

УДК 629.113

А.В. ЮШКЕВИЧ

Белорусско-Российский университет, г. Могилев

ПБС ДОРОЖНОГО МОТОЦИКЛА «МИНСК» НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЯ СИЛ В КОНТАКТЕ ЕГО ВЕДУЩЕГО КОЛЕСА С ДОРОГОЙ

В работе дано обоснование противобуксовочной системы (ПБС), отличающейся низкой стоимостью, эффективностью, адаптивной к конструкции дорожного мотоцикла «Минск» и к условиям сцепления ведущих колес с опорной поверхностью на основе возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущего колеса с дорогой. В основу создания новой ПБС дорожного мотоцикла нами положена концепция возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущих колес мотоцикла с его опорной поверхностью при буксовании ведущего колеса с помощью гармонического осциллятора.

Ключевые слова: противобуксовочная система, источник информации, система активной безопасности, кинетическая энергия, мотоцикл, гармонический осциллятор, коэффициент сцепления, устойчивый фокус

Введение. Противобуксовочная система (ПБС) — это продукт эволюции антиблокировочной системы (АБС), которая сегодня известна как «трекшн-контроль». Система работает в купе с антиблокировочной системой, поэтому они объединены в одну комбинированную систему АБС/ПБС. Трекшн-контроль входит в качестве одной из опций в электронную систему курсовой устойчивости автомобиля ESP (Electronic Stability Program). Принцип работы ПБС основан на отслеживании буксования ведущих колес автомобиля. Критерий формирования сигналов управления ПБС определяется на основе измерения угловых скоростей вращения колес ведущего моста, а также скорости поступательного движения остова автомобиля. На основе информации об угловых скоростях вращения ведущих колес и скорости поступательного движения определяется коэффициент относительного скольжения контакта колес. Формирование сигналов управления исполнительными механизмами осуществляется путем задания порогового значения коэффициента относительного скольжения контакта колеса ($S = 18-20\%$). Несмотря на простоту алгоритма реализовать ПБС на автомобиле удалось только в начале 70-х годов XX века. Впервые ПБС была установлена на автомобилях Buick в 1971 году и называлась Max-Trac. Система ПБС у разных производителей называется по-разному: трекшн-контроль, ТС, TSC, TRC и ASR и др. Компонентами трекшн-контроля являются: датчики измерения угловой скорости вращения колес; электронный блок обработки информации от датчиков (или электронный блок управления); клапаны автоматического трекшн-контроля (АТС) притормаживают буксующие колеса, которые пробуксовывают. Функционирование ПБС автомобиля накладывает ограничение на скорость движения автомобиля, которое связано с его исполнительными механизмами. Так, простейший алгоритм ПБС формирует сигнал управления торможением колеса, вращающегося с большей скоростью. При этом происходит диссипация энергии двигателя, расход топлива увеличивается, а также возникает опасность возникновения момента, разворачивающего автомобиль из-за разности касательных сил в контакте ведущих колес с дорогой. Опасность возникновения разворачивающего момента возрастает при использовании механизма в качестве исполнительного механизма блоки-

ровки межколесного дифференциального механизма. Обычно производители ограничивают включение ПБС значениями скоростей от 40 до 60 км/ч. Другим используемым исполнительным механизмом ПБС является двигатель. В случае формирования сигнала управления ПБС снижает подачу топлива или отключает работу одного или двух цилиндров двигателя. Последний способ — это наихудший способ регулирования, который ведет к нарушению термодинамического цикла двигателя, повышению удельного расхода топлива, возрастанию динамической нагруженности элементов КШМ (кривошипно-шатунный механизм). Все перечисленные способы регулирования направлены на приведение момента двигателя в соответствие с моментом, способным реализовать ведущим колесом по условиям его сцепления с опорной поверхностью.

Первостепенной задачей ПБС является исключение буксования ведущих колес мотоцикла, и тем самым повышение тяговой динамики мотоцикла; повышение ускорения при его разгоне. Ускорение — это процесс, обратный процессу торможения, возникающий вследствие передачи момента двигателя через трансмиссию к ведущему колесу мотоцикла. Передача большого момента к ведущему колесу мотоцикла, превышающего момент по условию сцепления его ведущего колеса с опорной поверхностью приводит к его буксованию. Это в свою очередь приводит к потере мощности, устойчивости и управляемости движения мотоцикла, и, как следствие, к его падению. Места размещения компонентов ПБС на мотоцикле представлены на рисунке 1.

В качестве источников информации используются датчики измерения угловых скоростей вращения переднего и заднего колес мотоцикла — кинематические параметры; помпа и блок управления АБС/ПБС; блок управления двигателем.

Современная система ПБС, используемая на мотоциклах, представляет собой высокотехнологичный наукоемкий интеллектуальный продукт, использующий коммуникацию MSC (Motorcycle Stability Control), электронные блоки управления (ЭБУ), основанный на современном промышленном стандарте — шине CAN Bus, связывающей всю электронику мотоцикла единой сетью.

По данным независимых экспертов (IEEE и Токийского университета), задержка между срывом колеса



Рисунок 1 — Места размещения компонентов ПБС на мотоцикле [1]

и изменением положения электронной дроссельной заслонки составляет около 200 мс. С учетом дополнительных механических элементов (трансмиссии, цепи и так далее) следует ожидать не менее 300–400 мс общей задержки между регистрацией срыва колеса и воздействием по восстановлению сцепления резины с дорожным покрытием.

Заемствование компонент MSC для их адаптации к дорожному мотоциклу «Минск» практически не представляется возможным прежде всего из-за высокой стоимости и технологической сложности системы.

Цель исследований — создать ПБС, отличающуюся низкой стоимостью, эффективностью, адаптивную к конструкции дорожного мотоцикла «Минск» и к условиям сцепления ведущих колес с опорной поверхностью на основе возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущего колеса с дорогой.

Реализация поставленной цели. В Белорусско-Российском университете (БРУ) на кафедре «Техническая эксплуатация автомобилей» с 2008 года и по настоящее время ведутся поисковые, инициативные исследования по созданию систем управления тормозной и тяговой динамики дорожного мотоцикла «Минск». Созданы стенд испытаний тяговой и тормозной динамики дорожного мотоцикла «Минск» (см. рисунок 1), макетные образцы электронных систем управления движением двухколесного транспортного средства (велосипед, мотоцикл).

В основу создания новой ПБС дорожного мотоцикла нами положена концепция возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущих колес мотоцикла с его опорной поверхностью при буксовании ведущего колеса с помощью гармонического осциллятора.

Теоретическое обоснование способа возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущего колеса с дорогой. Класс автоколебательных систем очень широк: механические часы, радиотехнические, электронные и квантовые генераторы электромагнитных колебаний, духовые и смычковые музыкальные инструменты и др. Автоколебания имеют прерывистый характер и проявляются в виде скачкообразных перемещений (скачков) при скольжении относительно друг друга поверхностей трения тел с упругим закреплением одной из них. Появление скачкообразных перемещений объясняется либо наличием отрицательного (падающего) участка характеристики трения скольжения, либо возрастанием силы

трения, зависящего от продолжительности контакта поверхностей трения [1, 6, 7].

Рассмотрим механическую систему, в которой скачкообразные перемещения возникают при превышении силы трения покоя по сравнению с силами трения скольжения.

Для моделирования динамики колебания массы с учетом силы трения представим его в виде вязкоупругой механической системы, имеющей одну степень свободы (рисунок 2).

Положим, что сила упругости равна

$$f_y(x, y) = c(x - y), \tag{1}$$

где c — коэффициент жесткости упругого элемента в зависимости от его деформации изменяется по линейному закону.

Сила трения $f_{тр}(y)$ — некоторая суммарная сила сухого трения и вязкого сопротивления:

$$\begin{aligned} |f_{тр}(y)| < F_{тр,0} & \text{ если } \dot{y} = 0; \\ f_{тр}(y) = F_{тр,0} \cdot \dot{y} \neq 0 + F_{в,тр} \operatorname{sgn} \dot{y}, & \text{ при } \dot{y} \neq 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Параметр $F_{тр,0}$ характеризует силу трения при отсутствии относительного скольжения поверхностей трения; параметр $F_{тр,дв}$ — силу трения при относительном скольжении поверхностей трения; $F_{в,тр}$ — сила вязкого сопротивления; \dot{y} — скорость перемещения тела.

Динамическую модель с учетом выражений (1), (2) получим на основе принципа динамического равновесия Даламбера: масса M подвижного элемента вызывает силу инерции $M \cdot \ddot{y}$, пропорциональную ускорению y и противоположно ему направленную:

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{y} = 0, & \text{ если } \dot{y} = 0 \text{ и } |f_y| < F_{тр,0}; \\ \text{если } \dot{y} = 0 \text{ и } |f_y| \geq F_{тр,0}, & \text{ или если } \dot{y} \neq 0. \end{aligned} \tag{3}$$

Первое уравнение системы уравнений (3) соответствует состоянию покоя тела, второе уравнение соответствует скольжению поверхностей трения.

Динамическое состояние тела характеризуется ее фазовым портретом, представленным на рисунке 3.

Состоянию покоя соответствуют точки отрезка $|f_y| \geq F_{тр,0}, \dot{y} = 0$.

При достаточно малой скорости \dot{x} и $F_{в,тр} < 4M \cdot c$ наблюдается «устойчивый фокус», и тело находится в состоянии автоколебания.

Автоколебаниям соответствует устойчивый предельный цикл на фазовом портрете. Наличие устой-

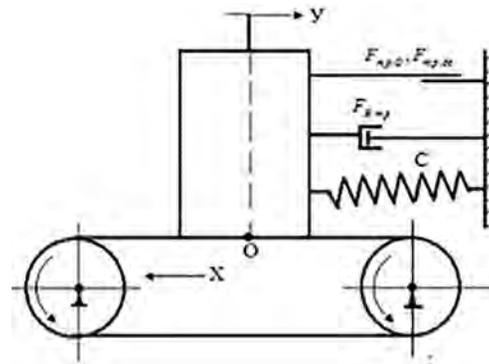


Рисунок 2 — Вязкоупругая механическая система с одной степенью свободы (метод Ван-Дер Поля [7])

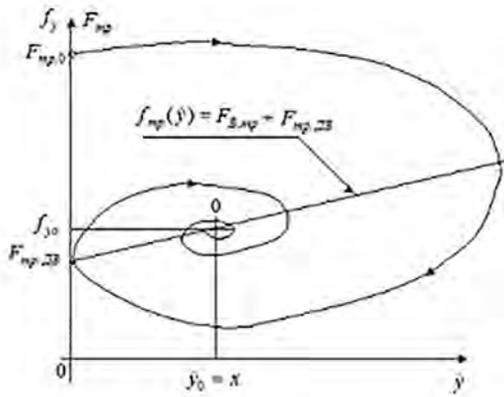


Рисунок 3 — Фазовый портрет нелинейной колебательной системы

чивого предельного цикла при устойчивом состоянии равновесия свидетельствует о существовании между ними неустойчивого предельного цикла. Исчезновению автоколебаний соответствует слияние (с последующим исчезновением) устойчивого и неустойчивого предельных циклов. Слияние циклов происходит на фазовой траектории, исходящей из точки $f_y = F_{тр,0}$ при $\dot{y} = 0$, которая представляет собой траекторию полуустойчивого предельного цикла.

Условия отсутствия автоколебаний:

$$\frac{M \cdot c}{M \cdot c - F_{в.тр} \cdot G + G^2} < \exp \left[\frac{2 \cdot F_{в.тр}}{\sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}} \times \arctg \frac{(F_{в.тр} - G) \sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}}{F_{в.тр} \cdot (F_{в.тр} - G) - 2 \cdot M \cdot c} \right] < \frac{2 \cdot F_{в.тр}}{\sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}} \times \exp \left[\arctg \frac{F_{в.тр} \cdot \sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}}{F_{в.тр}^2 - 2 \cdot M \cdot c} + 2 \cdot \pi \right] \quad (4)$$

при $F_{в.тр}^2 > 2 \cdot M \cdot c$ и $F_{в.тр} \cdot G > F_{в.тр}^2 - 2 \cdot M \cdot c$,

$$\frac{M \cdot c}{M \cdot c - F_{в.тр} \cdot G + G^2} < \exp \left[\frac{2 \cdot F_{в.тр}}{\sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}} \times \arctg \frac{(F_{в.тр} - G) \sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}}{F_{в.тр} \cdot (F_{в.тр} - G) - 2 \cdot M \cdot c} \right] < \frac{2 \cdot F_{в.тр}}{\sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}} \times \exp \left[\arctg \frac{F_{в.тр} \cdot \sqrt{4 \cdot M \cdot c - F_{в.тр}^2}}{F_{в.тр}^2 - 2 \cdot M \cdot c} + \pi \right] \quad (5)$$

где $G = (F_{в.тр} - F_{тр,дв}) / \dot{x}$.

Неравенства (4) и (5) получены из условия прохождения фазовой траектории

При $F_{в.тр}^2 < 4 \cdot M \cdot c$ в точке $f_y = F_{тр,дв} < 4 \cdot M \cdot c$ при $\dot{y} = 0$.

Автоколебания существуют при условии, что $F_{в.тр}^2 < 4 \cdot M \cdot c$. Используя условия (4) и (5), при известных значениях параметров $M, c, F_{в.тр}, F_{тр,0}, F_{тр,дв}$ нетрудно установить диапазон скоростей, при которых возникают автоколебания.

Результатами теоретических исследований установлено:

- скачкообразные изменения сил трения наблюдаются при малых скоростях относительного скольжения трущихся поверхностей трения, которые исчезают с увеличением скорости относительного скольжения поверхностей трения;
- амплитуда и частота скачкообразного изменения сил трения в контакте трущихся поверхностей зависят от скорости относительного скольжения поверхностей трения;
- первичный скачок силы трения в контакте трущихся поверхностей трения больше последующих скачков.

Для уменьшения нагрузок в приводе ведущих колес дорожного мотоцикла «Минск» в систему возбуждения автоколебаний сил в контакте колес с дорогой включим элемент вязкого сопротивления.

С учетом вязкоупругих элементов в колесном узле уравнение поступательного движения мотоцикла имеет вид:

$$X(t) = \frac{\alpha \cdot e^{-nt}}{n^2} \left[\frac{k^3}{\sqrt{k^2 - n^2}} \cdot \sin \sqrt{k^2 - n^2} \cdot t - k^2 \cdot \sin kt \right], \quad (6)$$

где $n = \frac{\alpha}{2m}$; α — коэффициент вязкого сопротивления,

пропорциональный скорости оси вращения заднего колеса мотоцикла.

Скачкообразное изменение сил в контакте колес мотоцикла с опорной поверхностью предшествует срыву контакта колес (рисунок 4) и в последующем содействует повышению ускорения поступательного движения мотоцикла.

Дифференциальное уравнение поступательного движения мотоцикла под действием импульса сил:

$$m\ddot{x} + c \cdot x = F_0 \cdot \delta(t - T).$$

$$x(t) = \begin{cases} x_0 \cos kt + \frac{v_0}{k} \sin kt, & \text{при } t < T; \\ x_0 \cos kt + \frac{v_0}{k} \sin kt + \frac{F_0}{mk} \sin k(t - T), & \text{при } t > T, \end{cases} \quad (7)$$

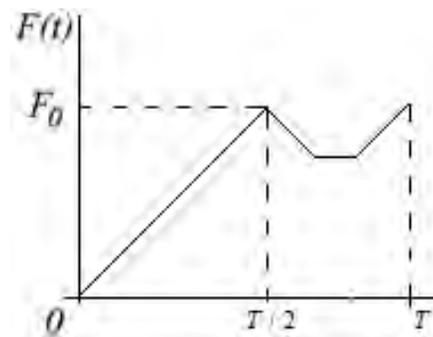


Рисунок 4 — Скачкообразное изменение сил в контакте заднего колеса дорожного мотоцикла «Минск» с опорной поверхностью предшествует срыву контакта колеса

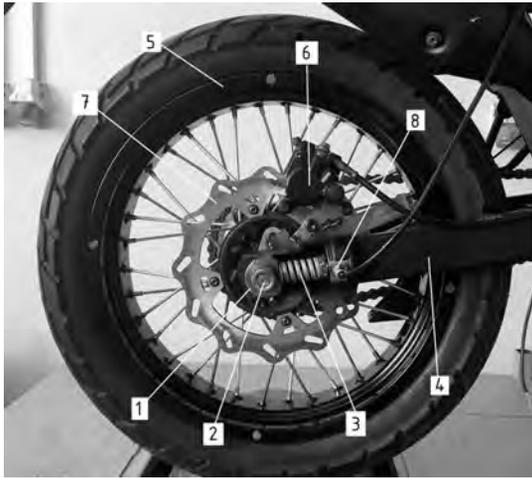


Рисунок 5 — Макетный образец системы возбуждения автоколебаний сил в контакте заднего ведущего колеса дорожного мотоцикла «Минск»: 1 — направляющая втулка; 2 — ось колеса; 3 — упругий элемент; 4 — задний маятник; 5 — заднее колесо мотоцикла; 6 — гидравлический тормозной механизм; 7 — тормозной диск; 8 — датчик

где T — период колебаний; k — частота собственных колебаний гармонического осциллятора; δ — функция Дирака (единичная функция).

Конструктивное исполнение разработанной ПБС, основанной на возбуждении автоколебаний сил в контакте заднего ведущего колеса дорожного мотоцикла «Минск», представлено на рисунке 5.

Для проверки адекватности результатов теоретических исследований были проведены стендовые испытания системы возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущего колеса мотоцикла с опорной поверхностью (рисунок 6).

Осциллограмма изменения тяговой силы в контакте заднего ведущего колеса дорожного мотоцикла «Минск» с поверхностью барабана со штатной конструкцией колесного узла (стендовые испытания)

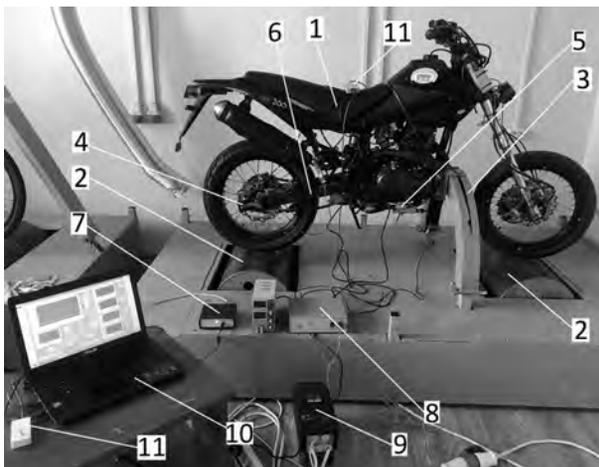


Рисунок 6 — Стендовые испытания системы возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущего колеса мотоцикла: 1 — мотоцикл «Минск»; 2 — беговой барабан; 3 — рама крепления мотоцикла; 4 — датчик измерения тяговой силы; 5 — датчик измерения силы нажатия на педаль газа; 6 — маятниковый рычаг заднего колеса мотоцикла; 7 — блок управления электродвигателями беговых барабанов; 8 — АЦП; 9 — инвертор; 10 — компьютер; 11 — модуль беспроводной связи

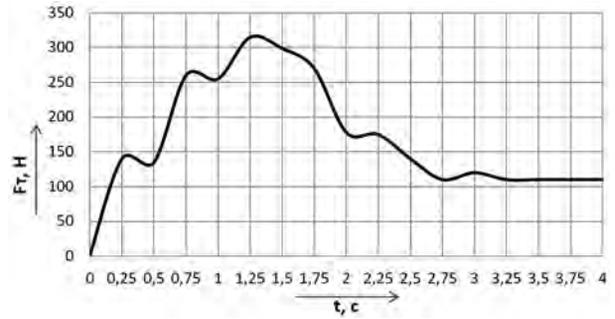


Рисунок 7 — Осциллограмма изменения тяговой силы в контакте заднего ведущего колеса дорожного мотоцикла «Минск» с поверхностью барабана со штатной конструкцией колесного узла (стендовые испытания)

представлена на рисунке 7. Осциллограмма изменения сил в контакте заднего колеса дорожного мотоцикла «Минск» на стенде представлена на рисунке 8.

Из результатов исследований видно (см. рисунки 7, 8), что время разгона мотоцикла «Минск» до момента переключения передачи с 1-й на 2-ю со штатной конструкцией колесного узла составляет $t_1 \approx 2,75$ с, а с системой возбуждения автоколебаний сил в контакте колеса — $t_2 \approx 2,55$ с.

Выводы по результатам исследований. 1. Получено уравнение поступательного движения мотоцикла с учетом автоколебаний сил в контакте ведущих колес с дорогой, позволяющее исследовать динамику разгона с учетом массо-геометрических параметров, частотных характеристик автоколебаний сил в контакте ведущих колес и коэффициентов сцепления ведущего колеса мотоцикла с дорогой.

2. Результатами экспериментальных исследований ПБС дорожного мотоцикла «Минск» с системой возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущих колес установлено:

- автоколебания сил в контакте ведущего колеса наблюдаются на начальной стадии буксования ведущего колеса при малой скорости относительного скольжения контакта колеса с последующим переходом в установившийся режим;
- частота автоколебаний сил в контакте колеса мотоцикла с опорной поверхностью барабана стенда испытаний составила 20–24 Гц и сопровождается в начале скольжения контакта скачкообразным изменением силы в контакте колеса, исчезающим с возрастанием угловой скорости вращения барабана;

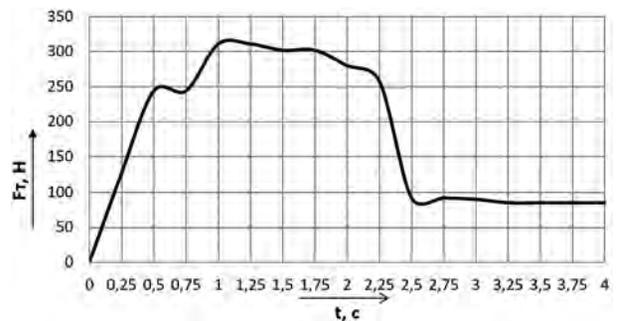


Рисунок 8 — Осциллограмма изменения сил тяги в контакте ведущего колеса дорожного мотоцикла при разгоне (стендовые испытания) с системой возбуждения автоколебаний сил в контакте колеса

- частота срабатывания электроклапанов гидравлических модуляторов ПБС мотоциклов составляет 12–18 Гц, следовательно, использование системы возбуждения автоколебаний сил в контакте ведущего колеса мотоцикла будет гораздо дешевле и эффективнее.

3. Разработан и испытан макетный образец механической ПБС, основанной на возбуждении автоколебаний сил в контакте ведущих колес мотоцикла, которая предотвращает переход процесса скольжения контакта колеса в стадию полного буксования колеса, и тем минимизирует диссипацию энергии, т. е. представляет собой противобуксовочную систему с самоадаптацией к характеристикам опорной поверхности колеса и моментам, передаваемым к ведущему колесу от двигателя.

Список литературы

1. Грань контроля. Система устойчивости мотоцикла от Bosch на Zero SR/F [Электронный ресурс]. — Режим доступа <https://mototeamrussia.com/type/gorodskoy/gran-kontrolya-sistema-ustoychivosti-mototsikla-ot-bosch-na-zero-srf-57f8e12>. — Дата доступа: 16.08.20.
2. Ким, В.А. Методология создания адаптивных САБ АТС на основе силового анализа: монография / В.А. Ким. — Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2003. — 346 с.
3. Тормозная система мотоцикла: пат. ВУ 17082 / А.С. Мельников, И.С. Сазонов, В.А. Ким, Г.И. Мамити. — Опубл. 28.02.2012.
4. Юшкевич, А.В. Теоретическое обоснование метода диссипации кинетической энергии мотоцикла «Минск» при торможении / А.В. Юшкевич, В.А. Ким // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 30–33.
5. Система активной безопасности: пат. ВУ 9363 / А.В. Юшкевич, А.С. Мельников, И.С. Сазонов, В.А. Ким, М.Л. Петренко. — Опубл. 30.08.2013.
6. Лагранж, Ж. Аналитическая механика / Ж. Лагранж. — М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1950. — 440 с.
7. Шамберов, В.Н. Метод аналитического исследования влияния сухого трения на поведение авторегулируемых динамических систем / В.Н. Шамберов // Науч. приборостроение. — 2003. — Т. 13, № 3. — С. 77–83.
8. Ле, Суан Ань Динамика систем с кулоновым трением (теория и эксперимент) / Ле Суан Ань. — СПб: Нестор, 1999. — 299 с.
9. Петренко, М.Л. Теоретические основы создания системы следящего торможения велосипеда «Аист» / М.Л. Петренко, В.А. Ким // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 26–29.

Yushkevich A.U.

TCS of a road bike “Minsk” based on system of excitation of self-oscillation of forces in contact of its driving wheel with road

The paper substantiates the traction control system (TCS), which is characterized by low cost, efficiency, adaptive to the design of the road motorcycle “Minsk” and to the conditions of adhesion of the driving wheels to the supporting surface on the basis of excitation of self-oscillations of forces in contact of the driving wheel with the road. The basis for creating a new TCS for a road motorcycle is the concept of excitation of self-oscillations of forces in the contact of the driving wheels of the motorcycle with its supporting surface when the driving wheel is slipping with the help of a harmonic oscillator.

Поступила в редакцию 31.08.2020.