

УДК 629.3.027.3

EDN СКРHXO

ИЗМЕНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К УПРАВЛЯЕМОСТИ АВТОМОБИЛЯ КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

С.А. Коростелев

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: korsan73@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Барнаул, Россия**М.Ю. Молев**

ORCID: 0009-0000-3689-6249 e-mail: molev.michail@yandex.ru

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия**М.Г. Черевастов**

ORCID: 0000-0002-0104-4414 e-mail: chermamaxim_1978@mail.ru

ГУ МВД России по Нижегородской области
Нижний Новгород, Россия

Проанализированы изменения требований к управляемости транспортных средств, реализованные в последние годы. Показано, что для повышения безопасности дорожного движения необходимо оценивать не только конструкцию автомобиля, но и ее адаптацию к действиям, в том числе, ошибочным, со стороны водителя. Отмечено, что именно ошибки в позиционировании автомобиля на трассе и в угле поворота управляемых колес, наряду с длительностью переходного процесса, являются определяющими для безопасного выполнения маневра. При выполнении маневра «переставка» предложено уменьшить динамическую чувствительность к управлению транспортного средства для компенсации ошибок неопытных водителей, что актуально в связи с отсутствием нормативно-технических требований.

Ключевые слова: управляемость; безопасность; ошибки в действиях водителей; динамическая чувствительность к управлению.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коростелев, С.А. Изменение требований к управляемости автомобиля как путь повышения безопасности дорожного движения / С.А. Коростелев, М.Ю. Молев, М.Г. Черевастов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 3. С. 82-99. EDN СКРHXO

CHANGING VEHICLE HANDLING REQUIREMENTS AS A WAY TO IMPROVE ROAD SAFETY

S.A. Korostelev

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: korsan73@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russia**M.Yu. Molev**

ORCID: 0009-0000-3689-6249 e-mail: molev.michail@yandex.ru

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

M.G. CherevastovORCID: 0000-0002-0104-4414 e-mail: chermaxim_1978@mail.ru

Ministry of Internal Affairs of Russia in the Nizhny Novgorod Region

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses changes in vehicle handling requirements implemented in recent years. It is shown that in order to improve road safety, it is necessary to evaluate not only the vehicle design, but also its adaptation to driver actions, including erroneous ones. It is noted that errors in vehicle positioning on the road and in the wheels steer angle, along with the duration of the transient process, are decisive for the safe execution of a manoeuvre. Due to the absence of regulatory technical requirements, it is proposed to reduce the dynamic handling sensitivity of the vehicle to compensate for errors made by inexperienced drivers during the lane change manoeuvre.

Key words: handling; safety; driver errors; dynamic handling sensitivity.

FOR CITATION: S.A. Korostelev, M.Yu. Molev and M.G. Cherevastov. Changing vehicle handling requirements as a way to improve road safety. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 3. Pp. 82-99. EDN CKPHXO

Введение

Высокая аварийность – один из основных сдерживающих факторов развития автомобильного транспорта. Так, на 1 млн тонн перевозимого груза по автомобильным дорогам Российской Федерации приходится 2,14 погибших против 0,005 погибших на железнодорожном транспорте и 1,0 погибших на воздушном. На 1 млн перевезенных пассажиров число погибших на автомобильном транспорте составляет 1300 чел. (на железнодорожном транспорте – 0,0045 и 566 на воздушном) [1]. Социальная значимость дорожно-транспортных происшествий (ДТП) выходит далеко за рамки статистики погибших и пострадавших людей, а также количества поврежденных автомобилей. Это один из самых чувствительных индикаторов общего состояния общества, отражающий сложный комплекс проблем – от качества инфраструктуры до уровня правосознания граждан.

Во-первых, ДТП – это колоссальный демографический и репродуктивный удар. В авариях чаще всего гибнут люди молодого и среднего возраста, т.е. наиболее активная и трудоспособная часть населения. Каждая такая потеря — это не только человеческая трагедия, но и разрыв социальных связей, нереализованный потенциал и подрыв экономической стабильности. Во-вторых, аварии создают тяжелую нагрузку на систему здравоохранения и социальные службы. Тысячи людей становятся инвалидами, требуя длительного лечения, реабилитации и пожизненной поддержки со стороны государства и родственников. Это формирует «скрытое бремя» для бюджета и снижает качество жизни целых семей. В-третьих, высокая аварийность формирует устойчивый общественный стресс и недоверие. Когда люди каждый день видят агрессию на дорогах или боятся отпускать ребенка в школу, это разрушает ощущение безопасности и комфорта городской среды. Дорожный травматизм напрямую влияет на доверие к власти и ее способности обеспечивать базовые гарантии безопасности. Наконец, ДТП обнажают социальное неравенство и культурные проблемы. Культура вождения, состояние дорог и качество машин часто коррелируют с уровнем доходов. Аварии по вине пьяных или лихачей – это симптом более глубоких проблем, связанных с низкой ответственностью перед обществом.

Каждый из факторов аварийности требует изучения и анализа, на основе которых должны быть намечены пути снижения как самих ДТП, так и их материальных и социальных последствий.

Разработка эффективных мер снижения аварийности потребовала развития двух взаимосвязанных исследовательских направлений. Первое касается повышения качества подготовки водителей, включая как теоретическую, так и практическую составляющую обучения. Второе связано с адаптацией конструкции транспортных средств к антропометрическим, физиологическим и психофизическим особенностям человека, управляющего автомобилем. Научно обоснованных методов выбора параметров автомобиля, обеспечивающих макси-

мальную совместимость с физиологическими особенностями водителей до настоящего времени не существует, поэтому разработка требований к управляемости транспортных средств, максимально адаптированных к условиям дорожного движения, является актуальной научной задачей.

Материалы и методы

Фундаментальное понятие *управляемости* определяет принципиальную возможность перевода некой системы из одного состояния в другое за конечное время посредством целенаправленного внешнего воздействия. При этом состояние считается управляемым, если существует управляющее воздействие, которое переводит систему из этого состояния в исходное. Способность системы совершить обратный переход из исходного состояния в требуемое описывают понятием *достижимость*. При этом система является полностью достижимой, если из любого состояния можно перейти в любое другое. Эти два понятия эквивалентны для систем с непрерывным временем. Еще одно фундаментальное понятие – *наблюдаемость*. Состояние называют ненаблюдаемым, если выход «свободной» системы, т.е. системы, на которую не действует никакое управляющее воздействие, равняется 0 для любого момента времени, следующего за началом наблюдения. Система является полностью наблюдаемой, если ни одно из ее состояний не является ненаблюдаемым. Однако, несмотря на универсальность подхода Калмана [2], в прикладной области теории управляемого движения колесных машин до сих пор наблюдается значительный разброс, а порой и прямая противоречивость взглядов на трактовку этого понятия. Такая ситуация свидетельствует о высокой актуальности разработки унифицированной методологической системы. Создание подобной системы позволило бы не только устранить существующие неопределенности в подходах к идентификации параметров движения колесной машины как объекта управления, но и выработать единые критерии для объективной оценки ее динамических свойств и характеристик устойчивости.

В инженерной практике для количественной и качественной оценки управляемости обычно прибегают к анализу реакций объекта на тестовые воздействия. С этой целью на вход системы (органы управления) подаются нормированные сигналы – ступенчатое (имитация резкого поворота руля), импульсное или гармоническое воздействие, после чего регистрируются динамические или статические параметры движения. Принципиально важным обстоятельством является то, что в подобных экспериментах водитель исключается из контура управления. Система работает в разомкнутом режиме: после приложения заданного возмущения к рулевому управлению дальнейшее поведение объекта полностью определяется его собственными динамическими характеристиками, инерционными параметрами и воздействием внешней среды. Иными словами, автомобиль совершает неуправляемое движение, траектория которого является следствием исключительно его внутренних свойств как физического тела, а не результатом корректирующих действий человека.

В ходе проведения таких испытаний ключевым регистрируемым параметром часто выступает боковое ускорение. Этот параметр, рассматриваемый в совокупности с курсовым углом и угловой скоростью, служит основой для последующих выводов о динамических свойствах шасси и управляемости. Однако для перехода от замера ускорений к анализу траекторной устойчивости (т.е. к положению объекта в пространстве) возникает необходимость двукратного интегрирования сигнала бокового ускорения. Именно на этом этапе проявляется серьезная методологическая проблема. Каждая операция интегрирования привносит в решение неопределенные константы (начальные условия). В результате при интегрировании по времени даже незначительные погрешности измерений или ненулевые начальные условия приводят к тому, что расчетное положение объекта (координата) стремится к бесконечности или дрейфует во времени. С точки зрения теории автоматического регулирования, это поведение является прямым признаком того, что «изолированное» движение объекта (без обратной связи) по траектории неустойчиво.

Развивая этот тезис, можно прийти к выводу, что неуправляемый колесный объект (автомобиль с зафиксированным рулевым управлением после подачи импульса) ведет себя как астатическое звено второго порядка. Такая система обладает интегрирующими свойствами: будучи выведенной из равновесия, она не стремится вернуться к исходной траектории или занять новое стабильное положение, а продолжает накапливать отклонение. Свойство управляемости в полном смысле этого слова (по Калману) такой объект обретает лишь тогда, когда замыкается контур управления. Роль замыкающего звена выполняет водитель (или автоматический регулятор), который в реальном времени наблюдает за выходными координатами (положением машины на дороге, скоростью, ускорениями) и, сопоставляя их с желаемой траекторией, формирует корректирующие воздействия на руль.

При отсутствии водителя система теряет способность к наблюдению за собственными выходными сигналами, определяющими ее состояние. В терминах теории систем это означает, что система становится ненаблюдаемой. Потеря наблюдаемости влечет за собой и потерю управляемости в глобальном смысле: невозможно сформировать такую функцию управления (закон поворота руля), которая гарантированно перевела бы объект из любого начального положения в любое конечное состояние, поскольку текущее состояние системы неизвестно или не определено. Следует подчеркнуть, что классическое определение *управляемости*, данное Калманом еще в 1961 г. [3], неразрывно связано с понятием *наблюдаемости*. Эта фундаментальная диада остается универсальным инструментом при анализе движения объектов любой природы – от летательных аппаратов до колесных машин, что подчеркивает необходимость рассмотрения системы «водитель – автомобиль – среда» как единого целого.

Таким образом, для определения параметров управляемости необходимо учитывать не только реакцию транспортного средства на управляющее воздействие, но и оценку точности позиционирования его в пространстве, осуществляемую водителем или системой слежения беспилотного транспортного средства, а также его реакцию на корректирующее воздействие. Несмотря на то, что в общем виде данная концепция оценки управляемости наземных транспортных средств разрабатывалась в работах Н.Т. Катанаева [4], С.А. Осташевского [5] и многих других [6], в теории управления движением транспортных средств данный подход не получил широкого распространения. В общем виде различие в подходах к оценке управляемости автомобилей проиллюстрировано на рис. 1-3.

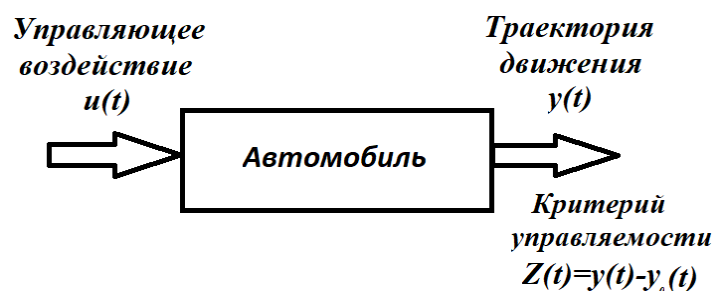


Рис. 1. Алгоритм оценки управляемости автомобиля без обратной связи, примененный при испытаниях на соответствие Глобальным техническим правилам № 8 («движение по усеченной синусоиде»)

Fig. 1. Algorithm for evaluating vehicle handling without feedback, applied during tests for compliance with UN Global technical regulation No. 8 (Sine with Dwell manoeuvre)

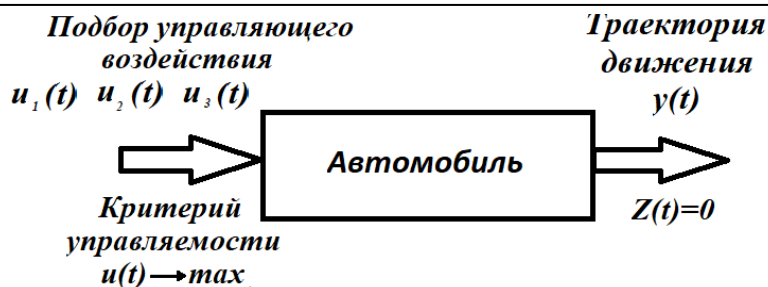


Рис. 2. Алгоритм оценки управляемости автомобиля без обратной связи, примененный при испытаниях на соответствие ГОСТ 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» («переставка»)

Fig. 2. Algorithm for evaluating vehicle handling without feedback, applied during tests for compliance with GOST 31507-2012. Road vehicles. Handling and stability. Technical requirements. Test methods (lane change manoeuvre)

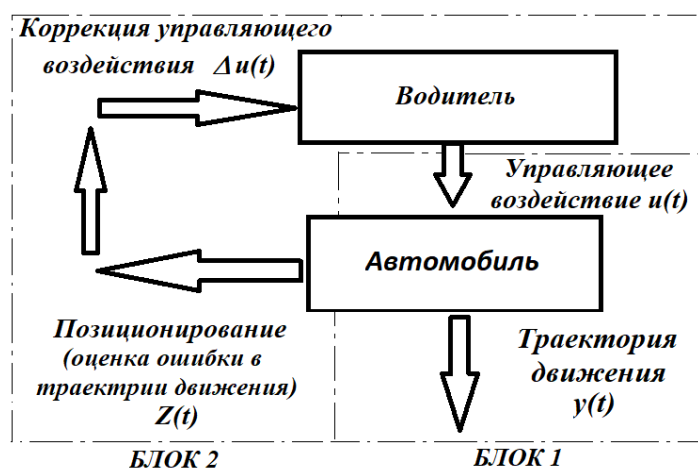


Рис. 3. Предлагаемый алгоритм оценки управляемости автомобиля с обратной связью, где БЛОК 1 представляет собой существующий комплекс мероприятий по оценке управляемости транспортных средств, а БЛОК 2 – дополнительный комплекс мероприятий

Fig. 3. Proposed algorithm for evaluating vehicle handling with feedback, where Block 1 represents the existing set of vehicle handling evaluation measures, and Block 2 represents an additional set of measures

Для анализа качества работы управления необходимо иметь математическое описание исследуемого процесса, а именно – изменение во времени координат системы, под которыми понимаются все переменные величины, характеризующие состояние системы в процессе ее функционирования. Параметры изменения координат (в том числе, скорости и ускорения их изменения) принято называть динамикой системы. Поскольку любая система управления состоит из множества взаимосвязанных функциональных элементов, работающих совместно, для получения математического описания всей системы вначале требуется составить математические описания каждого из этих элементов в отдельности. В свою очередь, математическое описание отдельного элемента устанавливает динамическую связь между его текущими значениями: входной величиной $x(t)$ и выходной величиной $y(t)$ в каждый рассматриваемый момент времени.

Описывая желаемую траекторию движения в виде зависимости $y_0(t)$, а реализуемую – как $y(t)$, которая является следствием управляющего воздействия $u(t)$, где время t принадлежит интервалу $0 < t \leq \infty$:

$$y(t) \equiv f(Z(t), u(t))$$

Если время протекания рассматриваемого процесса будет стремиться к бесконечности, то координаты, характеризующие состояние системы управления, примут некоторые постоянные значения. При этом как скорости их изменения, так и ускорения будут стремиться к 0. Такой процесс носит название статического, который характеризуется следующими установившимися показателями как: $x(\infty)=x_0=\text{const}$; $y(\infty)=y_0=\text{const}$. Для движения по заданной траектории необходимо сформировать управляющие воздействия u как сумму программного и позиционного управления $u = u^{\text{П}}(t) + \Delta u(Z(t))$, где $Z(t)$ оценка отклонений $Z(t) = y(t) - y_0$, полученная с помощью алгоритма оценивания, позволяющего обработать информацию $z(t) = Z(t) - Z^{\text{П}}$, записанную в линеаризованном виде: $z(t) = Hx + \xi(t)$, где матрица $H(t)$ определяется из известной программной траектории движения $y^{\text{П}}(t)$. При этом линеаризация уравнения обычно трактуется как замена фактической траектории движения на производную в точке установившегося режима $\Delta y(t) = k \Delta x(t)$.

Для текущих координат будет справедлива следующая запись уравнения движения:

$$y(t) = y_0 + \Delta y(t);$$

$$x(t) = x_0 + \Delta x(t);$$

где Δy , Δx , – отклонения координат y , x , от своих установившихся значений.

Тогда уравнения динамики системы в общем виде могут быть записаны как:

$$F(\ddot{y}, \dot{y}, y) = G(\dot{x}, x, u)$$

Для статических условий:

$$F(y_0) = G(x_0, u_0)$$

Для выполнения линеаризации, уравнение управления системы для статических условий раскладывают в ряд Тейлора по степеням отклонений элементов от их установившихся значений:

$$F(y_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}}\right)_0 \Delta \ddot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}}\right)_0 \Delta \dot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 \Delta y = G(x_0, u_0) + \left(\frac{\partial G}{\partial \dot{x}}\right)_0 \Delta \dot{x} + \left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial G}{\partial u}\right)_0 \Delta u + \dots$$

После, вычитая из последнего уравнения уравнение статики, без учета последующих членов разложения, имеющие малые действительные значения, получим линеаризованное дифференциальное уравнение динамики системы управления:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{y}}\right)_0 \Delta \ddot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{y}}\right)_0 \Delta \dot{y} + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 \Delta y = \left(\frac{\partial G}{\partial \dot{x}}\right)_0 \Delta \dot{x} + \left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial G}{\partial u}\right)_0 \Delta u$$

Необходимо отметить, что при помощи данного метода могут быть линеаризованы такие системы, производные всех элементов, которых в рассматриваемом диапазоне непрерывны и однозначны.

Применив к полученному дифференциальному уравнению преобразование Лапласа, получим:

$$D(s)Y(s) = N(s) X(s) + M(s) U(s)$$

где s – собственно оператор Лапласа; $Y(s)$, $X(s)$, $U(s)$ – изображения по Лапласу выходной и входной величин элемента и внешнего воздействия; а n , m , k показатели степени полиномов от оператора Лапласа s :

$$D(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^{n-i}; \quad N(s) = \sum_{i=0}^m b_i s^{m-i}; \quad U(s) = \sum_{i=0}^k c_i s^{k-i};$$

После ввода следующих обозначений:

$$W_x(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad u \quad W_u(s) = \frac{M(s)}{D(s)}$$

Тогда алгебраическое отношение функций времени по Лапласу можно записать в виде:

$$Y(s) = W_x(s) X(s) + W_u(s) U(s),$$

где отношения $W_x(s)$ и $W_u(s)$ представляют собой передаточные функции процесса управления (рис. 4).

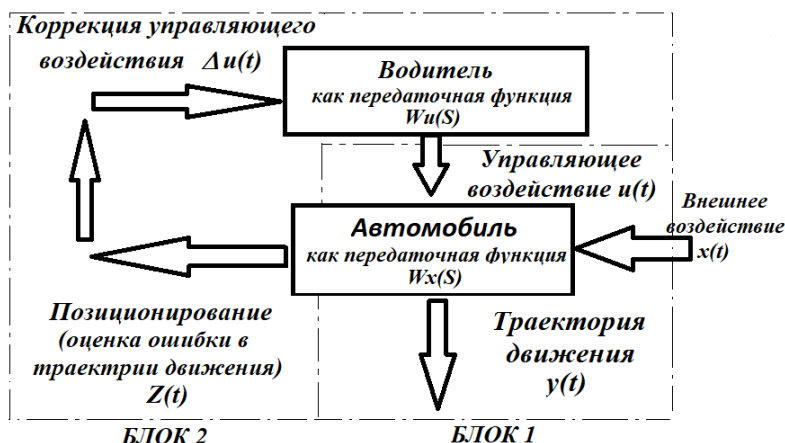


Рис. 4. Скорректированный алгоритм оценки управляемости автомобиля с обратной связью

Fig. 4. Adjusted algorithm for evaluating vehicle handling with feedback

В обобщенном виде все возможные типы внешних воздействий на систему управления автомобилем, для которых определяются параметры реакции транспортного средства, описываются с помощью набора элементарных математических функций. В классической теории автоматического управления в качестве таких функций, на которые может быть разложено произвольное возмущение, используются [7]:

- 1) *единичная импульсная функция* (обозначаемая как $\delta(t)$), которая описывает идеализированное воздействие бесконечно малой длительности и бесконечно большой амплитуды, но с конечным интегралом (площадью), равным единице.
- 2) *единичная ступенчатая функция* (обозначается как $1(t)$), характеризующую мгновенное переключение воздействия с нулевого уровня на постоянное единичное значение, остающееся неизменным при $t \geq 0$.
- 3) *гармоническая функция* (обозначается как $X_0 \cdot \sin(\omega t)$), которая представляет собой периодическое синусоидальное колебание с заданной амплитудой X_0 и угловой частотой ω .

В графическом виде данные функции представлены на рис. 5.

Функциональная связь между выходным и входным сигналом определяется при помощи частотной передаточной функции $W(j\omega)$, которая представляет собой отношение выходного и входного сигналов при разных частотах управляющего воздействия:

$$W(j, \omega) = \frac{X(j, \omega)}{Y(j, \omega)}$$

или, вводя в данную зависимость оператор Лапласа s , с учетом того, что $s=j\omega$:

$$W(j, \omega) = W(s) \Big|_{s=j\omega}$$

Согласно [7], частотная передаточная функция может быть представлена в виде:

$$W(j, \omega) = A(\omega)e^{j\psi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $A(\omega)$ – передаточное отношение между входным и выходным сигналом на разных частотах управления $A(\omega) = X_0(\omega)/Y_0(\omega)$ (для одной частоты, рис. 5в); $\psi(\omega)$ – фазовый сдвиг входного и выходного сигнала на частоте ω (для одной частоты, рис. 5в); $U(\omega)$ и $V(\omega)$ вещественная и мнимая составляющие передаточной функции, для которых справедливы следующие соотношения:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} \quad \text{и} \quad \psi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$$

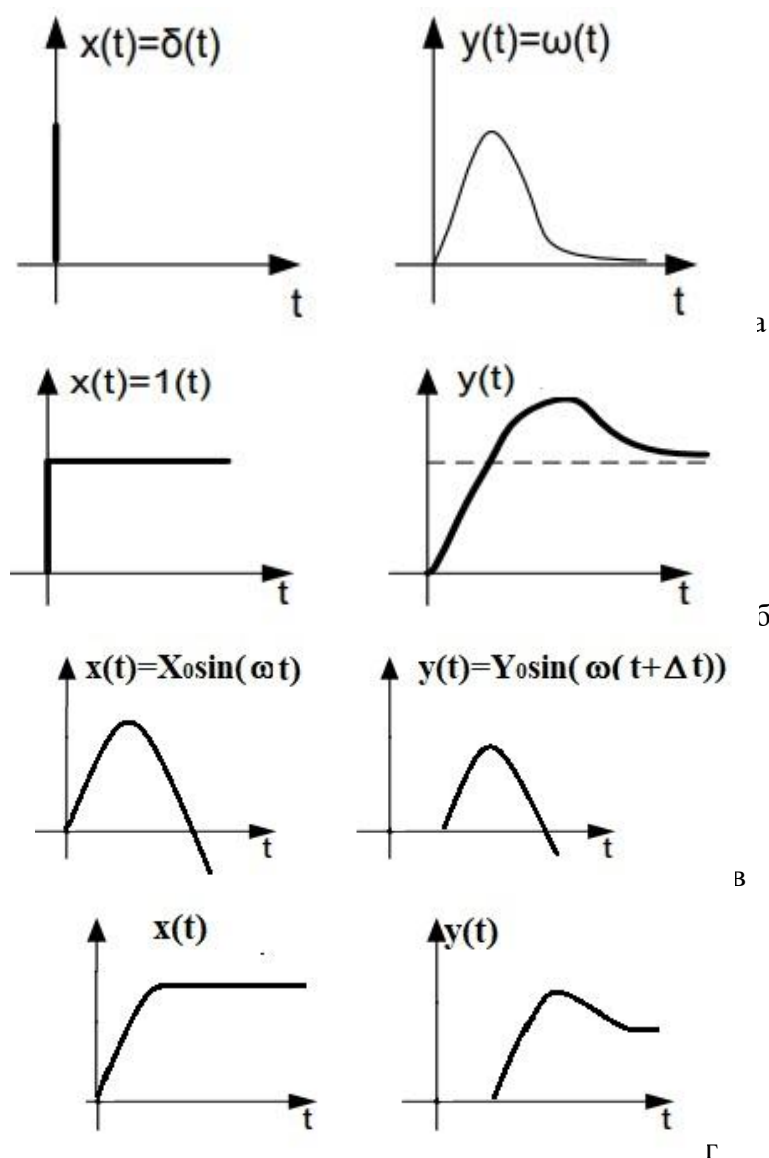


Рис. 5. Примеры взаимосвязи входных и выходных сигналов:

а – для единичной импульсной функции; б – для единичной ступенчатой функции; в – для гармонической функции; г – для комбинации гармонической и ступенчатой функций

Fig. 5. Examples of the relationship between input and output signals:

а – for a unit impulse function; б – for a unit step function; в – for a harmonic function; г – for a combination of harmonic and step functions

Приведенные зависимости являются характеристиками систем управления транспортных средств. Кроме обобщенных зависимостей, приведенных выше, также различают амплитудно-частотную характеристику, которая показывает, как изменяется амплитуда выходного сигнала при изменении частоты управляющих воздействий и фазовую частотную характеристику, которая показывает, как изменяются фазовые между входным и выходным сигналом при различных частотах управляющего воздействия.

Для упрощенного случая управления передним колесом велосипеда (без учета сил инерции и деформации шины), при выполнении условия $y(t)=x(t)$ значения передаточной функции $W(s)$ будет равняться 1; а амплитудно-фазово-частотные функции примут вид: $W(j;\omega)=1$; $A(\omega)=1$; $\psi(\omega)=0$. При наличии передаточного числа в рулевом механизме приведенные зависимости примут вид: $y(t)=kx(t)$ значения передаточной функции $W(s)$ будет равняться k ; а амплитудно-фазово-частотные функции примут вид: $W(j;\omega)=k$; $A(\omega)=k$; $\psi(\omega)=0$. При наличии в цепи управления инерционности первого порядка, когда связь

между входным и выходным сигналами описывается зависимостью: $(T+1)y(t)=kx(t)$, где T – параметр, характеризующий инерционность системы, называемый еще длительностью переходного процесса, значения амплитудно-фазово-частотных функций примут вид: $W(j;\omega)=1/(T\omega+1)$; $A(\omega)=1/(T^2\omega^2+1)^{1/2}$; $\psi(\omega)=-\arctg T\omega$.

В рассматриваемой системе время реакции водителя и время запаздывания системы автоматического управления может быть учтено при помощи следующих функциональных зависимостей:

$$y(t)=x(t-\tau); W(j;\omega)=e^{-j\omega\tau}; A(\omega)=1; \psi(\omega)=-\omega\tau$$

Координаты $x_i(t)$ описывают первый (нижний) уровень управления, координаты $y^{\Pi}(t)$ – второй уровень управления. Таким образом, рассматриваемая замкнутая управляемая динамическая система имеет двухуровневое управление, при этом нижний уровень решает задачу стабилизации уравнений в отклонениях от программного движения. Данный подход к оценке управляемости транспортных средств подразумевает наличие двух критериев. Во-первых, управляемость оценивается по степени отклонения траектории движения при заданном управляющем воздействии (программном управлении), во-вторых, управляемость оценивается по степени изменения управляющего воздействия, необходимого для движения по заданной траектории (или позиционному управлению). Данный подход к оценке управляемости рассматривается в классической теории управления. Отсутствие такого подхода в теории движения наземных транспортных средств приводит к созданию аварийно-опасных конструкций, не учитывающих поведенческие особенности водителя, в частности возможность наличия в его действиях ошибок позиционирования и управления.

Таким образом, с учетом наличия отклонений при выполнении маневров, обусловленных как психологическими, так и техническими причинами, уравнение управляемого движения примет вид: $y(t) = f(Z(t), u(t), \Delta u(t))$, где $Z(t)$ – ошибка в позиционировании автомобиля, связанная с техническими особенностями автомобиля и психологическом состоянии водителя (или функционировании системы обратной связи беспилотного автомобиля), а $\Delta u(t)$ – корректирующее воздействие со стороны оператора (или системы управления беспилотного автомобиля).

На основании изложенного следует, что одним из основных параметров, от которого зависит качество работы системы управления, является точность позиционирования автомобиля на дороге. Данный параметр является определяющим для выбора конструкции рулевого управления. Отсутствие учета данной величины определял только нижнюю границу значения передаточного отношения рулевого механизма, которая, согласно [8], должна быть не меньше $20/L$, (где L – длина колесной базы автомобиля). При этом научно обоснованная верхняя граница данной величины до сих пор не установлена.

Результаты

Для решения поставленной задачи рассмотрим объезд внезапно возникшего препятствия с точки зрения теории управления. Оценить существующий и предлагаемый подход к оценке управляемости транспортных средств можно с использованием параметров выполнения упражнения «переставка», для обычных автомобилей описанное в работе [9], а для беспилотных – в работе [10]. Управляющее воздействие для данного маневра можно записать в виде гармонической функции вида $u(t) = X_0 \sin(\omega t)$. В графическом виде изменение управляющего воздействия при объезде препятствия, а также изменение траектории движения приведены на рис. 6-8.

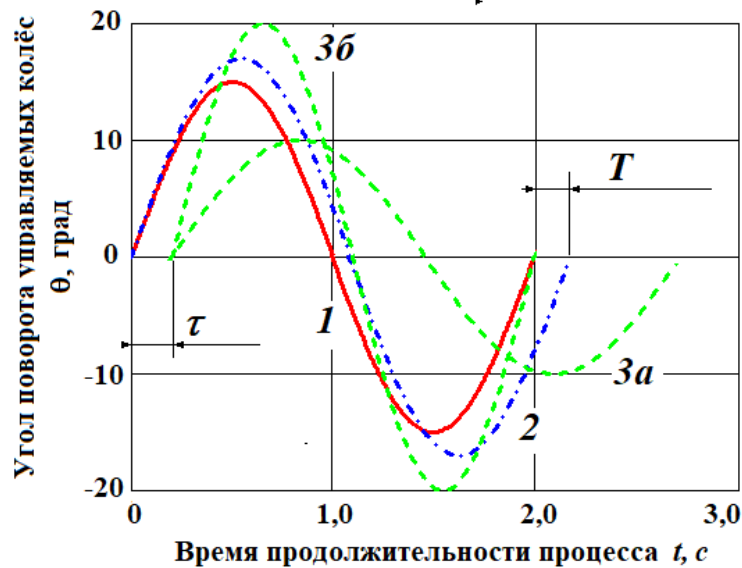


Рис. 6. Изменение угла поворота управляемых колес автомобиля при выполнении маневра «переставка»:

1 – без корректирующего воздействия со стороны оператора ($u(t)$); 2 – с корректирующим воздействием со стороны оператора ($u(t) + \Delta u(t)$) для коррекции длительности переходного процесса T ; 3a – с корректирующим воздействием со стороны оператора ($u(t) + \Delta u(t)$) для коррекции времени реакции водителя или системы τ за счет увеличения времени управляющего воздействия; 3б – с корректирующим воздействием со стороны оператора ($u(t) + \Delta u(t)$) для коррекции времени реакции водителя или оператора τ за счет увеличения времени управляющего воздействия значения передаточной функции k

Fig. 6. Change in the wheels steer angle during the lane change manoeuvre:

1 – without corrective action from the driver ($u(t)$); 2 – with corrective action from the driver ($u(t) + \Delta u(t)$) to correct the transient process duration T ; 3a – with corrective action from the driver ($u(t) + \Delta u(t)$) to correct the driver or system response time τ by increasing the control action duration; 3b – with corrective action from the driver ($u(t) + \Delta u(t)$) to correct the driver or system response time τ by increasing the control action duration and the transfer function coefficient k

Требования к точности позиционирования беспилотных транспортных средств $Z(t)$ описаны в работе [10], согласно которой погрешность отклонения восстановленной траектории от истинной не должна превышать 2 % от пройденного расстояния. При этом погрешность определения координат в горизонтальной плоскости не должно превышать 0,1 м, погрешность определения горизонтальной составляющей скорости, движения не должно быть больше 0,02 м/с; погрешность определения горизонтальной составляющей ускорения не должно быть больше 0,1 м/с, а погрешность определения угловой ориентации – 0,5 град. В предварительном национальном стандарте [11] рекомендуется применение еще более точных параметров позиционирования – погрешность определения координат в горизонтальной плоскости – не менее 0,05 м, а угловое отклонение – не более 0,1 град. Задача обнаружения границ дороги является нетривиальной, так как из-за движения автомобиля расстояние от транспортного средства до границы обочины постоянно изменяется.

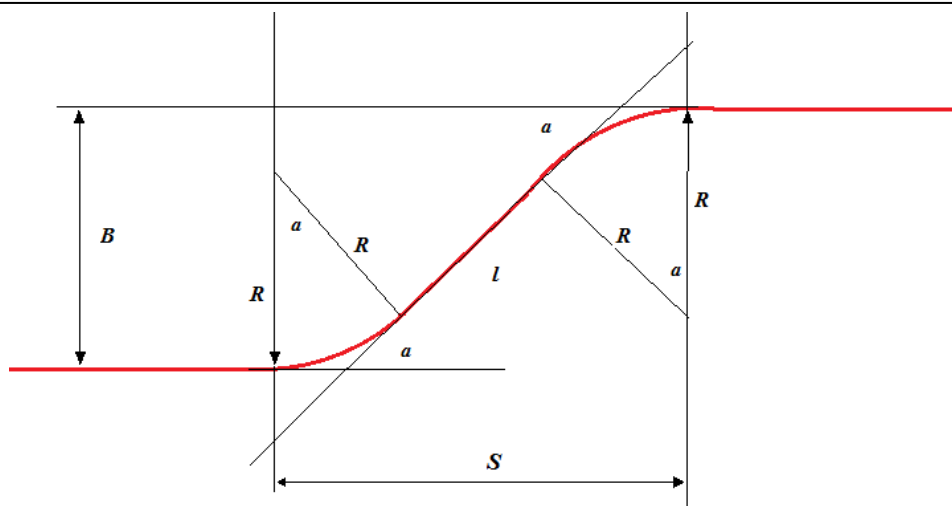


Рис. 7. Идеализированная траектория движения автомобиля при выполнении маневра «переставка»:

S – длина участка, на котором автомобиль должен перестроиться; B – величина бокового смещения транспортного средства при перестроении в м; R – радиус кривизны траектории при движении с поворотом управляемых колес в м; α – максимальный угол отклонения автомобиля от прямолинейного движения при движении с поворотом управляемых колес, в рад; l – длина участка траектории по которому автомобиль движется без поворота управляемых колес (длительность переходного процесса [10])

Fig. 7. Idealized trajectory of the vehicle during the lane change manoeuvre

S – distance over which the vehicle must change lanes; B – lateral displacement of the vehicle during the lane change, in m; R – radius of curvature of the trajectory when moving with steered wheels turned, in m; α – maximum angular deviation of the vehicle from straight-line motion when moving with steered wheels turned, in rad; l – length of the trajectory segment along which the vehicle moves without steering the wheels (transient process duration [10])

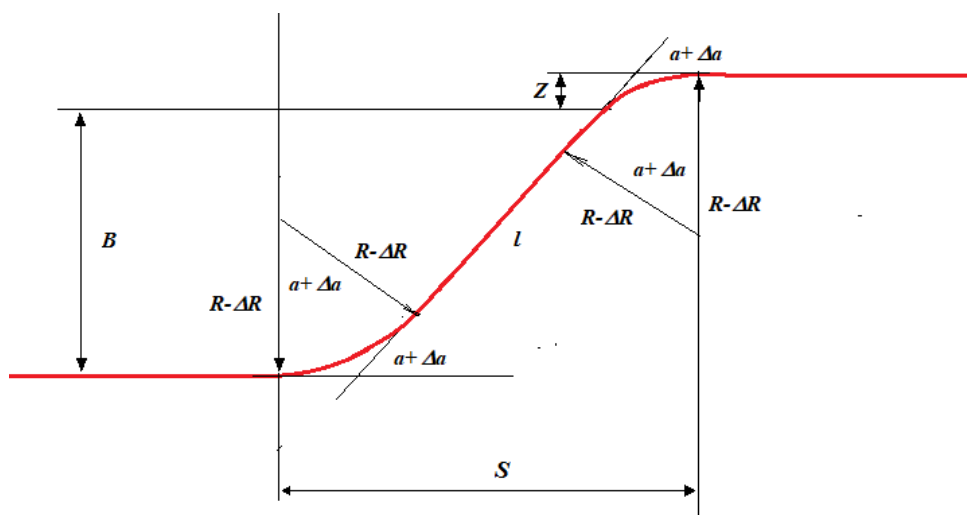


Рис. 8. Изменение траектории движения автомобиля при выполнении маневра «переставка» под действием корректирующих действий водителя:

Z – отклонение, связанное с неточностью позиционирования;
 $\Delta\alpha$ – отклонение угла траектории; ΔR – суммарное изменение радиуса кривизны траектории

Fig. 8. Change in the vehicle trajectory during the lane change manoeuvre under the driver's corrective actions:

Z – deviation related to positioning inaccuracy;
 $\Delta\alpha$ – trajectory angle deviation; ΔR – total change in the radius of curvature of the trajectory

Геометрические соотношения, объясняющие работу алгоритмов системы управления беспилотного автомобиля, представлены на рис. 9.

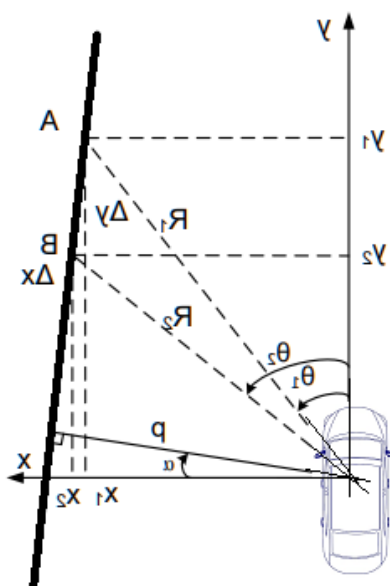


Рис. 9. Принципиальная схема к алгоритму позиционирования автомобиля на проезжей части
Fig. 9. Schematic diagram of the vehicle positioning algorithm on the roadway

При решении задачи позиционирования автомобиля на дороге измерительный луч, ширина которого стремится к 0, последовательно занимает положение, характеризуемое углами $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$. Каждое положение луча характеризуется временем запаздывания сигнала, отраженного от границы обочины. Линия границы обочины или полосы движения аппроксимируется прямой линией, которая характеризуется уравнением: $x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0$, где p – искомое расстояние до обочины, равное: $R_1 \sin(\theta_1 - \alpha)$ или $R_2 \sin(\theta_1 - \alpha)$ или $R \sin(\theta) \approx R\theta$. Относительная ошибка такого исчисления может быть получена при решении уравнения: $\Delta p/p = \Delta R/R + \Delta \theta/\theta$, где $\Delta R/R$ – относительная погрешность измерения расстояния до границы полосы движения, а $\Delta \theta/\theta$ – относительная погрешность измерения угловых величин. Сравнивая погрешности измерения данных величин [12], можно сделать вывод, что определяющим показателем в рассматриваемом соотношении является погрешность в измерении углов, которая может достигать 22 %, в то время как погрешность измерения длины не превышает 6 %, т.е. $\Delta p/p \approx \Delta \theta/\theta$, что для полосы движения шириной 3-5 м дает погрешность позиционирования, равную 0,6-1,0 м.

Требования к водителям по точности позиционирования автомобиля на дороге установлены в Приложении № 8 Административного регламента Министерства внутренних дел Российской Федерации (утвержден приказом МВД России от 20.02.2021 № 80). Этот документ направлен на регулирование предоставления государственной услуги по приему экзаменов на право управления транспортными средствами и выдаче водительских удостоверений. Согласно этому документу, к числу ошибок, при которых водитель не допускается к управлению, относятся, в частности, неточная остановка относительно линии «стоп». Ошибка выражается в заезде за указанную линию или, напротив, в остановке на расстоянии более 1 м до нее – причем как при движении передним ходом, так и при движении задним ходом. Кроме того, к аналогичным нарушениям отнесено пересечение границы условного коридора движения, ширина которого определяется исходя из габаритной ширины транспортного средства плюс боковой интервал, равный 1 м. Фактически можно считать, что водитель должен обеспечивать позиционирование своего автомобиля с погрешностью не более одного метра относительно заданных ориентиров. Кроме того, при выполнении маневра «маневрирование» водитель должен проходить коридор с изменением направления движения, ширина

которого должна составлять две длины автомобиля + 1 м. С учетом того, что в данный коридор должен вписаться автомобиль некоторой ширины, максимальное боковое смещения автомобиля не должно превышать общую ширину коридора за исключением его ширины. Для автомобиля длиной 5 м и шириной 1,5 м, данная величина составит 8,5 м. При этом длина выполнения маневра должна равняться 5 м. Угол поворота автомобиля при данном маневре должен составлять $\alpha = \arctg B/S$ [13]. Как уже было сказано выше, длина выполнения маневра S будет равняться 5 м, а величина смещения в поперечном направлении от 5 м для движения по идеальной траектории до 8,5 м при движении с максимальным отклонением. Тогда угол отклонения от прямолинейной траектории составит $\arctg 5/5$ или 0,785 рад для оптимального выполнения маневра до $\arctg(8,5/5)$ или 1,03 рад для предельно допустимой траектории. То есть угловая точность позиционирования автомобиля на дороге не должна превышать 0,254 рад или 15° , что соответствует требованиям, предъявляемым к беспилотным транспортным средствам. При этом фактическая точность позиционирования как у беспилотных автомобилей [13], так и у водителей как минимум в два раза выше установленных предельно-допустимых значений.

Следует отметить, что полученные данные справедливы для статического позиционирования. При позиционировании в динамическом режиме автомобиль за время реакции системы успевает отклониться на некоторое расстояние, которое в теории движения автомобиля определяется как [14]:

$$Z(t) = 1,4LV/1000 \text{ или } Z(t) = Z_{CT}(t \rightarrow \infty) + (V - 40)/100$$

При движении по криволинейной траектории точность позиционирования на дороге определяется как:

$$Z_k(t) = (1,4L + 5)V/1000 = Z(t) + V/200$$

Тогда точность углового позиционирования будет определяться как:

$$\Delta\theta(t) = \arctg \frac{V}{200L} \approx \frac{V}{200L},$$

где L – длина колесной базы автомобиля, а 100 и 200 – переводные коэффициенты, имеющие размерность м*ч/км.

Ошибки позиционирования приводят к уменьшению ширины коридора движения, в результате чего в приведенных зависимостях значение B , должно быть заменено на величину $B_0 - Z(t) = B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (V - 40)/100 - V/200$.

При рассмотрении комплексной системы оценки управления автомобилем необходимо определить, какие именно корректирующие воздействия $\Delta u(t)$ на отклонения в движении автомобиля применяются на практике. Изменение угла поворота автомобиля можно наглядно представить, как разницу между оптимальным углом наклона траектории в центре участка дороги перед выполнением маневра «переставка». Полученная зависимость может быть получена при решении следующего уравнения:

$$V = \sqrt{aR} = \sqrt{a \frac{S - l \cos \alpha}{2 \sin \alpha}}$$

$$\Delta V = \frac{V}{V_{OPT}} \sqrt{\frac{R}{R_{MAX}}} = \sqrt{\frac{\sin \alpha_{OPT}}{\sin \alpha} \frac{S - l \cos \alpha}{S - l \cos \alpha_{OPT}}}$$

где:

$$\alpha = x \pm \arccos\left(\frac{1}{\Psi}\right) = \arccos \frac{\left(1 - \frac{B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (3V - 80)/200}{2R}\right)}{\Psi} \pm \arccos\left(\frac{1}{\Psi}\right) = \arcsin \frac{S}{2R\Psi} \pm \arccos\left(\frac{1}{\Psi}\right);$$

где

$$\Psi = \sqrt{\left(\frac{S}{2R}\right)^2 + \left(1 - \frac{B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (3V - 80)/200}{2R}\right)^2}$$

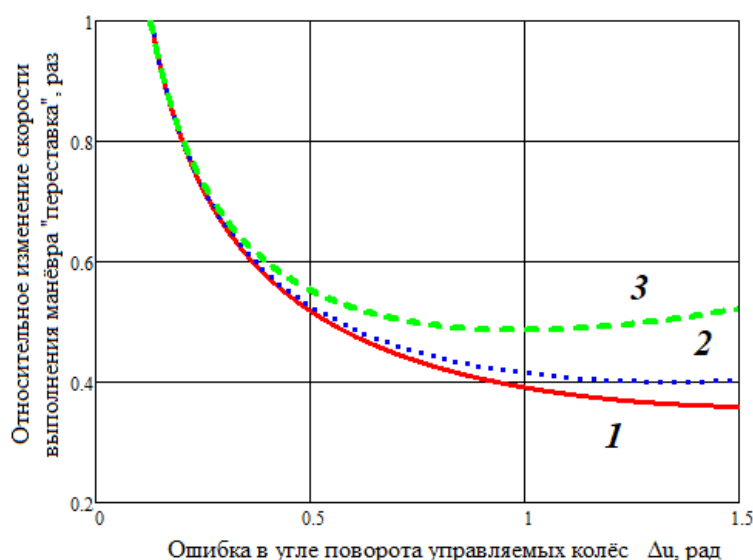


Рис. 10. Взаимосвязь между уменьшением скорости выполнения маневра «переставка» и ошибкой водителя в угле поворота управляемых колес для случая, когда длительность переходного процесса равна:
 1 – 0 с; 2 – 0,2 с; 3 – 0,5 с

Fig. 10. Relationship between the reduction in the speed of the lane change manoeuvre and the driver's error in the wheels steer angle for the case where the transient process duration is:
 1 – 0 s; 2 – 0.2 s; 3 – 0.5 s

С учетом того, что ошибка в угле поворота управляемых колес (как это было описано выше) состоит из статической (0,1-0,254 рад) и динамической ($V/200L$) составляющей, изменение относительной скорости прохождения поворота будет меняться в диапазоне от 0,1 до 0,35 рад, что свидетельствует о стационарности влияния ошибки в угле поворота управляемых колес на динамику выполнения маневра «переставка» и практически полном отсутствии влияния длительности переходного процесса на данный параметр. Для дальнейших расчетов можно принять, что учет точности позиционирования автомобиля на дороге снижает скорость выполнения маневра «переставка» от 0 до 30 %.

На скорость выполнения маневра гораздо большее влияние оказывает время реакции водителя или системы управления беспилотным автомобилем на отклонение от заданной траектории τ . В [14] длительность данного процесса, описанная как «выбор водителем скорости движения по условиям видимости элементов дороги в направлении движения» рекомендуют выбирать равной 0,3 с. По данным, приведенным в работе [15], при скорости выполнения маневра «переставка» со скоростью 70 км/ч безопасное время задержки сигнала составляет 0,3 с, 40 км/ч – 0,7 с, а 10 км/ч – 0,9 с. На момент написания работы беспилотный автомобиль выполнял маневр «переставка» со скоростью 11 км/ч (что соответствует времени задержки сигнала 0,9 с). В настоящее время скорость выполнения данного маневра увеличилась до 40 км/ч (время задержки сигнала 0,7 с). С другой стороны, исследование изменения времени реакции водителя в реальных условиях эксплуатации [16] показывают, что время реакции водителей от возраста может изменяться в три раза, также время реакции может меняться от условий освещенности. В конце смены работы водителя, за счет накопления усталости время реакции водителя может изменяться на 15-20 % [17]. Поэтому временной диапазон запаздывания реакции на управляющее воздействие в диапазоне от 0,3 до 0,7 с применяемый для определения параметров управляемости является обоснованным.

Для выполнения маневра «переставка», как было отмечено выше, автомобиль должен вписаться в коридор, имеющий ширину, равную B , которая с учетом времени реакции системы примет вид:

$$B_0 - Z(t) = B_0 - Z_{CT} - L \sin \theta - (0,015V + 0,4) - 2\tau V (\cos(\alpha_{опт} + \Delta u) - \cos \alpha_{опт})$$

Коэффициент 2 показывает, что при выполнении маневра «переставка» водитель должен оценивать угловое положение автомобиля дважды: после поворота автомобиля направо и после его возвращения к движению в первоначальном направлении.

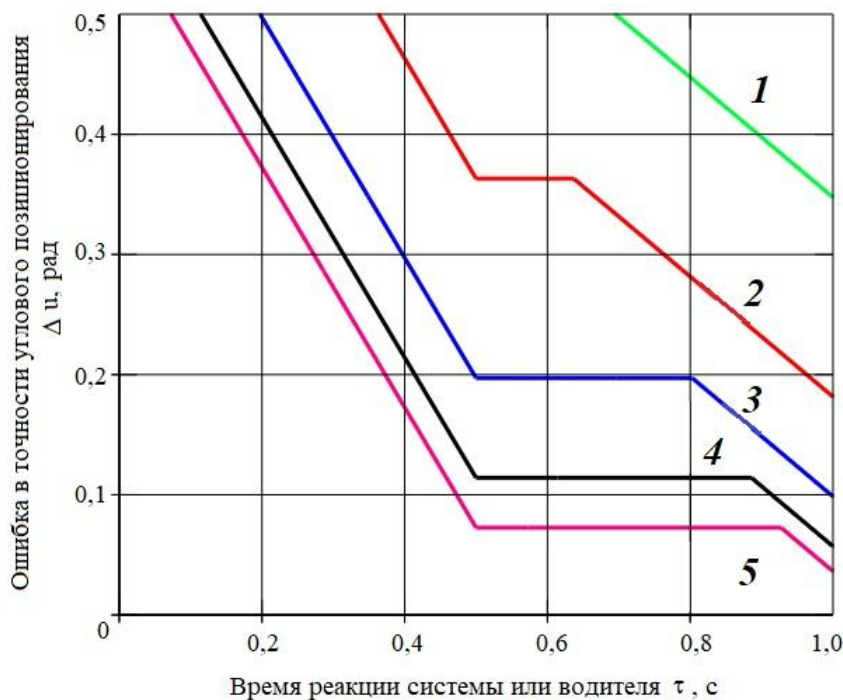


Рис. 11. Допускаемые соотношения между временем реакции системы τ на ошибку позиционирования Δu , для обеспечения выполнения маневра «переставка» со скоростью:
 1 – 10 км/ч; 2 – 20 км/ч; 3 – 40 км/ч; 4 – 80 км/ч; 5 – 160 км/ч

Fig. 11. Permissible relationships between the system response time τ to the positioning error Δu to ensure execution of the lane change manoeuvre at a speed:
 1 – 10 km/h; 2 – 20 km/h; 3 – 40 km/h; 4 – 80 km/h; 5 – 160 km/h

Для определения рационального передаточного отношения рулевого механизма заменим величину $\alpha_{\text{опт}}$ на $K\alpha$. тогда зависимость скорости выполнения маневра «переставка» от данного параметра примет вид, показанный на рис. 12.

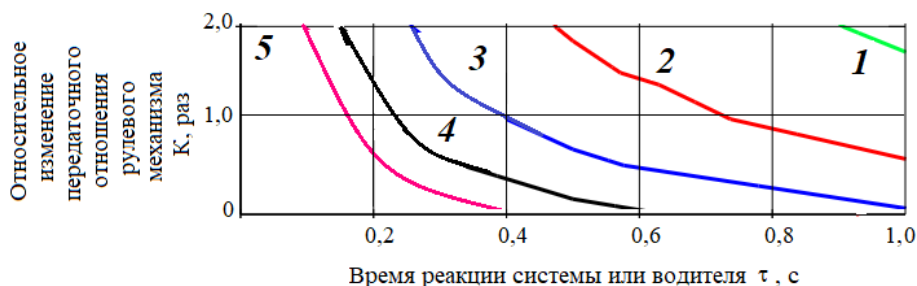


Рис. 12. Допускаемые соотношения между временем реакции системы τ на ошибку позиционирования Δu , равную 0,3 рад, и коэффициентом изменения передаточного отношения рулевого механизма K , для обеспечения выполнения маневра «переставка» со скоростью:
 1 – 10 км/ч; 2 – 20 км/ч; 3 – 40 км/ч; 4 – 80 км/ч; 5 – 160 км/ч

Fig. 12. Permissible relationships between the system response time τ to the positioning error $\Delta u = 0.3$ rad and the coefficient of variation of the steering ratio K to ensure execution of the lane change manoeuvre at a speed:
 1 – 10 km/h; 2 – 20 km/h; 3 – 40 km/h; 4 – 80 km/h; 5 – 160 km/h

Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что существуют условия при которых исследуемый автомобиль технически не сможет выполнить маневр «переставка», так как для его выполнения угол $\alpha_{\text{отт}}$, как и коэффициент изменения передаточного отношения рулевого механизма K , должны иметь значения, отличные от 0. Таким образом, при времени реакции системы большей, чем 0,6 с (при точности позиционирования 0,3 рад), прохождение рассматриваемого маневра со скоростью большей, чем 80 км/ч, является невозможным событием. Прохождение исследуемого маневра со скоростью 40 км/ч является возможным при времени реакции системы меньшей, чем 1,0 с.

Выводы и обсуждение

Полученные данные явно свидетельствуют о том, что определяющим показателем в управлении автомобилем являются ошибки водителя. Однозначно также, что чем более опытный водитель выполняет маневр «переставка», т.е. чем выше точность позиционирования транспортного средства на дороге и меньше время реакции на изменение состояния системы, тем более безопасным становится автомобиль. Поскольку в современных условиях требования к скорости выполнения маневра «переставка» отсутствуют, и допуск транспортных средств в эксплуатацию на данном параметре не основывается, постольку повышения поворачиваемости автомобиля до значений, при которых опытные водители могут выполнить маневр «переставка», не требуется. Соответственно, имеется возможность выпускать автомобили с меньшей скоростью поворота. Это может компенсировать ошибки неопытных водителей при выполнении контраварийного маневра. Работ по определению количественных показателей управляемости, обеспечивающих минимальную аварийность автомобиля в эксплуатации, практически не проводилось.

Библиографический список

1. Российский статистический ежегодник. 2025: Стат. сб. / Росстат. – М., 2025. – 621 с.
2. **Ширяев, В.И.** К задаче оценивания ошибок измерений в системах управления при неполной информации / В.И. Ширяев, Д.В. Хаданович // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 25-40.
3. **Раецкая, Е.В.** Полная условная управляемость и полная наблюдаемость линейных систем: специальность 01.01.02 «Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление»: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Раецкая Елена Владимировна. – Воронеж, 2004. – 149 с.
4. **Катанаев, Н.Т.** Системные и несистемные оценки управляемости автомобиля / Н.Т. Катанаев, А.В. Лепешкин // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – Т. 1, № 1(23). – С. 112-116.
5. **Осташевский, С.А.** Определение понятий «управляемость автомобилей» и «вождение машины» в системе «водитель – автомобиль – дорога» // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2013. – № 61-62. – С. 300-305.
6. **Шадрин, С.С.** Методика расчетной оценки управляемости и устойчивости автомобиля на основе результатов полигонных испытаний. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук по специальности 05.05.03. – М.: МАДИ 2009. 132с.
7. Теория автоматического управления: конспект лекций для студентов направления подготовки 151900 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств / сост. Н.Г. Рассказчиков; Владим. гос. ун-т., 2012. – 261с.
8. **Осташевский, С.А.** Исследование способности системы «автомобиль – водитель – дорога» к объезду неожиданного препятствия // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2014. – № 2. – С. 7.
9. **Молев, Ю.И.** Аналитическое сравнение показателей управляемости автомобилей при выполнении маневров «Переставка» и «Движение по усеченной траектории» / Ю.И. Молев, М.Г. Череватов, С.В. Лазаревич, А.В. Ерофеева // Воронежский научно-технический Вестник. – 2025. – Т. 1, № 1(51). – С. 114-124.

10. **Чикрин, Д.Е.** Разработка высокоточной спутниковой локально-инерциальной системы навигации для беспилотного управления транспортными средствами / Д.Е. Чикрин, П.А. Савинков, П.А. Кокунин, Р.И. Шагиев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 12. – С. 1094-1102.
11. ПНСТ 825-2023 Интеллектуальные транспортные системы. Динамическая цифровая карта дорожного движения. Точность данных для формирования динамической цифровой карты дорожного движения для целей движения высокоавтоматизированных транспортных средств.
12. **Шнайдер, В.Б.** Радиолокационная система обеспечения безопасности движения наземных транспортных средств: специальность 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2014. – 22 с.
13. Разработка автомобильной системы определения и удержания в полосе движения / Д.М. Порубов, Д.В. Зезюлин, Д.Ю. Тюгин [и др.] // Транспортные системы. – 2018. – № 2(8). – С. 25-29.
14. Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Ю.Б. Суворов. Изд. «Экзамен». М., 2003.
15. **Ендачёв, Д.В.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения беспилотного автомобиля дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук по специальности 05.05.03. – М.: НАМИ, 2016. 185 с.
16. **Евтюков, С.А.** Дорожно-транспортные происшествия: Расследование. Реконструкция. Экспертиза. / С.А. Евтюков, Я.В. Васильев – СПб: Изд-во ДНК, 2008. – 392 с.
17. **Юрецки Р.** Методы тестирования и время реакции водителей / Р. Юрецки, Т. Станчик // Eksploatacja i Niezawodnosc – Техническое обслуживание и надежность. – 2011. – № 3. – С. 84-91.
18. **Бахмутский, М.М.** Зависимость управляемости автопоезда от передаточного числа механизма поворота прицепа / М.М. Бахмутский, Л.Л. Гинцбург // Труды НАМИ. Выпуск № 129. Управляемость автомобилей и автопоездов. Рулевой привод. – М.: Изд-во НАМИ, 1971. – С. 36-42.

References

1. Rossiyskiy statistichyeskiy yezhegodnik. 2025: Stat. sb. [Russian Statistical Yearbook. 2025: Statistical Collection]. Moscow: Rosstat; 2025. 621 p. (in Russian).
2. Shiryaev V.I., Khadanovich D.V. K zadache otsenivaniya oshibok izmereniy v sistemakh upravleniya pri nepolnoy informatsii [On the problem of estimating measurement errors in control systems under incomplete information]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics]. 2018;18(4):25-40. (in Russian).
3. Raetskaya E.V. Polnaya uslovnaya upravlyaemost' i polnaya nablyudaemost' lineynykh sistem [Complete conditional controllability and complete observability of linear systems]. PhD thesis. Voronezh; 2004. 149 p. (in Russian).
4. Katanaev N.T., Lepeshkin A.V. Sistemnye i nesistemnye otsenki upravlyaemosti avtomobilya [System and non-system assessments of vehicle controllability]. *Izvestiya MGTU MAMI* [Proceedings of MSTU MAMI]. 2015;1(1(23)):112-116. (in Russian).
5. Ostashevsky S.A. Opredelenie ponyatiy «upravlyaemost' avtomobiley» i «vozhdenie mashiny» v sisteme «voditel' – avtomobil' – doroga» [Definition of the concepts of «vehicle controllability» and «driving» in the «driver – vehicle – road» system]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University]. 2013;(61-62):300-305. (in Russian).
6. Shadrin S.S. Metodika raschetnoy otsenki upravlyaemosti i ustoychivosti avtomobilya na osnove rezul'tatov poligonnykh ispytaniy [Methodology for computational assessment of vehicle controllability and stability based on proving ground test results]. PhD thesis. Moscow: MADI; 2009. 132 p. (in Russian).
7. Rasskazchikov N.G., compiler. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: konspekt lektsiy dlya studentov napravleniya podgotovki 151900 – Konstruktorsko-tekhnologicheskoye obespecheniye mashinostroitel'nykh proizvodstv [Automatic Control Theory: lecture notes for students of the training direction 151900 – Design and Technological Support of Mechanical Engineering Productions]. Vladimir: Vladimir State University; 2012. 261 p. (in Russian).
8. Ostashevsky S.A. Issledovaniye sposobnosti sistemy «avtomobil' – voditel' – doroga» k ob"yezdu neozhidannogo prepyatstviya [Study of the ability of the «vehicle – driver – road» system to avoid an unexpected obstacle]. *Nauchnyye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Works of Vinnytsia National Technical University]. 2014;(2):7. (in Russian).

9. Molev Y.I., Cherevastov M.G., Lazarevich S.V., Erofeeva A.V. Analiticheskoye sravneniye pokazateley upravlyaemosti avtomobiley pri vypolnenii manevrov «Perestavka» i «Dvizheniye po usechennoy trayektorii» [Analytical comparison of vehicle controllability indicators when performing "Lane Change" and «Movement along a truncated trajectory» maneuvers]. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy Vestnik* [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]. 2025;1(51):114-124. (in Russian).
10. Chikrin D.E., Savinkov P.A., Kokunin P.A., Shagiev R.I. Razrabotka vysokotochnoy sputnikovoy lokal'no-inertsial'noy sistemy navigatsii dlya bespilotnogo upravleniya transportnymi sredstvami [Development of a high-precision satellite local-inertial navigation system for unmanned vehicle control]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering]. 2020;63(12):1094-1102. (in Russian).
11. PNST 825-2023 Intellekтуал'nyye transportnyye sistemy. Dinamicheskaya tsifrovaya karta dorozhnogo dvizheniya. Tochnost' dannykh dlya formirovaniya dinamicheskoy tsifrovoy karty dorozhnogo dvizheniya dlya tseley dvizheniya vysokoavtomatizirovannykh transportnykh sredstv [Intelligent Transport Systems. Dynamic digital road traffic map. Data accuracy for the formation of a dynamic digital road traffic map for the purpose of movement of highly automated vehicles]. (in Russian).
12. Shnaider V.B. Radiolokatsionnaya sistema obespecheniya bezopasnosti dvizheniya nazemnykh transportnykh sredstv [Radar system for ensuring traffic safety of ground vehicles]. Abstract of PhD thesis. Moscow; 2014. 22 p. (in Russian).
13. Porubov D.M., Zezyulin D.V., Tyugin D.Y., et al. Razrabotka avtomobil'noy sistemy opredeleniya i uderzhaniya v polose dvizheniya [Development of an automotive lane detection and keeping system]. *Transportnyye sistemy* [Transport Systems]. 2018;(2(8)):25-29. (in Russian).
14. Suvorov Y.B. Sudebnaya dorozhno-transportnaya ekspertiza [Forensic road traffic accident investigation]. Moscow: Ekzamen; 2003. (in Russian).
15. Endachev D.V. Prognozirovaniye kharakteristik krivolineynogo dvizheniya bespilotnogo avtomobilya [Forecasting of curvilinear motion characteristics of an unmanned vehicle]. PhD thesis. Moscow: NAMI; 2016. 185 p. (in Russian).
16. Evtyukov S.A., Vasiliev Y.V. Dorozhno-transportnyye proisshestviya: Rassledovaniye. Rekonstruktsiya. Ekspertiza [Road traffic accidents: Investigation. Reconstruction. Expertise]. Saint Petersburg: DNK; 2008. 392 p. (in Russian).
17. Yuretski R., Stanczyk T. Metody testirovaniya i vremya reaktsii voditeley [Testing methods and driver reaction time]. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i nadezhnost'* [Maintenance and Reliability]. 2011;(3):84-91. (in Russian).
18. Bakhmutsky M.M., Gintsburg L.L. Zavisimost' upravlyaemosti avtopoyezda ot peredatochnogo chisla mekhanizma povorota pri-tsepa [Dependence of the controllability of a road train on the gear ratio of the trailer turning mechanism]. *Trudy NAMI. Vypusk № 129. Upravlyaemost' avtomobiley i avtopoyezdov. Rulevoy privod* [Proceedings of NAMI. Issue No. 129. Controllability of Vehicles and Road Trains. Steering Gear]. Moscow: NAMI; 1971. p. 36-42. (in Russian).

Дата поступления

в редакцию: 19.01.2026

Дата принятия

к публикации: 15.07.2026