

Научная статья

УДК 681.518.3.621.371

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-43-48>

Применение сверхвысокочастотных доплеровских датчиков перемещения в антиблокировочной тормозной системе

Дмитрий Владиленович Хаблов

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, dkhablov@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4807-1281>

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимизации работы антиблокировочной системы транспортного средства. Для повышения надёжности работы системы предложено использовать адаптивную к качеству поверхности дорожного покрытия систему распределения тормозного воздействия для быстрой остановки транспортного средства с сохранением управляемости. В состав системы наряду с датчиками угловой скорости вращения колес включён сверхвысокочастотный доплеровский датчик перемещения и скорости. Применение указанного доплеровского датчика позволило путём отслеживания соотношения между угловой и линейной скоростями перемещения достичь более точного совпадения зависимости тормозного усилия от степени сцепления колес с дорожным покрытием. Таким способом удалось минимизировать тормозной путь транспортного средства с сохранением управляемости при различных условиях движения.

Ключевые слова: антиблокировочная система, эффект Доплера, антенна, диаграмма направленности, угловая скорость вращения, путевая скорость

Для цитирования: Хаблов Д. В. Применение сверхвысокочастотных доплеровских датчиков перемещения в антиблокировочной тормозной системе // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 43–48. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-43-48>

Application of microwave Doppler displacement sensors in anti-lock braking system

Dmitry V. Khablov

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
dkhablov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4807-1281>

Abstract. The issues of optimization of the vehicle anti-lock braking system are considered. To increase the reliability of the system, it is proposed to use a brake distribution system adaptive to the quality of the road surface for a quick stop of the vehicle while maintaining controllability. The system together with sensors angular wheel speed included a microwave Doppler displacement and speed sensor. The use of the specified Doppler sensor made it possible to achieve a more accurate coincidence of the dependence of the braking force on the degree of adhesion of the wheels to the road surface by monitoring the ratio between the angular and linear speeds of movement. In this way, it was possible to minimize the braking distance of the vehicle while maintaining controllability under various driving conditions.

Keywords: anti-lock braking system, Doppler effect, antenna, directional pattern, angular rotation speed, ground speed

Введение. Антиблокировочная система (АБС) предназначена для регулирования степени тормозного усилия при уменьшении скорости транспортного средства (ТС) с целью недопущения блокировки его колёс. (Здесь под ТС подразумеваются не только автомобили, но также и локомотивы поездов.) Это связано с тем, что коэффициент трения скольжения значительно меньше коэффициента трения покоя. При блокировке колёса скользят по поверхности, поэтому увеличивается тормозной путь. При вращении колеса шина в момент контакта с дорожным покрытием относительно него находится в точке покоя – тормозной путь уменьшается. Задача АБС состоит не только в уменьшении тормозного пути, но и в сохранении контроля над ТС

при совершении экстренного торможения. В управлении при этом сохраняется возможность совершения достаточно резких маневров, что существенно повышает общую безопасность движения. С помощью АБС водитель следит за вращением колёс, и в случае их блокировки автоматически уменьшается давление в тормозной системе, чтобы дать колесу провернуться, а затем увеличивается сила сжатия. Таким способом достигается прерывистое торможение, позволяющее корректировать курс автомобиля в условиях экстремального торможения. Эффективность работы АБС зависит от её настройки в конкретном ТС и условий движения. В ряде случаев, например, при движении по рыхлой поверхности, использовании изношенных

покрышек, движении по льду на шипованной резине и др., применение АБС может привести даже к удлинению тормозного пути. Таким образом, оптимальная работа АБС зависит от конкретных параметров движения, характеристик ТС, погодных условий, состояния дороги и т. п. [1].

Цель настоящей работы – оптимизация работы АБС с точки зрения независимости от условий эксплуатации ТС.

Принцип действия классической антиблокировочной тормозной системы. Рассмотрим упрощённую структурную схему классической АБС автомобиля для одного колеса радиусом R с возможностью её репликации на остальные колеса (рис. 1). На колесе 1 находится частотный датчик вращения 2, который непрерывно вычисляет угловую скорость колеса ω_w в виде последовательности импульсов. Данная последовательность после интегрирования в интеграторе 4 и усиления в усилителе 5 поступает в вычислительный блок 9. В контроллере 6 вычисляется линейная скорость движения автомобиля v , преобразованная в угловую скорость $\omega_v = v/R$ путём интегрирования в интеграторе 7 и деления на радиус колеса в делителе 8. При этом используются показания датчика вращения и другие дополнительные параметры. Значения угловых скоростей автомобиля ω_v и колеса ω_w поступают в вычислительный блок 9, где рассчитывается коэффициент проскальзывания:

$$K_s = 1 - \omega_w / \omega_v. \quad (1)$$

Значение коэффициента проскальзывания через переключатель 10 поступает на отрицательный вход блока сравнения 12. На положительный вход этого блока через ввод 11 подаётся постоянное значение оптимального желаемого значения коэффициента проскальзывания $K_s^{\text{опт}}$. С выхода блока сравнения 12 запускающий сигнал поступает в контроллер 6, вырабатывающий сигнал управления, поступающий на устройство торможения колеса 3.

В начальный момент (до начала торможения) скорость ТС соответствует линейной скорости передвижения колеса или путевой скорости, выраженной в виде скорости вращения ω_v (см. формулу (1)). Коэффициент проскальзывания $K_s = 0$ и 1 при равенстве скоростей колеса и ТС, и при заблокированном колесе соответственно. Желательное значение $K_s^{\text{опт}} = 0,2$ означает, что количество оборотов колеса составляет 0,8 числа оборотов при отсутствии торможения и движении ТС с постоянной скоростью. Это максимизирует адгезию между шиной колеса и дорожным покрытием и минимизирует тормозной путь с обычным усреднённым коэффициентом трения μ . Контроллер АБС вычисляет реальную скорость ТС ω_v по сохранённым в памяти эмпирическим данным зависимости $\mu(K_s)$ между трением и коэффициентом проскальзывания. Это выполняется путём интегрирования произведения трения, фрикционной силы тормозного усилия F_f , действующей на шину, поделённого на массу m и приведённого к угловым единицам измерения:

$$\omega_v = (mR)^{-1} \int \mu W F_f dt, \quad (2)$$

где W – весовой коэффициент.

Интегрирование и приведение к радианам выполняется в блоках 7, 8 (см. рис. 1). Для управления скоростью изменения тормозного давления в АБС вычитается фактическое проскальзывание из желаемого и этот сигнал подаётся в блок управления включением +1 или –1 в зависимости от знака ошибки. Этот уровень включения/выключения проходит через задержку, соединённую с гидравлическими линиями тормозной системы. Затем контроллер интегрирует отфильтрованный сигнал, чтобы перейти к фактическому тормозному давлению. Получившийся сигнал, умноженный на площадь базового поршня и радиус колеса, преобразуется в момент привода.

Результаты действия АБС приведены на рис. 2, а в виде временных зависимостей скоростей колеса и автомобиля, а также коэффициента проскальзывания. График угловой скорости колеса располагается ниже графика угловой скорости автомобиля. В режиме без блокирования угловая скорость колеса уменьшается от 18 с^{-1} до нуля за 15 с. Необходимо строго соблюдать условие максимального приближения коэффициента проскальзывания к оптимальному значению. Именно в результате действия АБС коэффициент проскальзывания удерживается вокруг оптимального значения 0,2 (см. рис. 2, а). Также нельзя допустить полной блокировки колеса из-за возможной потери управляемости автомобилем [1].

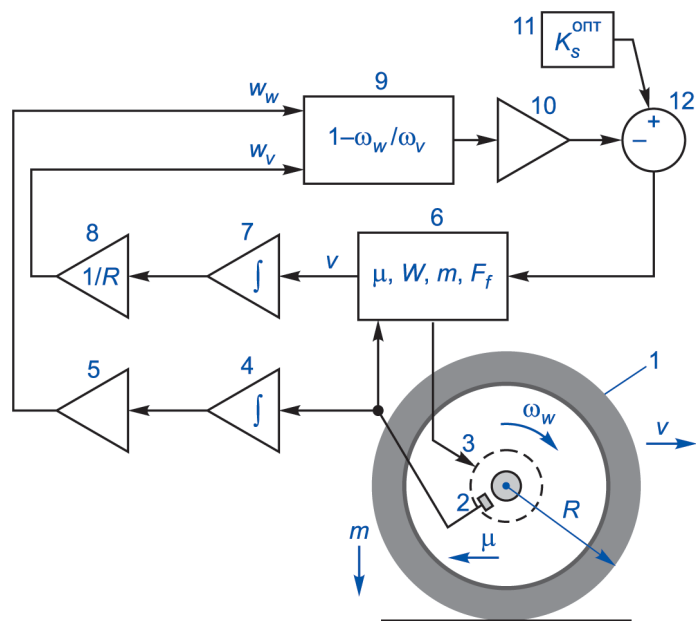


Рис. 1. Структурная схема антиблокировочной тормозной системы автомобиля:

1 – колесо; 2 – частотный датчик вращения; 3 – устройство торможения; 4, 7 – интеграторы; 5 – усилитель; 6 – контроллер; 8 – делитель; 9 – вычислительный блок; 10 – переключатель; 11 – блок ввода коэффициента проскальзывания; 12 – блок сравнения

Fig. 1. The block diagram of a vehicle antilock braking system: 1 – wheel; 2 – frequency rotation sensor; 3 – braking device; 4, 7 – integrator; 5 – amplifier; 6 – controller; 8 – divider; 9 – computing unit; 10 – switch; 11 – input block slip rate; 12 – comparator

Недостатки классической схемы АБС. Как отмечено выше, для оптимального действия системы АБС необходимо исключить возможность полной блокировки колеса и поддерживать коэффициент проскальзывания в соответствии с уравнением (1). В противном случае при блокировке колес скорость вращения колеса ω_w резко уменьшается, что приводит к удлинению тормозного пути в соответствии с графиком изменения путевой скорости транспортного средства ω_v от начала торможения до $t=17$ с (см. рис. 2, б). При этом блокировка колеса происходит уже при $t=7$ с, а автомобиль движется дальше на две секунды.

Для недопущения блокировки необходимо точно поддерживать оптимальное значение соотношения (1), что зависит от точности измерения путевой скорости. Однако это проблематично из-за большого количества дополнительных параметров, влияющих на конечный результат расчёта реальной скорости перемещения колеса при движении ω_v (см. формулу (2)). К таким дополнительным параметрам относятся масса автомобиля, мощность двигателя, радиус колеса, создающего момент инерции, коэффициент трения, зависящий от сцепления шины с подстилающей поверхностью, тормозное усилие. Влияние оказывают даже площадь поперечного сечения и аэродинамические свойства автомобиля. Кроме того, датчики АБС необходимо устанавливать на всех колёсах, поскольку любое из четырёх колес может быть заблокировано из-за локальных изменений степени сцепления с поверхностью дороги. При этом необходимо задействовать сложный алгоритм, препятствующий неуправляемому развороту автомобиля. В результате для корректной работы АБС требуется учитывать указанные факторы, что возможно только при тщательной калибровке и привязке к конкретному автомобилю и условиям эксплуатации, а это увеличивает риски.

Единственным способом учёта указанных недостатков является прямое измерение линейной скорости. Для измерения реальной скорости транспортного средства ω_v неприменима глобальная навигационная спутниковая система, поскольку необходимо обеспечить непрерывное измерение мгновенной скорости на относительно небольшом участке пути с большой точностью. Результаты измерения глобальной навигационной спутниковой системы обновляются через период времени не менее 1 с, кроме того, сигналы спутников могут быть недоступны на отдельных участках пути, поскольку условия приёма в горной и лесистой местности, а также в городах довольно ненадёжны. Точность таких измерений невысока из-за существенных погрешностей, связанных с условиями распространения сигналов и различными шумами. При этом из-за сугубо динамического характера использования данных о скорости невозможно усреднить показания [2]. Измерения с помощью датчиков инерциальной навигационной системы, обычно обеспечивающих навигационными данными в периоды отсутствия приёма спутниковых сигналов, также неприемлемы. Определение скорости с использованием датчиков инерциальной навигационной системы осуществляется путём интегрирования показаний акселерометров – значений ускорений, поэтому

происходит слишком большая для работы АБС временная задержка [2]. Единственным методом измерения реальной скорости автомобиля ω_v с быстроедействием, сравнимым с быстроедействием при определении скорости колеса ω_w по датчику вращения (см. рис. 1, поз. 2), является радиочастотный метод измерения путевой скорости [3].

Радиочастотный метод измерения путевой скорости. Данный метод измерения путевой скорости основан на эффекте Доплера для электромагнитных волн, который обычно применяется в радиолокации для определения скорости движущихся объектов. Суть метода заключается в зондировании движущихся объектов электромагнитными волнами сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона и выделении частоты смещения рассеянной волны [3]. Если приёмо-передающая антенна источника излучения с несущей частотой f_0 направлена на движущийся со скоростью v объект, то частота принятой антенной отражённой волны будет изменяться на доплеровскую частоту f_D :

$$f_D = 2vc \cos \alpha / \lambda_0, \quad (3)$$

где α – угол между направлением на объект и вектором скорости; $\lambda_0 = c/(f_0 \sqrt{\epsilon})$ – длина волны в среде измерения

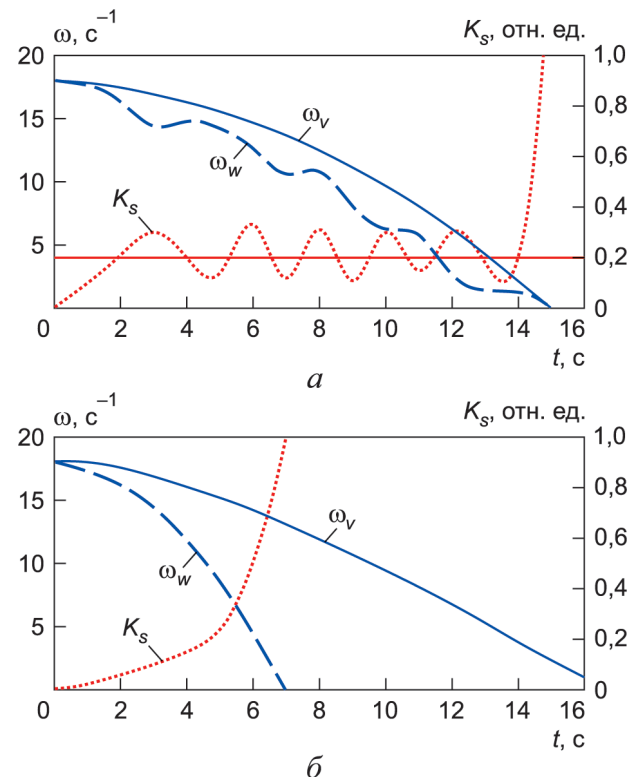


Рис. 2. Зависимости угловых скоростей колеса ω_w и автомобиля ω_v , а также коэффициента проскальзывания K_s при торможении с включённой (а) и отключённой (б) антиблокировочной системой

Fig. 2. Dependencies angular velocity wheel ω_w and the vehicle ω_v , and slip rate K_s during braking with antilock system (a) and when disconnected from the ABS (b)

с диэлектрической проницаемостью ϵ , для воздуха $\epsilon=1$; c – скорость света в воздухе.

Таким образом, измерив доплеровскую частоту, из формулы (3) можно вычислить скорость объекта:

$$v = cf_D / (2 \cos \alpha f_0). \quad (4)$$

Соотношения (3), (4) справедливы и при инверсии, когда источник излучения находится на движущемся автомобиле, а объектом излучения является дорога, на которую под некоторым углом падают электромагнитные волны [4, 5].

При традиционном радиолокационном применении эффекта Доплера объект можно считать точечным, поэтому доплеровская частота определяется единственной гармоникой и погрешность её определения будет минимальной. Однако при использовании эффекта Доплера в датчиках путевой скорости ТС точное определение доплеровской частоты является более сложной проблемой. В этом случае отражение происходит от подстилающей поверхности, при этом приёмо-передающая антенна датчика находится на движущемся объекте и направлена под углом α к поверхности.

Из-за конечности ширины θ диаграммы направленности антенны (рис. 3) принимаемый отражённый сигнал является суперпозицией волн, отражённых от поверхности под разными углами, что приводит к расширению спектра доплеровского сигнала. Кроме того, спектр доплеровского сигнала искажается вследствие неравномерности подстилающей поверхности (особенно для ТС – локомотивов) [6, 7].

Способы измерения путевой скорости с использованием радиочастотных доплеровских датчиков. Особенности условий применения датчиков для измерения путевой скорости приводят к специфическим методам обработки сигналов. Из-за искажений спектра сигналов измерение по максимуму спектра не приводит к достаточной точности. Для достижения необходимой точности можно применить линейную частотную модуляцию сигнала по пилообразному закону с вычислением спектров разностной частоты на участках повышения и спада модулирующего сигнала. Путевая скорость определяется по сдвигу между этими спектрами путём вычисления их взаимной корреляции [8]. Однако недостаточное быстродействие этого метода не позволяет применять его в АБС. Более высокой точностью обладает метод с использованием постоянной несущей частоты при двухканальном приёме

отражённой волны с задержкой на половину длины волны в одном из каналов. После выпрямления в образованном квадратурном смесителе мгновенная скорость вычисляется по временной задержке между сигналами на прямом $I(t)$ и квадратурном (с задержкой на 90°) $Q(t)$ выходах смесителя. Таким образом, можно достаточно точно измерять мгновенную скорость в кусочно-временном режиме. Тем не менее, в режиме быстрого изменения скорости, что характерно для АБС, этот метод будет недостаточно точен из-за своей инерционности.

Наибольшей эффективности можно достичь с использованием устройства измерения перемещения, описанного в [9]. Здесь выходные сигналы $I(t)$, $Q(t)$ квадратурного смесителя поступают на компаратор, на выходе которого формируется последовательность импульсов через временные промежутки, соответствующие перемещению на расстояние $s = \lambda_0 / (2 \cos \alpha)$. Таким образом, измерение скорости в любой момент времени сводится к подсчёту числа импульсов за произвольно выбранный временной

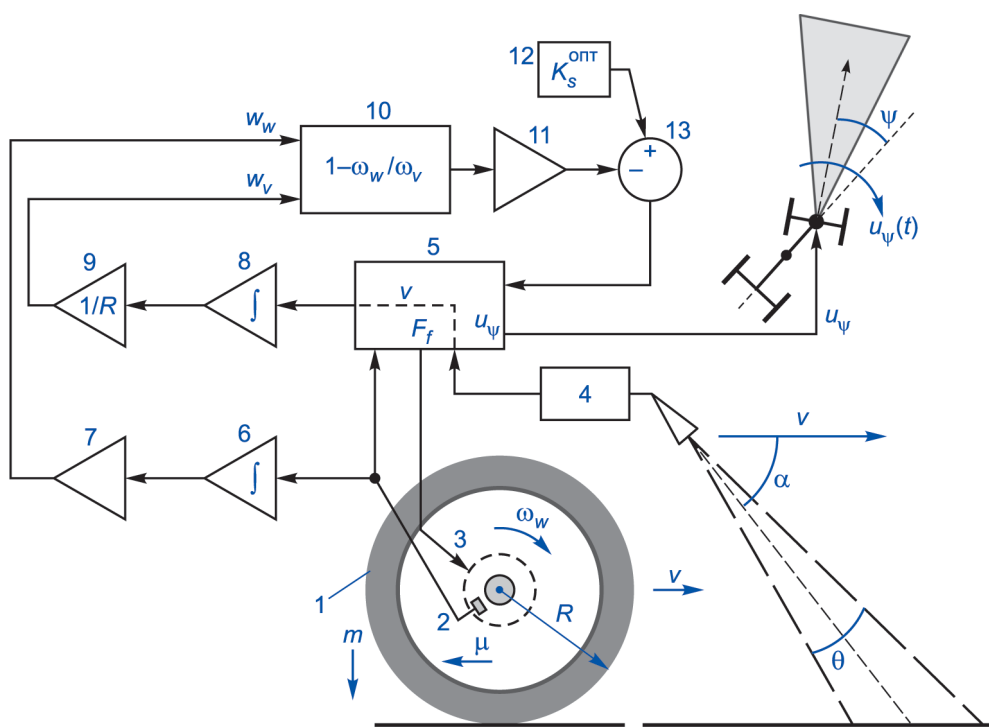


Рис. 3. Структурная схема антиблокировочной тормозной системы автомобиля с использованием доплеровского СВЧ-датчика перемещения:

1 – колесо; 2 – частотный датчик вращения; 3 – устройство торможения; 4 – СВЧ-датчик перемещения; 5 – контроллер; 6, 8 – интеграторы; 7 – усилитель; 9 – делитель; 10 – вычислительный блок; 11 – переключатель; 12, 13 – блоки ввода и сравнения соответственно

Fig. 3. Block diagram of a vehicle anti-lock brake system using a microwave displacement sensor: 1 – wheel; 2 – frequency rotation sensor; 3 – braking device; 4 – microwave replacement sensor; 5 – controller; 6, 8 – integrators; 7 – amplifier; 9 – divider; 10 – computing unit; 11 – switch; 12 – input block slip; 13 – comparator

интервал. Этот способ позволяет существенно увеличить динамический диапазон измерения скорости и точность измерения скорости: поскольку при частоте 24 ГГц, применяемой в доплеровском датчике, $\lambda_0 = 12$ мм [10], то погрешность δ_v измерения будет малой:

$$\delta_v = \pm \lambda_0 / (2t \cos \alpha), \quad (5)$$

где t – интервал измерения скорости.

Преимущество применения доплеровских СВЧ-датчиков АБС. Как указано выше, из-за большого количества влияющих параметров качество системы АБС критически зависит от её настройки, т. е. работу АБС необходимо оптимизировать.

При использовании в АБС доплеровского СВЧ-датчика путевой скорости (см. рис. 3, поз. 4), значения реальной линейной скорости перемещения ТС и угловой скорости колеса напрямую передаются в вычислительный блок. В результате удаётся поддерживать оптимальное соотношение K_s независимо от других сопутствующих параметров. Кроме того, данный способ построения АБС позволяет реализовать автоматическое выравнивание курса автомобиля при условии неравномерного торможения колес. В процессе торможения при работе АБС сцепления с поверхностью левого и правого передних колёс могут быть различными и, соответственно, будут разными их угловые и линейные скорости. Это неизбежно приводит к нежелательному неуправляемому заносу автомобиля. При этом за отрезок времени τ_i колёса будут проходить разные расстояния, перемещаясь по дугам радиусами $R_i \pm r/2$, где R_i – текущий радиус при движении автомобиля за отрезок времени τ_i , r – расстояние между передними колёсами. Тогда для каждого значения τ_i можно составить систему двух уравнений с двумя неизвестными для дуг, по которым перемещаются левое S_{1i} и правое S_{2i} колёса за этот отрезок времени:

$$\left. \begin{aligned} S_{1i} &= \pi(R_i + r/2)\varphi_i / 180^\circ; \\ S_{2i} &= \pi(R_i - r/2)\varphi_i / 180^\circ, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где φ_i – угол поворота колеса при движении автомобиля за отрезок времени τ_i .

При решении системы уравнений (6) получаем

$$\left. \begin{aligned} R_i &= r(S_{1i} + S_{2i}) / [2(S_{1i} - S_{2i})]; \\ \varphi_i &= (S_{1i} - S_{2i}) 180^\circ / (\pi r). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

При длине L_i хорды дуги окружности радиусом R_i , по которой перемещается центр автомобиля, и угле ψ_i его отклонения от предыдущей точки отсчета $i-1$, равных соответственно

$$L_i = 2R_i \sin(\varphi_i / 2); \quad \psi_i = \varphi_i / 2,$$

с учётом параметров (7) можно получить выражение для массива векторов перемещения автомобиля от произвольной точки $i-1$ до точек $i - \{L_i, \psi_i\}$ [6], где

$$\left. \begin{aligned} L_i &= r \frac{S_{1i} + S_{2i}}{S_{1i} - S_{2i}} \sin \frac{(S_{1i} - S_{2i}) 90^\circ}{\pi r}; \\ \psi_i &= \frac{(S_{1i} - S_{2i}) 90^\circ}{\pi r}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, согласно (8) угол ψ_i разворота автомобиля при торможении зависит от перемещения левого и правого передних колёс по дугам при соблюдении действия режима АБС отдельно для каждого из колёс согласно условию (1). Перемещения левого и правого передних колёс можно рассчитать через их угловые скорости ω_{1i} , ω_{2i} :

$$\left. \begin{aligned} S_{1i} &= \omega_{1i} R \tau_i; \\ S_{2i} &= \omega_{2i} R \tau_i. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

После подстановки уравнений (9) в соотношение (8) получим выражение для угла разворота автомобиля при торможении

$$\psi_i = \frac{(\omega_{1i} - \omega_{2i}) R \tau_i 90^\circ}{\pi r}. \quad (10)$$

На основе выражения (10) формируется управляющий сигнал u_{ψ_i} , который подаётся на рулевое управление для компенсации угла ψ_i (см. рис. 3).

Заключение. Применение в АБС доплеровского датчика перемещения позволило напрямую определить скорость автомобиля ТС на примере автомобиля в процессе неуправляемого торможения. Благодаря этому стало возможным более точное соответствие коэффициента проскальзывания желаемому оптимальному значению за счёт отсутствия необходимости учитывать массу, коэффициент трения и другие параметры автомобиля, влияющие на определение скорости. По результатам реального прямого определения путевой скорости в совокупности с данными датчиков угловой скорости вращения колес удалось построить систему активного противодействия заносу ТС за счёт подачи соответствующего инверсного сигнала на рулевое управление. В результате достигнута надёжная работа АБС в оптимальном режиме, обеспечивающая минимальный тормозной путь ТС с сохранением его управляемости и курсовой устойчивости.

Список литературы

1. Burton D., Delaney A., Newstead S., Logan D., Fildes B., *Evaluation of Anti-lock Braking Systems Effectiveness*, Report no. 04/01, Royal Automobile Club of Victoria (RACV) Ltd., 2004, 56 p.
2. Dardari D., Marco L., Falletti E., *Satellite and Terrestrial radio positioning techniques. A signal processing perspective*, Kildington, Oxford, 2012. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61856-0>
3. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
4. H. Guo, H. Chen, S. Member, F. Xu, F. Wang, and G. Lu, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 9, pp. 3823–3835. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2208436>

5. Patent no. US6072424, June 6, 2000. Cremona P., Rurnert M., Method for measuring the ground speed of a vehicle by means of electromagnetics waves from the driving surface.

6. Xu Ch., Daniel L., Hoare E., Sizov V., Cherniakov M., *Proceedings of the 11th European Radar Conference*, 8–10 October 2014, Rome, Italy, pp. 189–192.

<https://doi.org/10.1109/EuRAD.2014.6991239>

7. Ruser H., Magori V., Trankler H.-R., *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Anchorage*, AK, USA, 21–23 May 2002, pp. 25–30.

<https://doi.org/10.1109/IMTC.2002.1006810>

8. Хаблов Д. В. Корреляционный метод обработки сигналов сверхвысокочастотных доплеровских датчиков // *Измерительная техника*. 2017. № 5. С. 65–68.

9. Хаблов Д. В. Непрерывное наземное позиционирование на основе сверхвысокочастотных датчиков перемещений // *Измерительная техника*. 2019. № 6. С. 65–70.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-6-65-70>

10. Yoon Min, Ryu Jee-Youl, *Journal of Sensors*, 2016.

<https://doi.org/10.1155/2016/8534198>

References

1. Burton D., Delaney A., Newstead S., Logan D., Fildes B., *Evaluation of Anti-lock Braking Systems Effectiveness*, Report no. 04/01, Royal Automobile Club of Victoria (RACV) Ltd., 2004, 56 p.

2. Dardari D., Marco L., Falletti E., *Satellite and Terrestrial radio positioning techniques. A signal processing perspective*, Kidlington, Oxford, 2012. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-61856-0>

3. Viktorov V. A., Lunkin B. V., Sovlukov A. S., *Radiovolnovye izmereniya parametrov tekhnologicheskikh processov*, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 208 p. (in Russian).

4. H. Guo, H. Chen, S. Member, F. Xu, F. Wang, and G. Lu, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 9, pp. 3823–3835. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2208436>

5. Patent no. US6072424, June 6, 2000. Cremona P., Rurnert M., Method for measuring the ground speed of a vehicle by means of electromagnetics waves from the driving surface.

6. Xu Ch., Daniel L., Hoare E., Sizov V., Cherniakov M., *Proceedings of the 11th European Radar Conference*, 8–10 October 2014, Rome, Italy, pp. 189–192.

<https://doi.org/10.1109/EuRAD.2014.6991239>

7. Ruser H., Magori V., Trankler H.-R., *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Anchorage*, AK, USA, 21–23 May 2002, pp. 25–30.

<https://doi.org/10.1109/IMTC.2002.1006810>

8. Khablov D. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no.5, pp. 505–509. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1225-0>

9. Khablov D. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 554–561. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01660-8>

10. Yoon Min, Ryu Jee-Youl, *Journal of Sensors*, 2016.

<https://doi.org/10.1155/2016/8534198>

Статья поступила в редакцию 21.10.2020; принята к публикации 05.11.2020.