применения точных методов управления, когда база знаний ИСУ содержит необходимый объем нужной информации [2].

Повышение степени полноты базы знаний, в частности высокая точность оценки  $\mu$  наряду со всеми остальными факторами, влияющими на эффективность торможения, особенно экстренного, — важная задача, способствующая ослаблению развития (вплоть до предотвращения) аварийной ситуации с помощью ИСУ.

**Оценка факторов, влияющих на эффективность (экстренного) торможения.** Такими факторами принято считать риски возникновения аварийной ситуации, связанные с действиями водителя.

1. Факторы, обусловленные собственными внутренними предпосылками рабочего тонуса водителя (психологическим состоянием, фи-

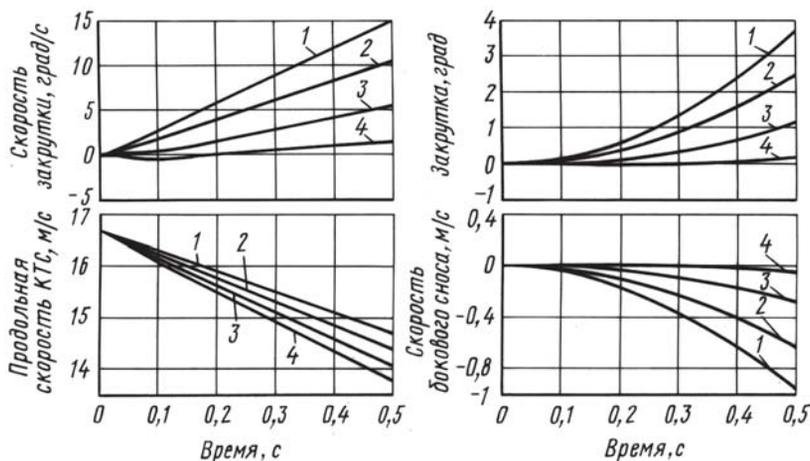


Рис. 7. Параметры торможения КТС с нелинейным робастным регулятором, рассчитанным для микста (кривые 1...4 —  $\mu = 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$  соответственно)

зической усталостью, стилем вождения и т. п.), запишем в виде

$$f(T_c) = 1 + \frac{\alpha T_c}{\max(T_c)}, \quad (3)$$

где  $T_c$  — значение степени риска от внутренних предпосылок текущего тонуса водителя;

2. Фактор, обусловленный внешними предпосылками ( $f_v(T_{вн})$ ) рабочего тонуса водителя (в данном случае — характером взаимодействия колес с дорожным покрытием, загруженностью трассы, погодными условиями, освещенностью и т. п.), выразим формулой

$$f(T_{вн}) = 1 - \frac{\beta T_{вн}}{\max(T_{вн})}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4)  $\alpha \in [0 \dots \infty)$  и  $\beta \in [0 \dots 1)$  — весовые коэффициенты, отражающие информацию о водителе и обстановке на дороге в базе знаний (чем больше информации в базе, тем меньше весовой коэффициент);  $T_{вн}$  — значение степени риска от внешних причин. Учитывая разрядность вычислителя, примем  $\max(T_c) = \max(T_{вн}) = 255$ ; таким образом, диапазон изменения переменных  $T_c$  и  $T_{вн}$  составляет  $[0 \dots 255]$ .

3. В качестве самостоятельного фактора, влияющего на эффективность торможения, зависящую от действий водителя, обусловленных собственными причинами его рабочего тонуса, выделяется время реакции  $r$  водителя на опасность. Время реакции зависит от многих причин, и их взаимное влияние еще не достаточно изучено, однако, в работе [8] приведены модели, позволяющие в первом приближении оценить значение этого фактора.

Время реакции обычно связано обратной зависимостью со скоростью КТС, однако, степень корреляции достаточно мала. Более сильно на время реакции влияют способности водителя: наблюдательность, идентификация, предсказание, решительность, навыки вождения. Коэффициенты корреляции с указанными способностями, среднее значение и среднеквадратическое отклонение приведены в работе [9] (табл. 2 и 3).

Таблица 2

**Статистические характеристики времени реакции**

| Способности водителя                                   | Значение |
|--|----------|
| Среднее значение времени реакции 100, с                | 50,18    |
| Среднеквадратическое отклонение времени реакции 100, с | 4,70     |

## Коэффициенты корреляции со временем реакции

| Коэффициент корреляции параметров со временем реакции |        |
|---|--------|
| Наблюдательность                                      | -0,228 |
| Идентификация   | 0,140  |
| Предсказание  | 0,003  |
| Решительность   | -0,109 |
| Навыки вождения                                       | -0,157 |

4. Микст может рассматриваться как характеристика потенциальной опасности развития аварийной ситуации (с точки зрения закрутки корпуса КТС (2)).

5. Скорость бокового сноса  $V_y^C$  и скорость закрутки  $\dot{\psi}$  характеризуют уход КТС с желаемой траектории и потерю управляемого характера движения в процессе торможения. Допустимыми значениями считаются скорости бокового сноса  $V_y^C \leq 3$  м/с и закрутки  $\dot{\psi} \leq 6$  град/с (т. е. условие выхода КТС с полосы движения).

6. Еще один фактор — тормозной путь  $S$  при экстренном торможении с помощью ИСУ на свободной дороге, где исключено столкновение с препятствиями [8], — используется для тестирования системы торможения и отладки программного обеспечения ИСУ:

$$S = \frac{V_c^2}{2a_c f_v (T_{вн})}, \quad (5)$$

где  $a_c$  — ускорение КТС. Участие водителя в процессе торможения в данных условиях не учитывается, поэтому в уравнении (5) не присутствует весовой коэффициент  $\alpha$ .

Допустимый тормозной путь для КТС массой до 5 т на скорости 60 км/ч равен 32,1 м с “холодным” тормозом и 38 м с “горячим” тормозом (рис. 8). Тормозной механизм считается “холодным”, если температура, измеренная в непосредственной близости от поверхности

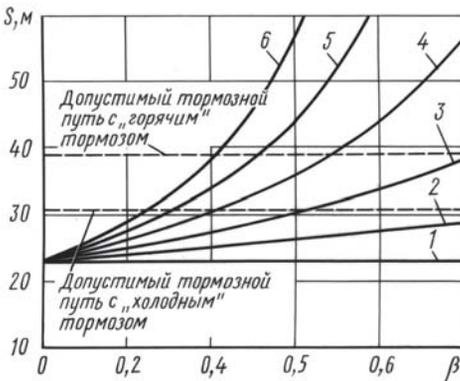


Рис. 8. Зависимость тормозного пути  $S$  от весового коэффициента  $\beta$  для различных значений опасности возникновения аварийной ситуации  $T_{вн} = 0$  (1); 50 (2); 100 (3); 150 (4); 200 (5) и 255 (6) соответственно при экстренном торможении на скорости  $V_c = 60$  км/ч с “холодными” и “горячими” тормозными механизмами

трения тормозного барабана или тормозного диска, ниже  $100^{\circ}\text{C}$ . При температуре указанных частей механизма торможения более  $100^{\circ}\text{C}$  испытания считаются “горячими” [22]. Зависимости на рис. 8 позволяют установить уровень опасности реального движения. Так, для значений  $\beta$ ,  $V_c$  и  $T_{\text{вн}}$ , которые определяют тормозной путь, выше допустимого уровня движение считается потенциально опасным.

7. Безопасная дистанция  $D$  (при которой исключается столкновение с движущимся или стоящим препятствием) играет важную роль при движении в потоке автомобилей [8]:

$$D = \frac{V_c^2}{2a_c f_b(T_{\text{вн}})} - \frac{V_d^2}{2a_d f_b(T_{\text{вн}})} + r V_c f(T_c), \quad (6)$$

где  $V_d$ ,  $a_d$  — скорость и ускорение препятствия соответственно.

**Модель оценки влияния внешней среды.** В ИСУ торможения КТС для фазификации используются нормированные на интервале  $[0 \dots 1]$  (который легко конформно отображается до желаемой длины) в основном функции трех видов.

### 1. Кривая Гаусса

$$f(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}},$$

полностью определяется двумя параметрами:  $c$  — математическое ожидание и  $\sigma$  — дисперсия.

### 2. Колоколообразная кривая

$$f(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}.$$

Набор значений параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  позволяет корректировать вид кривой до желаемого (более точно отражающего мнение эксперта).

### 3. Ломаная кривая (треугольного типа).

Модель оценки влияния внешней среды охватывает следующие факторы:

“полотно” — конструктивный тип дорожного полотна, представляемый лингвистической переменной: асфальт, бетон, грунт;

“трафик” — загруженность трассы;

“покрытие” — условия на поверхности дорожного полотна, лингвистическая переменная: лед, снег, вода, изморось, сухая дорога.

Модель базы нечетких правил для определения параметра “опасность” строится в среде Matlab для оценки влияния внешней среды на опасность возникновения аварии. В итоге работы рассмотренной нечеткой модели получается значение степени риска  $T_{\text{вн}}$ .

**Модель оценки влияния характеристик водителя.** Входными параметрами модели являются: возраст, усталость, обзор, способности

водителя, стиль вождения, образование, ухудшение зрения, депрессия и алкогольное опьянение [4–6, 9, 11, 12]. Безаварийное вождение требует не только физических, но и относящихся к мышлению (ментальных) способностей. В работе [6], например, исследованы взаимовлияния здоровья, алкогольного опьянения, восприимчивости к информации и других факторов, определяющих качество вождения.

Рассмотрим некоторые, наиболее существенные, из этих переменных подробно.

**Способность к вождению** включает в себя ряд обязательных качеств, которыми должен обладать водитель. Это  $y_1$  — поиск (время до выполнения операции),  $y_2$  — поддержание требуемой траектории движения,  $y_3$  — исполнительность,  $y_4$  — решительность,  $y_5$  — распознавание. Их рассматривают как компоненты вектора  $y$ , представляющего понятие “способность к вождению”. Для выявления вектора  $y$  в работе [9] разработаны специальные тесты:  $x_1$  — определение скрытых фигур (число правильных ответов),  $x_2$  — определение скрытых изображений (число правильных ответов),  $x_3$  — рассеяние внимания (число ошибок в ответах),  $x_4$  — ошибка распознавания образов (число ошибок в ответах),  $x_5$  — восприятие динамически меняющихся визуальных сигналов;  $r$  — время реакции нажатия на тормоз. Они тоже рассматриваются как компоненты вектора  $x$ , с помощью которого на основе линеаризованной системы алгебраических уравнений регрессии, полученной из многофакторного статистического анализа [9], вычисляют  $y$ :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,082 & -0,018 & 0,328 & -0,213 & 0,377 \\ 0,074 & -0,009 & 0 & -0,166 & 0,109 \\ 0,265 & -0,073 & -0,406 & -0,249 & 0,421 \\ 0,653 & -0,045 & -0,689 & 0 & 0 \\ 0,348 & 0,021 & 0 & 0 & 0,746 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 29,22 \\ 4,78 \\ -5,456 \\ 30,076 \\ -66,3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,044 \\ 0,074 \\ -0,126 \\ 0,653 \\ 0,109 \end{bmatrix} r.$$

Время реакции нажатия на тормоз вычисляется по следующей формуле:

$$r = 0,2280y_1 + 0,0030y_2 - 0,1570y_3 - 0,1090y_4 + 0,1400y_5.$$

Первоначальный тест для изучения способностей водителя состоит из 40 типовых ситуаций на дороге. Для ответа на каждый вопрос предоставляется 3 с (примерно шестикратное увеличение стандартного времени реагирования), поэтому максимальное значение каждой способности водителя  $y_j$  равно 40 пунктов [9]. Для удобства представления показатели вычисляются в процентах.

Текущие данные об обстановке на дороге во время движения можно получить, опираясь на обработку информации от датчиков и нейронной сети, данные же о водителе определяются до начала движения КТС, когда в базе данных нет никакой информации. По мере накопления статистики о конкретном водителе, появляется возможность по его текущему поведению сравнить такие характеристики, как изменение стиля вождения и агрессия. Это делается на основе анализа способа переключения передач, темпа набора и сброса скорости, резкости поворота руля.

Последующий текущий контроль водителя по этим тестам в работе [9] предлагается учитывать по формуле

$$Y = \begin{bmatrix} -0,0855 & -0,0173 & 0,3439 & -0,2134 & 0,3823 \\ 0,0680 & 0,0101 & 0,0267 & -0,1668 & 0,1180 \\ 0,2751 & -0,0749 & -1,4515 & -0,2447 & 0,4057 \\ 0,6005 & -0,0353 & -0,4531 & -0,0066 & 0,0793 \\ 0,3392 & 0,0226 & 0,0394 & -0,0011 & 0,7592 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 29,7979 \\ 4,6600 \\ -5,4211 \\ 27,0001 \\ -66,5008 \end{bmatrix}$$

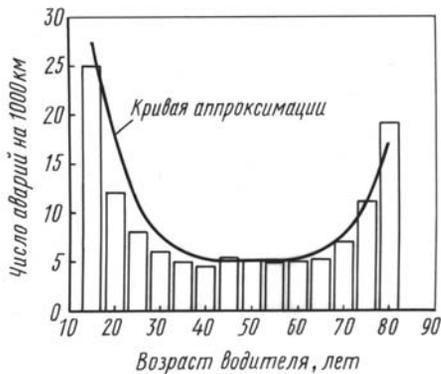
**Возраст.** Исследования [6] показали, что возраст водителя существенно связан с предпосылками возникновения аварийных ситуаций (рис. 9). На рисунке обозначено:  $x$  — возраст в годах;  $f(x)$  — число аварийных ситуаций на 1000 км. Эти данные были получены без учета влияния социально-демографических факторов.

Гистограмму (см. рис. 9) можно представить в виде аналитической зависимости

$$f(x) = \frac{1,5}{10^5} (x - 50)^4 + 5. \quad (7)$$

Таким образом, наиболее подвержены риску возникновения аварии молодые и старые водители.

**Стиль вождения.** Исследования специалистов Американской автомобильной ассоциации (AAA) позволили выявить один из основных факторов, влияющих на поведение водителя, — настроение. Плохое настроение оказывает непосредственное влияние на стиль вождения. Важнейшие последствия: притупление внимания и агрессия [4]. Рассеянность как следствие притупления внимания уже определена тестами. Обратимся к агрессии. По статистике NHTSA (National Highway



**Рис. 9. Зависимость числа аварийных ситуаций на 1000 км от возраста водителя**

кого-то обидеть [13]. Из всех возможных проявлений агрессии около 80 % (исключение составляют подача звукового сигнала, “моргание” фарами, неприличные жесты) несут потенциальную угрозу жизни участникам дорожного движения.

По данным исследований [4] выявлено взаимное влияние стресса, полученного на работе, опыта вождения, времени нахождения в пути на проявление агрессии в процессе управлением КТС, что представлено здесь в виде симметрической матрицы корреляции, учитывающей влияние на агрессию одного из этих факторов или какой-либо пары из этих факторов:

|              | Агрессия | Работа | Опыт   | Время в пути |
|--------------|----------|--------|--------|--------------|
| Агрессия     | 1        | 0,158  | -0,014 | 0,018        |
| Работа       | —        | 1      | -0,305 | -0,149       |
| Опыт         | —        | —      | 1      | 0,227        |
| Время в пути | —        | —      | —      | 1            |

При помощи разработанного тест-опроса DAS (Driving Anger Scale) [10] имеется возможность определить предрасположенность водителя к агрессивному поведению во время движения и выявить на этой основе его склонность к образованию аварийной ситуации.

Тот факт, что водитель в состоянии стресса проявляет иную моторику, нежели в спокойном состоянии, дает возможность идентифицировать при помощи ИСУ стрессовое состояние как в начале, так и в процессе движения.

База нечетких правил, описывающая поведение водителя и влияние на развитие аварийной ситуации, промоделирована в Matlab и имеет

Traffic Safety Administration, США) 60 % дорожно-транспортных происшествий происходит в результате проявления агрессии водителя. Интересно, что 90 % водителей не принимают во внимание происшедшие с ними происшествия в результате проявления агрессии и попадают в аварийную ситуацию снова, совершая ту же самую ошибку — потеря концентрации внимания из-за агрессивного поведения [5].

Агрессивное поведение — это физические или вербальные действия, направленные на то, чтобы

следующие лингвистические переменные: агрессивность поведения (стиль вождения); способности водителя; обзор во время движения. Такой параметр, как возраст водителя, можно учесть выражением (7) без применения нечеткой логики.

В среде Matlab на основе результатов исследований [7, 9, 10] синтезирована схема нечеткой оценки значений степени риска возникновения аварийной ситуации  $T_c$  и  $T_{вн}$ . Входными данными для  $T_c$  являются уровень агрессии, наблюдательность (обзор), способности к вождению. Функции принадлежности, реализующие множества значений переменных “риск”, “агрессия”, “способность к вождению” и “наблюдательность (обзор)” изображены на рис. 10–13.

Результаты оценки приведены на рис. 14. Для наглядности изображения оценки  $T_c$  в трехмерном пространстве принимаем одну из переменных константой (для примера константа равна 0,5). Следует отметить, что для оценки степени риска  $T_{вн}$  с входными нечеткими переменными “полотно”, “трафик”, “покрытие” используется аналогичная схема.



**Рис. 10.** Функции принадлежности нечеткой переменной “риск” (значения — низкий (Н), средний (С), высокий (В))



**Рис. 11.** Функции принадлежности нечеткой переменной “агрессия” (значения — водитель спокойный (С), раздраженный (Р), агрессивный (А))

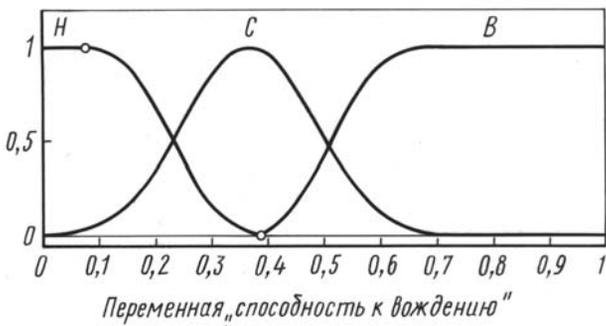


Рис. 12. Функции принадлежности нечеткой переменной “способность к вождению” (значения — низкая (H), средняя (C), высокая (B))

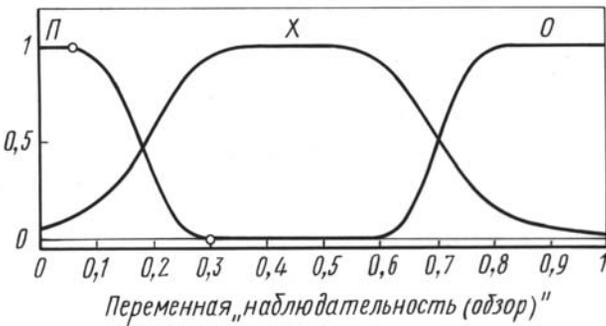


Рис. 13. Функции принадлежности нечеткой переменной “наблюдательность (обзор)” (значения — плохая (П), хорошая (X), отличная (O))

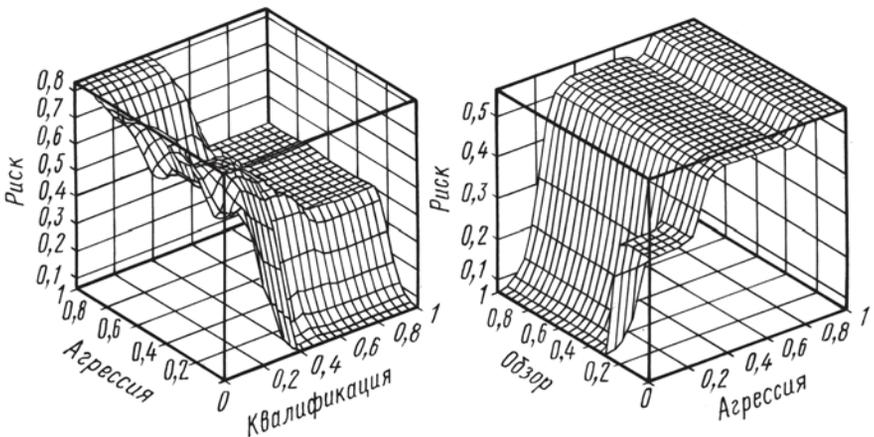
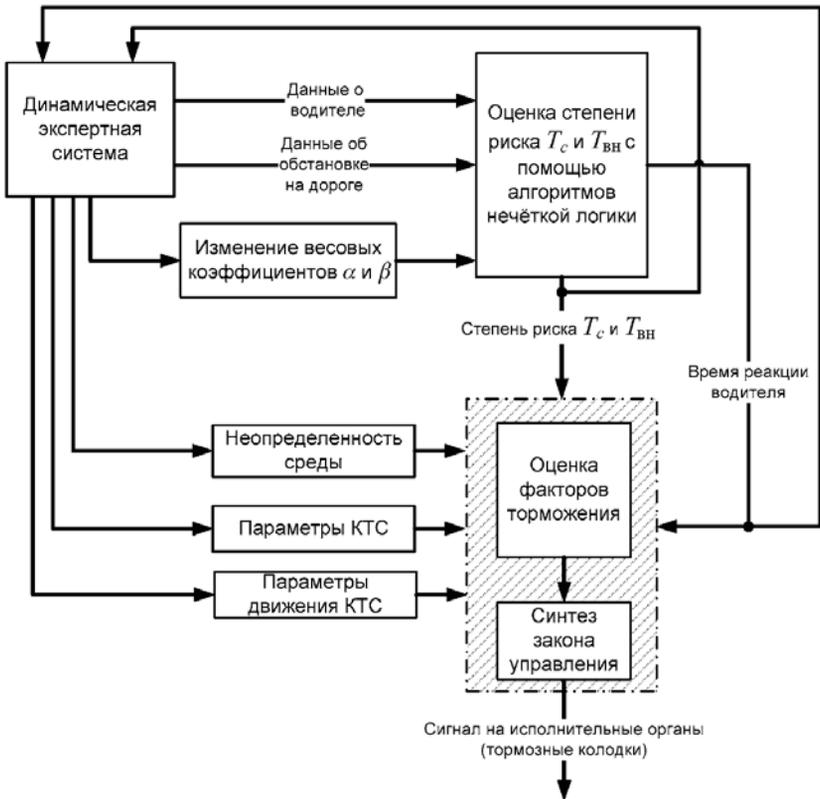


Рис. 14. Примеры оценок работы нечеткого алгоритма определения оценки риска, обусловленного внутренними предпосылками

**ИСУ торможением КТС.** Факторы эффективности торможения — это исходные данные для синтеза интеллектуализированной системы автоматического управления и для выработки ею рекомендаций о характере управления КТС в случае развития аварийной ситуации на дороге. Основная задача ИСУ КТС — повышение безопасности, улучшение показателей экономической эффективности использования КТС, снижение сложности управления, снижение вредных воздействий среды. На рис. 15 приведена более подробная схема определения параметров торможения (см. соответствующий блок на рис. 16).

При работе автоматизированной ИСУ в режиме оповещения водителя о возможности возникновения аварийной ситуации предполагается предупреждение водителя во время вождения об опасности в различных ситуациях. При этом, следует заметить, что водитель, анализируя развитие ситуации, аварии не предвидел, поэтому считал, что выданные предупреждения ложны. В связи с этим увеличение числа предупреждений, следующих друг за другом, приводит к следующей последовательности изменений поведения водителя:

- а) снижение уровня реакции на возникающие предупреждения;
- б) игнорирование предупреждения;



**Рис. 15. Функциональная схема определения параметров торможения в ИСУ**

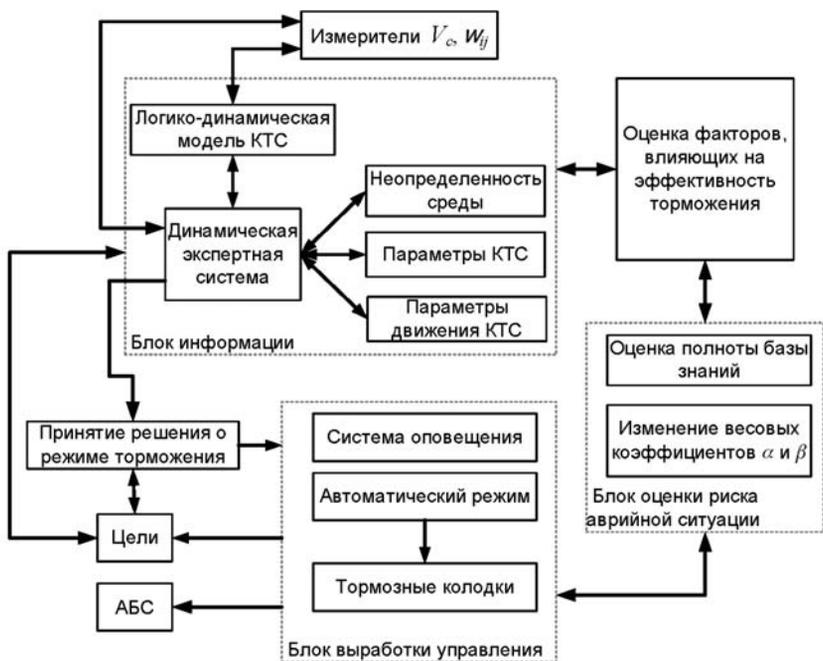


Рис. 16. Функционально-структурная схема ИСУ торможением КТС

в) ответные действия, противоположные требованиям предупреждения.

Только 25% выданных предупреждений водители воспринимали как истинные, а более 75% предупреждений водители полностью игнорировали, считая, что они ложные [7]. Рекомендация из работы [7] такова: если порог предупреждений, оставленных без внимания, превышает 75%, то необходимо вмешательство автоматики в управление КТС. Такое вмешательство может выражаться в принудительном снижении скорости движения.

Отметим, если КТС все-таки попало в режим с высокой степенью возникновения аварии, торможение становится экстренным и осуществляется автоматически, без участия человека (на время реакции водителя, около 0,5 с), с таким расчетом, чтобы обеспечить наиболее безопасные условия для дальнейшего движения уже под управлением водителя.

**Моделирование работы ИСУ по методу деревьев решений.** Метод деревьев решений — это способ представления правил в иерархической структуре целей, где каждому объекту соответствует единственный узел, дающий решение. Большинство из известных алгоритмов построения деревьев являются затратными по времени. Если один раз была выбрана цель и по ней произведено разбиение на подцели, то некоторые алгоритмы не имеют возможности вернуться назад и выбрать другую цель, которая дала бы лучшее разбиение. Этот факт

является следствием построения динамической экспертной системы (ДЭС) по последовательному типу реализации целей. Поэтому на этапе построения нельзя сказать — даст ли выбранный атрибут в конечном итоге оптимальное разбиение. Указанное ограничение предлагается снять, применяя квазипараллельную обработку условий реализации цели. Для этого рассмотрим процедуру построения дерева целей и реализацию в программном комплексе Stateflow среды Matlab работы ДЭС.

База целей представляет собой структурированное описание целевых заданий (ЦЗ) ИСУ ( см. блоки на рис. 16), определяющих функциональное назначение ИСУ и конструктивные ограничения их функциональных возможностей. База знаний содержит:

- предметные знания, определяемые структурированным описанием характеристик различных объектов, взаимодействующих с ИСУ;
- процедурные знания, представляемые в виде структурированного описания механизмов принятия решений, алгоритмов планирования поведения и условий эффективного их применения.

Одна из компактных форм описания целей — процедурная форма их представления в виде действия, отработка которого приводит к удовлетворению заданной потребности. При этом в соответствии с характером решаемой проблемы цели могут быть двух типов: полифазные (имеет подцели) и монофазные (не имеет подцелей). Применение процедур организации полифазного планирования [19] к иерархии целей дает возможность решать сложные задачи в реальных условиях, часто требующих периодической смены обстановки внешней среды ИСУ. Программная реализация подобной иерархии осуществлена в среде Matlab, в Toolbox Stateflow.

Дерево целей (рис. 17) отображается в терминах пакета Stateflow в реализованную программу (рис. 18), где штриховые блоки выполняются квазипараллельно, т. е. в такт с разрядностью бортового процессора. Блоки из сплошных линий выполняются в условиях ограничивающего блока, и в каждый конкретный момент времени может выполняться только один сплошной блок. Сплошные блоки реализуют последовательную схему выполнения.

Моделирование торможения в случае использования ИСУ при работе нелинейного робастного регулятора рассмотрено ниже.

Относительный тормозной момент — это отношение прикладываемого к колесу тормозного момента к моменту, приводящему к блокировке колеса. Из рис. 19 видно, как работает ИСУ торможением КТС. В качестве сравнения на рис. 20 приведен относительный тормозной момент для стандартной АБС. Из рисунков видно, что нелинейный робастный регулятор (см. рис. 19) обеспечивает работу в непрерывном,



Рис. 17. Дерево целей ИСУ

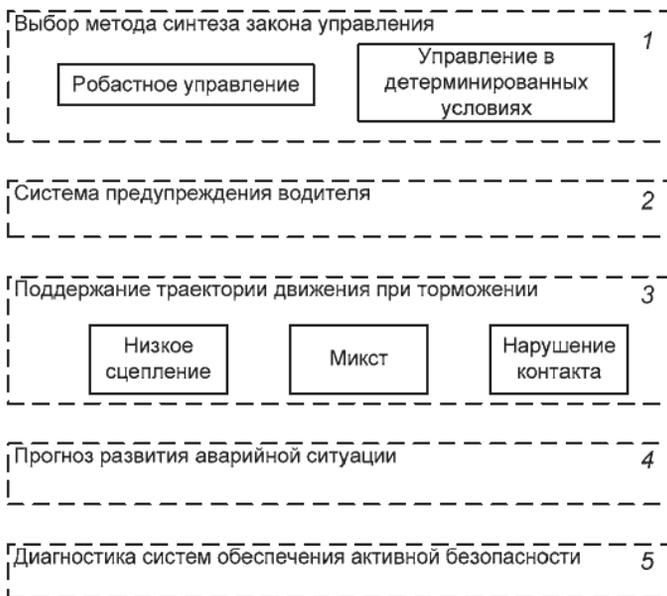


Рис. 18. Представление вычислительной концепции ИСУ в пакете Stateflow среды Matlab

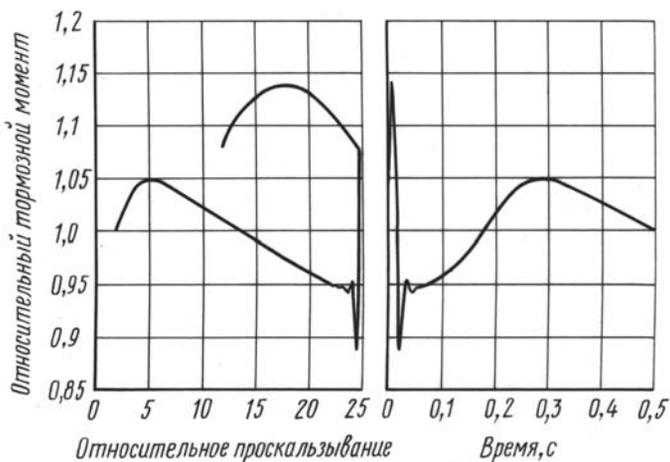


Рис. 19. Относительный тормозной момент в ИСУ торможением КТС

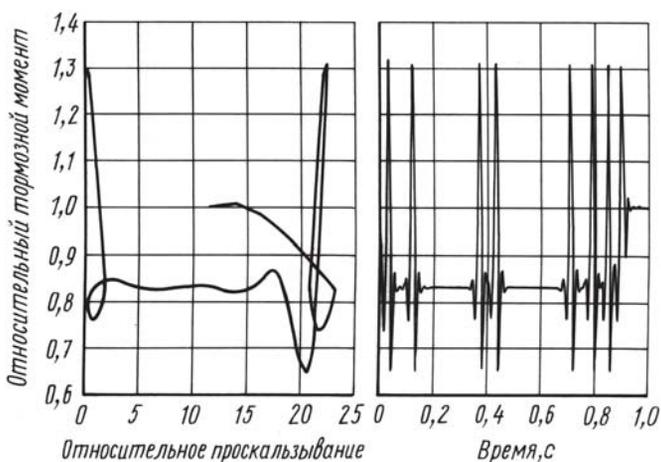
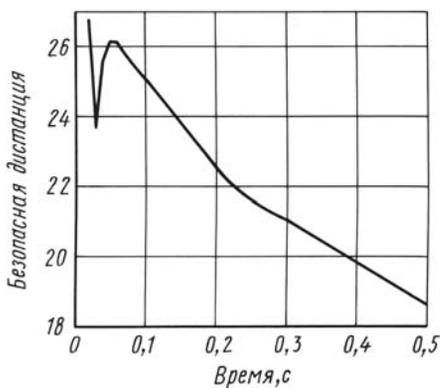


Рис. 20. Относительный тормозной момент в стандартной АБС

а стандартная АБС в импульсном режиме системы торможения. Для оценки безопасного расстояния до объекта в результате торможения с ИСУ в ходе моделирования получим изменение безопасной дистанции между КТС и предполагаемым препятствием (рис. 21).

Таким образом, обратная афферентация ИСУ [17] осуществляется за счет оценки дорожной ситуации и контроля состояния водителя. Происходит замыкание процесса распространения информации: от внешних и внутренних источников возмущения через датчики в ИСУ, далее через синтез регулятора — парирование аварийной ситуации (например, изменение безопасной дистанции (6) при работе ИСУ). Достижение конкретных целей становится доступным вследствие работы ДЭС, реализованной на этапе моделирования в среде Matlab (см. рис. 13), и алгоритма оценки степени риска развития аварийной ситуации (см. рис. 11, 12).



**Рис. 21.** Парирование аварийной ситуации (изменение безопасной дистанции)

анализа способа переключения передач, темпа набора и сброса скорости, резкости поворота руля.

ИСУ торможением КТС реализуется в его бортовом компьютере. Задача бортового компьютера (наличие которого в КТС не выходит за рамки базовых комплектаций современных автомобилей) — выполнять вычислительные процедуры, арифметико-логические операции, запрограммированные алгоритмы, которые подчинены реализуемой цели, сгенерированной ИСУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ко нь ко в В. Г., Ан дри ко в Д. А. Модель движения колесного транспортного средства с антиблокировочной системой в режиме с проскальзыванием колес // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2003. № 4.
2. Ко нь ко в В. Г., Ан дри ко в Д. А.  $H_{\infty}$ -оптимальный робастный регулятор транспортного средства с антиблокировочной системой в аварийном режиме движения с проскальзыванием колес // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2004. – № 4 (57). – С. 44–57.
3. Пу п ко в К. А., Ко нь ко в В. Г., Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
4. Morton S. Aggressive driving behavior in relation to occupational stress. Southern Connecticut State University, Degree of Master of Science in Research, Measurements and Quantitative Analysis. 2000.
5. Van Riette C. A. Effects of anger and aggression on driving behavior. California State University, Degree of Master of Science in Psychology. 2001.
6. Lesikar S. E. Health, cognition and driving behavior. John Hopkins University (Baltimore, Maryland), Degree of Doctor of Philosophy. 1999.
7. Nohre L. The effects of false alarms on driving behavior. Arizona State University, Degree of Doctor of Philosophy. 2001.
8. Wiedmann A. Design of a fuzzy car distance controller / Fuzzy Logic in Artificial Intelligence, 8-th Austrian Artificial Intelligence Conf., Lecture Notes, Springer-Verlag. 1993, 695, pp. 173–186.

**Выводы.** Если данные об обстановке на дороге во время движения можно получить, опираясь на обработку информации от датчиков и нейронной сети, то данные о водителе определяются до начала движения КТС, когда в базе данных нет никакой информации. По мере накопления статистики о конкретном водителе появляется возможность уточнить текущие данные о поведении водителя, например изменение стиля вождения и агрессия. Это делается на основе

9. Kim B. J., Vishu Ram R. Cognitive abilities in driving: Differences between normal and hazardous situations // *Ergonomics*. 2004, 47, 10, pp. 1037–1052.
10. Sharkin B. S. Road rage: risk factors, assessment, and intervention strategies // *Journal of counselling & development*. 2004, 82, 191–198.
11. Houston J. M., Harris P. B., Norman M. The aggressive driving behavior scale: Developing a self-report measure of unsafe driving practices // *North American Journal of Psychology*. 2003, 5, 2, pp. 269–278.
12. Duke R. L., Clavton S. L., Jenkins L. K., Miller T., Effects of aggressive driving and driver characteristics on road rage. 2001, 38, pp. 323–331.
13. Майлз Х. Перспективы социальной психологии. – М.: Эксмо, 2001.
14. Пупков К. А., Коньков В. Г. Интеллектуальные системы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 345 с.
15. Пупков К. А., Коньков В. Г., Андриков Д. А., Кулаков Б. Б. Интеллектуальная система управления КТС с АБС // *Вестник РУДН*. – 2006.
16. Коньков В. Г., Андриков Д. А. База знаний интеллектуальной системы управления торможением транспортного средства с антиблокировочной системой в режиме с проскальзыванием колес // *Тр. 5-го Междунар. симпоз. Intel'2002*. – Калуга, 2002.
17. Методы классической и современной теории автоматического регулирования. Т. 2. Ч. 3 // Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
18. Ахметшин А. М. Самообучающаяся антиблокировочная тормозная система колесных машин. – М.: МГИУ, 2002.
19. Берштейн Л. С., Мелехин В. Б. Планирование полифазного поведения самоорганизующихся интеллектуальных систем // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. – 2000. – № 5. – С. 143–146.
20. Смирнов Г. А. Теория движения колесных машин. – М.: Машиностроение, 1981.
21. Андриков Д. А., Кулаков Б. Б. Способ повышения АБС-управляемости КТС. Информатика и системы управления в XXI веке. – М.: Эликс+, 2006.
22. ГОСТ 22895-77 “Тормозные системы и тормозные свойства автотранспортных средств. Нормативы эффективности”.

Статья поступила в редакцию 21.02.2007

Виктор Григорьевич Коньков родился в 1935 г., окончил в 1959 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области теории автоматического управления.

V.G. Konkov (b. 1935) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1959. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Automatic Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of theory of automatic control.



Денис Анатольевич Андриков родился в 1981 г. Студент МГТУ им. Н.Э. Баумана, бакалавр техники и технологий по направлению “Автоматизация и управление”. Автор 6 научных работ в области теории автоматического управления.

D.A. Andrikov (b. 1981). Student of the Bauman Moscow State Technical University, Bachelor for engineering and technology in Automation and Control. Author of 6 publications in the field of theory of automatic control.



Борис Борисович Кулаков родился в 1984 г. Студент кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области теории автоматического управления.

V.B. Kulakov (b. 1984) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of theory of automatic control.

---

УДК 681.511.4

К. А. П у п к о в

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ САМОНАВЕДЕНИЕМ**

*Рассмотрена задача интеллектуализации процесса самонаведения летательного аппарата на маневрирующий объект в условиях сложного воздействия окружающей среды. Показано, что при традиционном решении задачи синтеза оптимального управления при синусоидальном маневре объекта имеет место бимодальная плотность вероятности промаха. Разработан метод самонаведения, основанный на прогнозе движения объекта и модифицированном скалярном оценивании состояния летательного аппарата, обеспечивающий нормальную плотность вероятности промаха и приемлемую точность наведения. Метод эффективен и при других видах маневра объекта.*

Интеллектуализированное управление предполагает афферентный синтез цели, прогноз ожидаемых результатов, выработку и исполнение управления, обратную связь по параметрам результата действия [1]. Поскольку самонаведение служит наиболее эффективным способом управления при сближении с каким-либо объектом, целесообразно рассмотреть проблему интеллектуализации этого процесса. Задача самонаведения решается, как правило, в условиях воздействия различного рода помех и маневра объекта, а в качестве метода наведения используется метод пропорциональной навигации, обеспечивающий минимизацию угловой скорости линии визирования “летательный аппарат–объект”. Синтез законов управления осуществляется в этом случае по критерию минимума среднего квадрата промаха в предположении, что закон распределения случайных воздействий нормальный. Решению задачи самонаведения посвящено большое число работ как отечественных, так и зарубежных авторов [2–5].

Однако при маневре объекта типа “змейка” (синусоидальный процесс со случайной фазой) этот критерий и предположение не являются