

Автоматическая система помощи водителю автомобиля с прицепом на основе смартфона

С.П. Круглов^а, С.В. Ковыршин^б

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^аkruglov_s_p@mail.ru, ^бsergkow@mail.ru

^а<https://orcid.org/0000-0001-6783-7452>, ^б<https://orcid.org/0000-0001-5564-0951>

Статья поступила 16.11.2018, принята 18.11.2018

Предлагается вариант построения системы помощи водителю легкового автомобиля с прицепом в задачах движения задним ходом. Система основывается на смартфоне со специализированным программным обеспечением или другом мобильном устройстве и двух съемных датчиках поворота руля водителя и угла сцепки с обменом информацией по беспроводному каналу связи. Монтирование датчиков производится с момента подсоединения прицепа к автомобилю, а использование системы помощи — по мере необходимости. Система имеет два основных режима — самонастройки и рабочий режим. В первом режиме выполняется оценивание необходимых параметров с использованием алгоритма идентификации при движении автомобиля с прицепом вперед на развороте и сохранение их в памяти смартфона. Во втором режиме водителем по текущей дорожной ситуации, определяемой через зеркала заднего вида, производится выбор заданного угла сцепки путем перемещения изображения прицепа на экране смартфона. С начала движения назад смартфон формирует голосовые и графические команды водителю для их обработки поворотом рулевого колеса. Во время движения возможна корректировка заданного угла сцепки. В рабочем режиме обеспечивается устойчивое движение прицепа назад с заданным углом сцепки. Предлагаемая система отличается от подобных известных систем легкостью установки на автомобиль, дешевизной, использованием самонастройки, доступностью. Она является облегченным вариантом известных ассистентов парковки автомобиля с прицепом, устанавливаемых на современные легковые автомобили. Приводится типовой имитационный пример функционирования замкнутой системы управления «водитель – система помощи – автомобиль – прицеп».

Ключевые слова: автомобиль; прицеп; движение задним ходом; парковка; помощь водителю; мобильная система; алгоритм идентификации.

Automatic assistance system for the driver of the car with a trailer based on a smartphone

S.P. Kruglov^а, S.V. Kovyrshin^б

Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

^аkruglov_s_p@mail.ru, ^бsergkow@mail.ru

^а<https://orcid.org/0000-0001-6783-7452>, ^б<https://orcid.org/0000-0001-5564-0951>

Received 16.10.2018, accepted 18.11.2018

It is proposed to build a system of assistance to the driver of a passenger car with a trailer in the tasks of reversing. The system is based on a smartphone with specialized software or another mobile device and two removable sensors for turning the driver's steering wheel and the hitch angle and exchanging information wirelessly. The sensors are mounted from the moment the trailer is connected to the vehicle, and the use of the help system is as necessary. The system has two main modes — self-tuning and operating mode. In the first mode, the required parameters are estimated using the identification algorithm when the vehicle with the trailer is moving forward at the turn and stored in the memory of the smartphone. In the second mode, the driver in the current traffic situation, determined through the rear-view mirrors, selects the specified hitch angle by moving the trailer image on the smartphone screen. From the beginning of the movement back, the smartphone generates voice and graphic commands for the driver to test them by turning the steering wheel. While driving, it is possible to adjust the specified hitch angle. In the working mode, a stable backward movement of the trailer with a given hitch angle is provided. The proposed system differs from similar well-known systems by ease of installation on the car, cheapness, the use of self-tuning, availability. It is a lightweight version of the well-known parking assistants with a trailer installed on modern passenger cars. A typical imitational example of the functioning of the “driver – help system - vehicle - trailer” closed-loop control system is given.

Keywords: car; trailer; backup; parking; driver assistance; mobile system; identification algorithm.

Введение

Парковка задним ходом легкового автомобиля с прицепом может вызвать трудности как у начинающих

водителей, так и у опытных, особенно в случае редкого пользования прицепом. Особенностью такого движения является то, что, двигаясь назад, необходимо ком-

пенсировать небольшие отклонения прицепа от прямолинейного движения поворотами руля в обратную сторону. Неточное управление водителем может привести к складыванию системы (большое значение угла сцепки), и вывести из этого положения можно только путем дополнительного движения вперед [1].

Для того чтобы помочь при управлении транспортным средством с прицепом задним ходом, система помощи должна учитывать намерения водителя, анализировать текущее значение угла сцепки, угла рулевого колеса и генерировать подсказки по управлению автомобилем, чтобы прицеп двигался устойчиво в заданном направлении с устранением возможности складывания сцепки «автомобиль–прицеп».

Известны работы по данной теме с построением систем на основе обычных ПИ-регуляторов, нейроконтроллеров, нечеткой логики с получением оптимальных решений, например, такие, как [2–7] и др. Системы помощи водителю автомобиля с прицепом для движения обратным ходом уже активно внедряются ведущими автопроизводителями, получено множество патентов, например [8–10], которые реализуют отслеживание заданной водителем кривизны пути прицепа. Также известны реализации автоматических систем помощи водителю автомобиля с прицепом при движении назад, в частности, для автомобилей Ford и Volkswagen Passat [11; 12].

Основным недостатком существующих систем является то, что они монтируются на заводе-изготовителе автомобиля или в специализированном центре технического обслуживания с внедрением в штатные системы управления и настроены только для одного автомобиля. Стоят они недешево, поэтому нет возможности установки подобной недорогой мобильной системы помощи на автомобиль. Также нет возможности переустановки системы с одного автомобиля на другой. Для используемых систем помощи обязательным является наличие штатной видеосистемы и другого специального оборудования и др.

Кроме того, многие известные системы помощи водителю требуют настройки параметров системы управления с предварительным их определением с использованием специального оборудования. Имеются решения по автоматическому определению одного из параметров — длины прицепа — с помощью ультразвуковых парковочных датчиков, с использованием радиопередающих устройств, с тестовым движением системы на установленном развороте, например [13–16] и др. Однако они определяют не все параметры, необходимые для синтеза закона управления.

Задачей данной работы является создание такой системы помощи управления автомобилем с прицепом при маневрировании задним ходом, которая не требует вмешательства в штатные системы автомобиля, будет недорогой, простой в установке, мобильной для переустановки на другой автомобиль и иметь малые эксплуатационные затраты на настройку системы.

Поставленная задача может быть решена путем ее реализации на основе мобильного вычислительного устройства типа смартфона или планшета со специализированным программным обеспечением, а также легких датчиков угла отклонения рулевого колеса

(руля) водителя и угла сцепки прицепа с автомобилем с беспроводным каналом передачи информации. Задачей мобильного устройства является реализация двух основных режимов: самонастройки и рабочего режима. В режиме самонастройки по данным датчиков при тестовом движении вперед на основе алгоритма идентификации происходит определение параметров, необходимых для синтеза закона управления, и их запоминание. В рабочем режиме водитель задает требуемый угол сцепки, а далее на основе данных с датчиков происходит формирование команд водителю (голосовых и/или графических) на необходимое отклонение руля. Водитель обрабатывает эти сигналы. Ниже раскрываются особенности построения такой системы.

Математическая модель системы «автомобиль–прицеп» на рис. 1 представлена кинематическая схема объекта управления «автомобиль–прицеп».

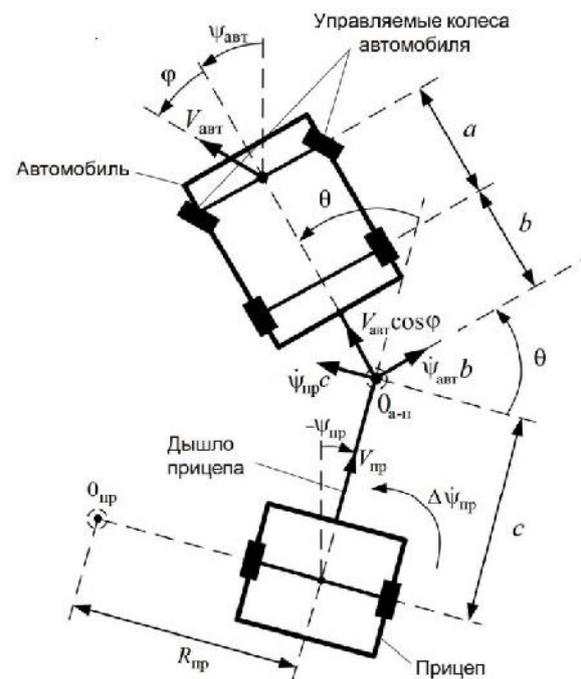


Рис.1. Кинематическая схема объекта управления «автомобиль–прицеп»

На рис. 1 и в дальнейших рассуждениях приняты следующие обозначения:

Φ — средний угол отклонения управляемых колес автомобиля (как показано на рисунке) с типичным ограничением в виде: $|\Phi| \leq \Phi_{\max} \leq 30^\circ$. Значение Φ_{\max} определится далее из условия устойчивости движения вперед. Примем, что отклонение руля водителя и отклонение управляемых колес автомобиля связано соотношением (при отсутствии люфта рулевого колеса):

$$\Phi = k_{\text{рул}} \Phi_{\text{рул}}, \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{рул}}$ — угол отклонения рулевого колеса водителя; $k_{\text{рул}}$ — передаточное число рулевого управления, обычно $0 < k_{\text{рул}} \ll 1$. Заметим, что отклонение руля водителя тоже ограничено: $\Phi_{\text{рул}} \leq \Phi_{\text{рул}_{\max}} = k_{\text{рул}}^{-1} \Phi_{\max}$;

θ — угол сцепки, или угол отклонения продольной оси прицепа от продольной оси автомобиля. Примем, что $|\theta| \leq \theta_{\max} < 90^\circ$, где θ_{\max} — максимально возможное значение модуля угла сцепки, реализуемое системой управления. Значение модуля угла сцепки, при превышении которого во время движения назад начинается непроизвольное его увеличение с невозможностью компенсации из-за ограниченности φ , называется углом складывания ($\theta_{\text{скл}}$);

$\Psi_{\text{авт}}, \Psi_{\text{пр}}$ — угол поворота автомобиля и прицепа соответственно от какого-то направления, например, заданного (на рис. 1 обозначено вертикальной линией);

$V_{\text{авт}}, V_{\text{пр}}$ — соответственно скорость автомобиля и прицепа. Скорость автомобиля будем измерять по управляемым колесам в соответствии с углом φ с точкой приложения в центре оси вращения управляемых колес;

$O_{\text{пр}}$ — центр вращения прицепа на повороте;

$O_{\text{а-п}}$ — точка вращения прицепа относительно автомобиля, точка сцепки;

$R_{\text{пр}}$ — радиус вращения прицепа, измеряемый вдоль оси вращения колес прицепа (эффективной оси для многоосного прицепа);

a, b, c — кинематические параметры объекта управления «автомобиль– прицеп» (a, c — положительные ненулевые числа), соответственно колесная база автомобиля, или расстояние между осями вращения колес автомобиля; смещение сцепки, или расстояние от оси заднего моста автомобиля до точки сцепки; длина прицепа, или расстояние от точки сцепки до оси вращения колес прицепа (эффективной оси). Отметим, что обычно $a > |b|, c > |b|$. Примем также, что если $b < 0$, то $c \gg |b|$. Дополнительное требование к параметру c определится ниже;

$\Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}}$ — угловая скорость прицепа, появляющаяся из-за внешних неконтролируемых возмущений, например, наличие существенных неровностей дороги, переменная плотность почвы, возникающая на пашне, на заснеженной поверхности, на песке и др. Будем считать эту величину ограниченной.

Для составления математического описания объекта управления «автомобиль– прицеп» приняты следующие допущения:

- автомобиль движется с относительно низкой скоростью;
- не будут учитываться боковой увод и боковой юз автомобиля;
- не учитывается динамика движения, в частности, получаемые соотношения не зависят от ускорений.

Известно, что угловая скорость автомобиля определяется зависимостью [2]:

$$\dot{\Psi}_{\text{авт}} = \frac{V_{\text{авт}}}{a} \sin\varphi. \quad (2)$$

По схеме на рис. 1 можно определить, что:

$$\Psi_{\text{пр}} = \Psi_{\text{авт}} - \theta. \quad (3)$$

На точку сцепки при движении автомобиля действуют два вектора линейной скорости: вектор поступательного движения автомобиля ($V_{\text{авт}} \cos\varphi$), соответствующий продольной скорости автомобиля, и вектор ($\dot{\Psi}_{\text{авт}} b$), соответствующий вращательному движению автомобиля. Исходя из этих векторов, определим линейную и угловую скорость прицепа. Через проекции указанных векторов на продольную ось прицепа найдем скорость прицепа:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{авт}} \cos\varphi \cos\theta + \dot{\Psi}_{\text{авт}} b \cdot \sin\theta.$$

Подставляя сюда выражение для $\dot{\Psi}_{\text{авт}}$ по зависимости (2), найдем:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{авт}} \left(\cos\varphi \cos\theta + \frac{b}{a} \sin\varphi \sin\theta \right). \quad (4)$$

Угловая скорость прицепа определяется вектором линейной скорости ($\dot{\Psi}_{\text{пр}} c$), перпендикулярным продольной оси прицепа (см. рис. 1). Из кинематической схемы ясно, что при $\Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}} \equiv 0$:

$$\dot{\Psi}_{\text{пр}} c = V_{\text{авт}} \cos\varphi \sin\theta - \dot{\Psi}_{\text{авт}} b \cdot \cos\theta.$$

Также, делая подстановку по (2) и учитывая ненулевое в общем случае возмущающее воздействие, найдем:

$$\dot{\Psi}_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{авт}}}{c} \left(\cos\varphi \sin\theta - \frac{b}{a} \sin\varphi \cos\theta \right) + \Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Поскольку из (3) следует, что $\dot{\theta} = \dot{\Psi}_{\text{авт}} - \dot{\Psi}_{\text{пр}}$, по зависимостям (2) и (5) несложно определить скорость изменения угла θ :

$$\dot{\theta} = \frac{V_{\text{авт}}}{ac} (c \sin\varphi - a \cos\varphi \sin\theta + b \sin\varphi \cos\theta) - \Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}}. \quad (6)$$

Используя известную формулу сложения тригонометрических функций:

$\alpha \sin\gamma + \beta \cos\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin(\gamma + \arctg(\beta/\alpha))$ и комбинируя синусы и косинусы по φ , можно представить (6) в виде:

$$\dot{\theta} = -\text{sign}(V_{\text{авт}}) k(\theta) \cdot \sin(\varphi_{\text{бал}}(\theta) - \varphi) - \Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}}, \quad (7)$$

где $k(\theta) \triangleq (ac)^{-1} |V_{\text{авт}}| \sqrt{(c + b \cos\theta)^2 + (a \sin\theta)^2}$ — положительный коэффициент усиления (утверждение о положительности легко установить из принятых условий);

$$\varphi_{\text{бал}}(\theta) \triangleq \arctg(a \sin\theta / (c + b \cos\theta)) \approx \lambda_0 \sin\theta \quad (8)$$

— балансирующая зависимость угла управляемых колес автомобиля по углу θ ; или значение φ такое, что если

его зафиксировать, то при $\Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}} \equiv 0$ текущее значение угла сцепки будет находиться в балансирующем положении: $\theta \triangleq \theta_{\text{бал}} \equiv \text{const}$, или объект «автомобиль–прицеп» будет находиться в установившемся развороте, причем как при движении вперед, так и назад;

$\lambda_0 \triangleq \lambda(\theta = 0) = a/(b+c)$ —параметр линеаризации функции $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$ около точки $\theta = 0$;

$$\lambda(\theta) \triangleq \frac{d\varphi_{\text{бал}}(\theta)}{d\theta} = \frac{a(b+c\cos\theta)}{(a\sin\theta)^2 + (b\cos\theta + c)^2}$$

производная функции $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$ по своему аргументу. Заметим, что в принятых условиях $\lambda(\theta) > 0$, т.е. функция $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$ является возрастающей.

Используя подход по выводу уравнения (7), можно найти зависимость, обратную к $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$:

$$\theta_{\text{бал}} = \arcsin \frac{c \operatorname{tg}\varphi}{\sqrt{a^2 + (b \operatorname{tg}\varphi)^2}} + \operatorname{arctg} \frac{b \operatorname{tg}\varphi}{a} \approx \arcsin \frac{\varphi}{\lambda_0}. \quad (9)$$

Изучим динамику изменения угла θ в соответствии с равенством (7) при движении объекта «автомобиль–прицеп» вперед ($V_{\text{авт}} > 0$) и отсутствии внешнего возмущения ($\Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}} \equiv 0$). Для этого вначале рассмотрим случай, когда значение угла управляемых колес автомобиля удовлетворяет условиям: $\varphi \equiv \text{const} < \varphi_{\text{бал}}(\theta)$.

Из зависимости (7) следует, что это порождает $\dot{\theta} < 0$, т.е. уменьшение угла θ . Поскольку функция $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$ возрастающая, при этом будет уменьшаться и сама эта функция. Это будет продолжаться до тех пор, пока не наступит равенство $\varphi_{\text{бал}}(\theta_{\text{бал}}) = \varphi$.

Если теперь при тех же условиях принять $\varphi \equiv \text{const} > \varphi_{\text{бал}}(\theta)$, то из (7) следует $\dot{\theta} > 0$, т.е. увеличение угла θ . Но это увеличение должно быть ограничено величиной $|\theta_{\text{бал}}| \leq \theta_{\text{max}} < 90^\circ$, иначе функция $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$ станет убывающей, и возникнет неустойчивость.

Следовательно, для устойчивости движения вперед требуется выполнение условия $|\theta_{\text{бал}}| \leq \theta_{\text{max}} < 90^\circ$. Отсюда, на основании значения функции $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$ по (8) и возрастающего характера этой функции в указанных пределах, можно сформулировать требование:

$$\varphi_{\text{max}} = \operatorname{arctg} \frac{a \sin\theta_{\text{max}}}{c + b\cos\theta_{\text{max}}} \approx \lambda_0 \sin\theta_{\text{max}}. \quad (10)$$

Это требование можно интерпретировать как ограничение размаха управляющих отклонений управляемых колес (φ_{max}) при заданных кинематических параметрах либо при заданном параметре φ_{max} ограничить параметр c —длину прицепа. Так, если в пределе счи-

тать $\theta_{\text{max}} = 90^\circ$, то по первому случаю: $\varphi_{\text{max}} = \operatorname{arctg}(a/c)$, а по второму: $c < a/\operatorname{tg}\varphi_{\text{max}}$.

Далее будем считать, что φ_{max} задан и представляет собой конструктивное ограничение отклонений управляемых колес, а параметр c удовлетворяет требованию (10), например, для $\varphi_{\text{max}} = 30^\circ$ справедливо $c < 1.73a$. Тогда можно считать, что при движении вперед и отсутствии внешнего возмущения движение по углу сцепки всегда устойчиво. Также следует отметить, что при этом $\theta_{\text{max}} = \theta_{\text{скл}}$, где последний определяется по (9):

$$\theta_{\text{скл}} = \theta_{\text{max}} = \arcsin \frac{c \operatorname{tg}\varphi_{\text{max}}}{\sqrt{a^2 + (b \operatorname{tg}\varphi_{\text{max}})^2}} + \operatorname{arctg} \frac{b \operatorname{tg}\varphi_{\text{max}}}{a} \approx \arcsin \frac{\varphi_{\text{max}}}{\lambda_0}. \quad (11)$$

Если же автомобиль движется назад ($V_{\text{авт}} < 0$) с теми же условиями—из подобных рассуждений следует, что система точно неустойчива, чем объясняются все проблемы управления таким движением. При этом уравнение (7) будет иметь вид:

$$\dot{\theta} = k(\theta) \cdot \sin(\varphi_{\text{бал}}(\theta) - \varphi) - \Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}}. \quad (12)$$

Из полученных соотношений (4) и (5) можно найти кривизну пути прицепа (κ) при отсутствии внешнего возмущения:

$$\kappa = R_{\text{пр}}^{-1} = \frac{\dot{\Psi}_{\text{пр}}}{V_{\text{пр}}} = \frac{a\sin\theta - b\cos\theta \operatorname{tg}\varphi}{c(a\cos\theta + b\sin\theta \operatorname{tg}\varphi)}. \quad (13)$$

Найдем также кривизну пути прицепа на установившемся движении (повороте) с заданным значением $\varphi \equiv \text{const} \neq 0$ в отсутствие внешнего возмущения. Из выше изложенного следует, что этому движению соответствует $\theta = \theta_{\text{бал}} = \text{const}$ по (9). Значение кривизны пути прицепа для этого случая также назовем балансирующим значением ($\kappa_{\text{бал}}$). Из (8) и (13) непосредственной подстановкой несложно найти:

$$\kappa_{\text{бал}} = \frac{\sin\theta_{\text{бал}}}{b + c \cos\theta_{\text{бал}}} \approx \eta\theta_{\text{бал}}, \quad (14)$$

где $\eta \triangleq 1/(b+c)$ —коэффициент пропорциональности. Приблизительная зависимость равенства получена линеаризацией около $\theta_{\text{бал}} = 0$.

Уравнения (1)–(14) с принятыми допущениями описывают кинематические и связанные с ними динамические соотношения объекта управления «автомобиль–прицеп», необходимые для синтеза закона управления при движении задним ходом. Приблизительные равенства в соотношениях по (8), (9), (11) в силу их определения точно описывают соответствующие им зависимости в области нулевого значения углов. При увеличении модуля углов погрешность увеличивается, но, как показывают расчеты для типовых практических

задач с ограничением $\varphi_{\max} = 30^\circ$, погрешность не превышает 10–15%.

Из выражения (14) можно видеть, что если сигнал $\theta_{\text{бал}}$ принять за заданное значение угла сцепки и отслеживать его, то это будет приблизительно соответствовать управлению по кривизне с коэффициентом η , равным обратной величине от расстояния между задним мостом автомобиля и осью колес прицепа. Следовательно, использование управления по углу сцепки вместо кривизны пути прицепа, в отличие от [8–10], можно интерпретировать как вариант автоматизации маневрирования назад. В плане реализации требуемой кривизны пути прицепа водителю несложно соотнести ее значение с задаваемым углом сцепки, исходя из опыта угловых движений объекта «автомобиль–прицеп» при движении вперед и длины объекта. Приблизительность соотношения (14) не критична, так как автомобилист управляет маневрированием на глаз, оперируя понятиями «больше-меньше».

Этот подход и используется в настоящей работе.

Закон управления. Рассмотрим варианты закона управления. Вначале будем считать, что параметры объекта управления известны, а заданное значение угла сцепки (обозначим его как $\theta_{\text{зад}}$) будет формироваться водителем. Для устранения возможности складывания системы этот сигнал ограничивается на основании (11) очевидным неравенством:

$$|\theta_{\text{зад}}| \leq \arcsin \frac{\varphi_{\max}}{\lambda_0} - \Delta_\theta \leq \theta_{\text{скл}}, \quad (15)$$

где Δ_θ — небольшое задаваемое положительное число, удовлетворяющее этому неравенству, для гарантии не превышения $\theta_{\text{скл}}$.

Предложим закон управления:

$$\varphi_{\text{рул}} = k_{\text{рул}}^{-1} (k_{\text{зу}} \lambda_0 (\sin\theta - \sin\theta_{\text{зад}}) + \varphi_{\text{бал}}(\theta)), \quad (16)$$

где $k_{\text{зу}}$ — назначаемый положительный коэффициент закона управления, который влияет на скорость переходного процесса и снижение влияния внешнего возмущения; предполагаем, что этот параметр находится внутри ограничения:

$$1 \leq k_{\text{зу}} < \pi / (2\lambda_0 |\sin\theta - \sin\theta_{\text{зад}}|). \quad (17)$$

Это требование вытекает из последующих рассуждений.

Действительно, если закон управления (16) подставить в уравнение (12), получим описание динамики угла сцепки в замкнутой системе управления при движении назад:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= -k(\theta) \cdot \sin(k_{\text{зу}} \lambda_0 (\sin\theta - \sin\theta_{\text{зад}})) - \Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}} \approx \\ &\approx -k(\theta) \cdot \sin[k_{\text{зу}} (\varphi_{\text{бал}}(\theta) - \varphi_{\text{бал}}(\theta_{\text{зад}}))] - \Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}}, \end{aligned} \quad (18)$$

где приблизительное равенство приведено по приближению в (8). Очевидным требованием устойчивости и пропорциональности управления в отсутствие возмущения здесь является то, чтобы модуль аргумента си-

нуса не превышал величину $\pi/2$. Отсюда следует верхнее ограничение (17).

Рассмотрим точное соотношение (18) при отсутствии внешнего возмущения ($\Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}} \equiv 0$) при $\theta_{\text{зад}} = \text{const}$. Из него несложно найти, что со временем $\theta \rightarrow \theta_{\text{зад}}$. Это, в свою очередь, приводит по (1) и (16) к $\varphi \rightarrow \varphi_{\text{бал}}(\theta_{\text{зад}}) = \text{const}$. Налицо устойчивое поведение объекта управления, в частности, устойчивый поворот. Причем, сравнивая приблизительную часть (18) с уравнением динамики при движении вперед (7), можно видеть, что при $k_{\text{зу}} = 1$ динамика движения объекта «автомобиль–прицеп» при движении назад приблизительно такая же, что и при движении вперед с $\varphi = \varphi_{\text{бал}}(\theta_{\text{зад}}) = \text{const}$. Если $k_{\text{зу}}$ увеличить, то увеличится и скорость переходного процесса.

Таким образом, закон управления (16) при движении объекта «автомобиль–прицеп» назад при указанных условиях обеспечивает устойчивое поведение системы, а при $k_{\text{зу}} = 1$ — такой же характер движения, как при положительной скорости.

Если на прицеп действует внешнее возмущение $\Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}} \neq 0$, то на установившемся режиме (когда $\dot{\theta} \equiv 0$) при линейных приближениях установившееся значение угла сцепки ($\theta_{\text{уст}}$) выражается по (18) как:

$$\sin\theta_{\text{уст}} \approx \sin\theta_{\text{зад}} + \frac{\arcsin(\Delta\dot{\Psi}_{\text{пр}}/k(\theta))}{\lambda_0 k_{\text{зу}}} \neq \sin\theta_{\text{зад}}. \quad (19)$$

Поскольку $\theta_{\text{уст}} \neq \theta_{\text{зад}}$, то и остальные параметры движения не будут соответствовать ожидаемым. Но из равенства (19) можно видеть, что выбором $k_{\text{зу}}$ можно ослабить влияние внешнего возмущения.

В силу управления маневрированием назад по ощущениям водителя, на глаз, закон управления может быть упрощен: вместо (16), с учетом (8), можно записать:

$$\varphi_{\text{рул}} = k_\varphi [k_{\text{зу}} (\sin\theta - \sin\theta_{\text{зад}}) + \sin\theta], \quad (20)$$

где $k_\varphi \triangleq k_{\text{рул}}^{-1} \lambda_0$ — коэффициент пропорциональности.

Он отличается от закона (16) только приблизительным заданием функции $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$. Рассмотрим, что он дает. Перепишем (20) как:

$$\varphi_{\text{рул}} = k_{\text{рул}}^{-1} [k_{\text{зу}} \lambda_0 (\sin\theta - \sin\tilde{\theta}_{\text{зад}}) + \varphi_{\text{бал}}(\theta)],$$

где $\sin\tilde{\theta}_{\text{зад}} \triangleq \sin\theta_{\text{зад}} + \frac{\varphi_{\text{бал}}(\theta) - \lambda_0 \sin\theta}{k_{\text{зу}} \lambda_0}$ — новое заданное

значение угла сцепки, смещенное на малую величину из-за неточности назначения $\varphi_{\text{бал}}(\theta)$.

Здесь по аналогичным рассуждениям следует, что $\theta \rightarrow \tilde{\theta}_{\text{зад}} = \text{const} \neq \theta_{\text{зад}}$, но при увеличении параметра $k_{\text{зу}}$ указанная неточность уменьшается. Устойчивость по углу сцепки сохраняется.

Режим самонастройки. Для реализации закона управления (20) необходима информация о параметре k_φ . Для его прямого определения водителю необходимо выполнить немало измерений текущих параметров и осуществить их ввод в систему. Для упрощения предлагается организовать режим автоопределения этого параметра, или самонастройку системы.

Предлагается организовать самонастройку во время тестового движения вперед по дуге при отсутствии внешних возмущений с использованием алгоритма параметрической идентификации. Для реализации этого алгоритма будем использовать уравнение динамики угла сцепки (6) на малых углах φ, θ (например, не более 10–15 градусов, причем программа мобильного устройства сама будет отбирать эти данные) и при $\Delta\dot{\Psi}_{пр} \equiv 0$. Тогда с учетом (1) и (8) это равенство может быть записано в виде:

$$\varphi_{рул} \approx \mathbf{p}^T \mathbf{y}, \quad (21)$$

где $\mathbf{p}^T \triangleq [k_\varphi, (ck_\varphi/V_{авт})]$ —вектор неизвестных параметров, $\mathbf{y}^T \triangleq [\theta, \dot{\theta}]$ —вектор регрессоров (в терминах регрессионного анализа). Верхний индекс «т» обозначает операцию транспонирования, сигнал $\dot{\theta}$ определяется численным дифференцированием θ .

В качестве алгоритма идентификации можно использовать классический метод наименьших квадратов, как наиболее эффективный [17]:

$$\hat{\mathbf{p}}^T_N = \left(\sum_{i=0}^N \varphi_{рул,i} \mathbf{y}_i^T \right) \left(\sum_{i=0}^N \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^T \right)^{-1}, \quad (22)$$

где «крышка» над символом означает его оценку; $i = 1, 2, 3, \dots, N$ —номера дискретных измерений и соответствующих им вычислений с конечным номером N , который, как вариант, может определяться автоматически путем алгоритмического анализа со стороны вычислителя факта достижения невырожденности и достаточной степени обусловленности матрицы, которую нужно обращать; временная дискретность измерения переменных достаточно малая в сравнении с переходным процессом в системе. Первый элемент вектора и есть искомая оценка.

Если на данном движении дополнительно алгоритмически организовать отбор данных для случая $\dot{\theta} \equiv 0$, то вместо (22) можно записать (в осредненном смысле):

$$\hat{k}_\varphi \approx \varphi_{рул} / \theta. \quad (23)$$

Исходя из полученной оценки \hat{k}_φ , несложно определить ограничение в задании требуемого угла сцепки с точки зрения недопущения складывания. На основании (1), (11): $\hat{\theta}_{скл} = \varphi_{рул,макс} / \hat{k}_\varphi$, и равенство (15) переписывается:

$$|\theta_{зад}| \leq \arcsin \frac{\varphi_{рул,макс}}{\hat{k}_\varphi} - \Delta\theta \leq \theta_{скл}. \quad (24)$$

Модельные исследования. Примем следующие параметры объекта управления: $a = 2.8\text{м}$, $b = 0.7\text{м}$, $c = 2.3\text{м}$, $\varphi_{макс} = 30^\circ$, $k_{рул} = 0.055$.

Также будем полагать, что водитель совместно с системой выработки управляющих сигналов описывается аperiodическим звеном с единичным коэффициентом усиления, постоянной времени 0.2с и звеном постоянного запаздывания 0.2с. Датчики отклонения руля водителя и угла сцепки имеют погрешность в виде белого центрированного шума со среднеквадратическим отклонением 0.3° .

Исследования показывают, что оценка \hat{k}_φ определяется по предложенному способу (22) или (23) с погрешностью не хуже 10%. Это соответствует основной ошибке из-за люфта рулевого колеса водителя величиной не более 15° . На рис.2 представлен процесс управления по закону (20) с оценкой \hat{k}_φ (погрешность 10%) при воздействии внешнего возмущения. Моделирование проводилось в среде Matlab.

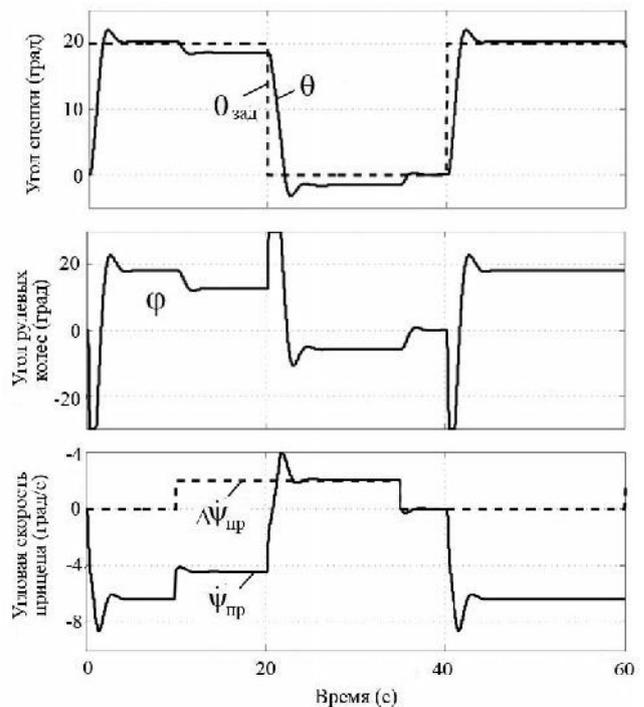


Рис. 2. Управление с использованием мобильной системы помощи

Исследования подтверждают сделанные выше выводы и демонстрируют выполнение целевых свойств системы управления с точностью отслеживания заданного угла сцепки не более 1.5° даже при действии существенного неконтролируемого возмущения. Из-за люфта рулевого колеса с указанной величиной эта ошибка может увеличиться на значение не более градуса.

Кроме представленных результатов было проведено исследование свойств мобильной системы помощи на робототехническом макете, что подтверждает достижение всех указанных выше функциональных свойств

системы. В настоящее время ведется работа по созданию предлагаемой системы на реальном автомобиле.

Особенности реализации системы управления. На рис.3 представлена структура устройства помощи водителю.

Датчик угла отклонения рулевого колеса (руля) водителя и датчик угла сцепки прицепа с автомобилем фиксируются водителем перед началом маневрирования назад с прицепом на рулевое колесо и фаркоп соответственно с помощью систем быстрого крепления (магниты, зацепы, липкая лента и др.) и включаются. Датчики передают сигналы измерения по беспроводному каналу в мобильное устройство.

Датчики могут быть построены различными способами. Основными критериями являются автономность, беспроводной канал связи с мобильным устройством, компактность, легкосъемность, низкая стоимость.



Рис. 3. Мобильная система помощи водителю автомобиля с прицепом при маневрировании задним ходом

Вариантом исполнения датчика угла поворота рулевого колеса может быть реализация на основе микромеханического датчика MPU6050 [18], который представляет собой трехосевой датчик угловой скорости (гироскоп) и трехосевой акселерометр. Поскольку ось вращения рулевого колеса современных автомобилей отклонена от вертикальной оси, можно с использованием комплементарного фильтра на основе показаний об угловой скорости и ускорениях построить автономный, достаточно точный датчик угла поворота рулевого колеса. Кроме того, датчик имеет микроконтроллер для обработки данных, беспроводной канал передачи данных и элементы питания.

Вариантом исполнения датчика угла сцепки может быть автономный датчик с микроконтроллером, беспроводным каналом передачи данных и элементами питания, в котором в качестве чувствительного элемента используются оптический энкодер, поворотный потенциометр и др. На этот чувствительный элемент через рычаги или гибкую связку передается угол отклонения продольных осей автомобиля и прицепа — угол сцепки (рис.3).

Мобильное устройство устанавливается на удобное для наблюдения водителем место (приборная панель, держатель и др.), и инициализируется его специализированное программное обеспечение. Вначале, если есть такая информация, в мобильное устройство вводятся или корректируются параметры системы управления: a, b, c . Если нет — используется режим автонастройки системы на тестовом движении вперед с малыми углами φ, θ по зависимостям (21)–(24). Далее, также с помощью мобильного устройства, вводятся значение $\varphi_{рул\max}$, коэффициент k_{3y} и заданное значение угла сцепки ($\theta_{зад}$).

Мобильное устройство ограничивает сигналы $\theta_{зад}$ и k_{3y} по зависимостям (11), (15), (17), (24) и формирует требуемый угол отклонения рулевого колеса водителя по зависимости (20). Кроме того, сравнивая текущий угол рулевого колеса водителя с требуемым значением, мобильное устройство выдает команды (голосовые и/или в виде динамического изображения) на корректировку этого угла. Скоростью движения транспортного средства водитель управляет самостоятельно. Также во время маневрирования возможна корректировка угла $\theta_{зад}$.

Следует отметить, что, в сравнении с (17), требуется дополнительное ограничение величины k_{3y} . Это связано с возможностью появления колебательной неустойчивости замкнутой системы управления, включающей водителя с индивидуальными характеристиками по реагированию на управляющие сигналы. Поэтому при появлении колебаний в системе водитель должен снизить указанный коэффициент.

На рис.4 представлен вариант человеко-машинного интерфейса, реализованного посредством мобильного устройства в виде программы «Ассистент».

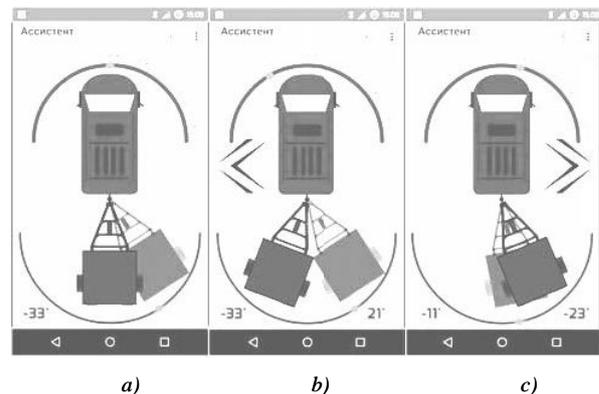


Рис. 4. Человеко-машинный интерфейс программы «Ассистент»

Интерфейс реализован посредством нескольких страниц для настройки и инициализации всей системы, задания кинематических параметров, коэффициента k_{3y} , режима автонастройки, задание требуемого угла сцепки и управления автомобилем по командам от мобильного устройства (на рис.4 представлены некоторые из них). Страница *a*) демонстрирует процедуру ввода заданного угла сцепки путем перемещения на интерак-

тивном мониторе изображения прицепа. На страницах *b*) и *c*) показаны процедуры выдачи команд водителю на корректировку положения рулевого колеса и текущее положение прицепа относительно заданного.

Заключение

В целом можно отметить, что предложенный вариант мобильной системы помощи водителю легкового автомобиля с прицепом при маневрировании задним ходом является достаточно эффективным. Основным положительным свойством системы для водителя является организация устойчивого управляемого движения назад с прицепом с контролем за заданным углом сцепки. Последний задается водителем, исходя из текущей обстановки. Предлагаемая система обладает такими свойствами, как дешевизна оборудования (мобильное устройство имеется практически у любого современного человека), легкость установки и использования.

Литература

1. Зыков Д. За рулем автомобиля с прицепом // Наука и жизнь. 2002. № 5. С.10-13.
2. Werling M., Reinish P., Heidingsfeld M., Gresser K. Reversing the general one-trailer system: asymptotic curvature stabilization and path tracking, // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. 2014. Vol. 15, № 2 P. 627-636.
3. Hafner M., Pilutti T. Control for Automated Trailer Backup // SAE Technical Paper 2017-01-0040.
4. Lavoie E.M., Trombley R.A., Nave C., Shutko J., Rupp M.Y., Maye K.M. Patent US 9248858 B2, 2016. Trailer backup assist system.
5. Kong S.G., Kosko B. Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer, IEEE Transactions on neural networks. 1992. Vol. 3, № 2. P. 211-223.
6. Cheng J., Zhang Y., Wan Z. Curve path tracking control for tractor-trailer mobile robot, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) Eighth International Conference. 2011. Vol. 1. P. 502-506.
7. Bin Y., Shim T., Feng N., Zhou D. Path tracking control for backing-up tractor-trailer system via model predictive control // Control and Decision Conference (CCDC) 2012 24th Chinese. 2012. Vol.1, № P. 198-203.
8. Trombley R.A., Pilutti T.E., Lavoie E.M., Nave C., Shutko J., Lanoue R., Hochrein B.G., Rolfes N., Patent US 9037349 B2, 2015. Trailer identification system for trailer backup assist.
9. Lavoie E.M., Rhode D.S. Patent US 9592851 B2, 2017. Control modes for a trailer backup assist system.
10. Hafner T.E. Pilutti, Patent US 9783230 B2, 2017. Trailer backup assist system with off-shoot correction.
11. Данилина В. Ford поможет владельцам прицепов парковаться правильно [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zr.ru/content/news/785974-ford-pomozhet-vladelcam-pricepov-parkovatsya-pravilno/> (дата обращения 25.10.2018).
12. Система маневрирования с прицепом [Электронный ресурс]. URL: <http://systemsauto.ru/active/Trailer-Assist.html> (дата обращения 25.10.2018).
13. Josef V. Trailer parking assistant. Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics – Mechatronika. 2014. P. 677-682.
14. Lavoie E.M., Kyrtos C. Patent US 9335163 B2, 2016. Trailer length estimation in hitch angle applications.

15. Lavoie E.M., Kyrtos C. Patent US 9623904 B2, 2017. Trailer curvature control with adaptive trailer length estimation.
16. Xu L., Tseng E.H., Pilutti T.E., Schondorf S.Y., Hrovat D.D., Joyce J.P. Patent US 9340228 B2, 2016. Trailer motion and parameter estimation system.
17. Ljung L. System Identification: Theory for the User. Second Edition. Prentice Hall PRT. Upper Saddle River, TO 07458.
18. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense. 2013. 54 p. [Электронный ресурс]. URL: www.invensense.com (дата обращения 25.10.2018).

References

1. Zykov D. Driving a car with trailer// Nauka i zhizn'. 2002. № 5. P.10-13.
2. Werling M., Reinish P., Heidingsfeld M., Gresser K. Reversing the general one-trailer system: asymptotic curvature stabilization and path tracking // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. 2014. Vol. 15, № 2. P. 627-636.
3. Hafner M., Pilutti T. Control for Automated Trailer Backup // SAE Technical Paper 2017-01-0040.
4. Lavoie E.M., Trombley R.A., Nave C., Shutko J., Rupp M.Y., Maye K.M. Patent US 9248858 B2, 2016. Trailer backup assist system.
5. Kong S.G., Kosko B. Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer, IEEE Transactions on neural networks. 1992. Vol. 3, № 2. P. 211-223.
6. Cheng J., Zhang Y., Wan Z. Curve path tracking control for tractor-trailer mobile robot, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) Eighth International Conference. 2011. Vol. 1. P. 502-506.
7. Bin Y., Shim T., Feng N., Zhou D. Path tracking control for backing-up tractor-trailer system via model predictive control // Control and Decision Conference (CCDC) 2012 24th Chinese. 2012. Vol.1, № P. 198-203.
8. Trombley R.A., Pilutti T.E., Lavoie E.M., Nave C., Shutko J., Lanoue R., Hochrein B.G., Rolfes N., Patent US 9037349 B2, 2015. Trailer identification system for trailer backup assist.
9. Lavoie E.M., Rhode D.S. Patent US 9592851 B2, 2017. Control modes for a trailer backup assist system.
10. Hafner T.E. Pilutti, Patent US 9783230 B2, 2017. Trailer backup assist system with off-shoot correction.
11. Danilina V. Ford will help owners of trailers to Park correctly [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.zr.ru/content/news/785974-ford-pomozhet-vladelcam-pricepov-parkovatsya-pravilno/> (data obrashcheniya 25.10.2018).
12. Trailer manoeuvring system [Elektronnyj resurs]. URL: <http://systemsauto.ru/active/Trailer-Assist.html> (data obrashcheniya 25.10.2018).
13. Josef V. Trailer parking assistant. Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika. 2014. P. 677-682.
14. Lavoie E.M., Kyrtos C. Patent US 9335163 B2, 2016. Trailer length estimation in hitch angle applications.
15. Lavoie E.M., Kyrtos C. Patent US 9623904 B2, 2017. Trailer curvature control with adaptive trailer length estimation.
16. Xu L., Tseng E.H., Pilutti T.E., Schondorf S.Y., Hrovat D.D., Joyce J.P. Patent US 9340228 B2, 2016. Trailer motion and parameter estimation system.
17. Ljung L. System Identification: Theory for the User. Second Edition. Prentice Hall PRT. Upper Saddle River, TO 07458.
18. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense. 2013. 54 p. [Elektronnyj resurs]. URL: www.invensense.com (data obrashcheniya 25.10.2018).