

# Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 629.33

## Повышение устойчивости движения многоосных колесных машин методом корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания)\*

М.М. Жилейкин<sup>1</sup>, В.А. Середюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

<sup>2</sup> ОАО «КАМАЗ», 423827, Набережные Челны, республика Татарстан, Российская Федерация, Автозаводский пр., д. 2.

## Improving the stability of motion of multi-wheeled vehicles by correcting the steering angle

M.M. Zhileykin<sup>1</sup>, V.A. Seredyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

<sup>2</sup> OJSC «KAMAZ», Avtozavodskiy prosp., 2, 423827, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation.

@ e-mail: jileykin\_m@mail.ru, seredyuk\_kmz@mail.ru

**i** Управляемость и устойчивость автомобиля — важнейшие эксплуатационные свойства и составляющие активной безопасности движения. Оценке этих свойств во всем мире придается большое значение. Разработан алгоритм корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания) для многоосных колесных машин (МКМ), обеспечивающий повышение курсовой и траекторной устойчивости машины. Методами имитационного моделирования установлено, что для МКМ с электромеханической трансмиссией, выполненной по схеме «мотор–ось», применение корректирующего изменения угла поворота управляемых колес в качестве стабилизирующего воздействия наиболее эффективно в сочетании с алгоритмом снижения потребляемой мощности силовой установки. В этом случае обеспечивается повышение эффективности работы системы стабилизации движения машины на 15...79 %. Результаты исследований могут быть полезны предприятиям автомобильной отрасли, специализирующимся на проектировании и производстве, в первую очередь, двухосных колесных машин различного класса и назначения, а также организациям, разрабатывающим системы управления для колесной транспортной техники.

**Ключевые слова:** колесная машина, активная безопасность, имитационное моделирование, устойчивость, управляемость, подруливание.

**i** Vehicle handling and stability are vital performance characteristics and components of active safety. The evaluation of these properties is of great importance all over the world. An

\* Работа выполнена в рамках договора № 9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации.

algorithm for correcting the steering angle of multi-wheeled vehicles to increase their course and trajectory stability is developed. The performed simulation proved that motor-axle multi-wheeled vehicles with electromechanical transmissions are most efficient to stabilize by combining the algorithm of correcting the steering angle with reducing the power consumption of the power plant. In this case, the efficiency of the stabilization system of the vehicle is increased by 15...79 %. The results of research can be used by automotive industry enterprises designing and producing primarily two-axle wheeled vehicles of various types and purposes, as well as by organizations developing control systems for wheeled transport.

**Keywords:** wheeled vehicle, active safety, simulation, stability, controllability, correcting the steering angle.

Управляемость и устойчивость автомобиля — важнейшие эксплуатационные свойства и составляющие активной безопасности движения, оценке этих свойств во всем мире придается большое значение. Как известно, основным предназначением систем активной безопасности автомобиля является предотвращение аварийной ситуации.

Согласно тенденциям развития современного автомобилестроения, производители постоянно повышают уровень контроля над параметрами движения колесных транспортных средств, добиваясь максимального уровня устойчивости и управляемости автомобилей.

В настоящее время вопросами создания систем активной безопасности автомобилей, обеспечивающих повышение устойчивости и управляемости, активно занимаются за рубежом. Исследования ведутся по двум направлениям. Во-первых, создаются системы динамической стабилизации (СДС) для двухосных коммерческих автомобилей, принцип действия которых основан на изменении крутящих моментов, подводимых к ведущим колесам. При этом все более актуальным и целесообразным является использование различных систем полного привода. Распределение тягового усилия на все колеса позволяет использовать весь вес автомобиля в качестве сцепного, что положительно сказывается на динамических качествах автомобиля, проходимости и позволяет реализовать алгоритмы управления, улучшающие управляемость и курсовую устойчивость автомобиля. Разработке этих методов посвящены, например, работы [1–3].

Во-вторых, повышение устойчивости и управляемости обеспечивается за счет введения автоматического корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания) [4, 5]. Возможно комбинированное управление на основе указанных подходов [6]. Однако, описывая принцип работы систем стабилизации движения, авторы не раскрывают информацию о методах вычисления величин стабилизирующих воздействий, что, несомнен-

но, составляет коммерческую тайну производителей. В свободном доступе информация о зарубежных исследованиях, касающихся разработки алгоритмов повышения устойчивости движения специальных многоосных колесных машин (МКМ), вообще практически отсутствует. Объясняется этот факт спецификой объектов, которые используются, в том числе, под монтаж и перевозку систем вооружения.

Цель работы — создание алгоритма работы СДС движения МКМ за счет корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания), обеспечивающего повышение курсовой и траекторной устойчивости МКМ.

**Обоснование принципов стабилизации движения МКМ, оснащенных СДС, работающей по принципу корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания).** Как известно [4, 5], идея корректирующего подруливания заключается в компенсации разности углов увода передней  $\delta_1$  и задней  $\delta_n$  осей МКМ. В этом случае траектория движения машины будет совпадать с идеальной. При установившемся движении всегда можно подобрать такой постоянный угол поворота управляемых колес, при котором средние углы увода передней и задней осей машины  $\delta_1 = \delta_n = 0$ , не смотря на действие боковой силы.

В работах, посвященных разработке алгоритмов стабилизации МКМ методом подруливания [4, 5], предлагается определять углы подруливания на основе выполнения условия

$$\theta_1^{\text{подр}} - \theta_n^{\text{подр}} + \delta_n - \delta_1 = 0.$$

Здесь  $\theta_1^{\text{подр}}$  — угол подруливания управляемых колес передней оси;  $\theta_n^{\text{подр}}$  — угол подруливания управляемых колес задней оси.

**Исследование устойчивости движения колесных машин, оснащенных СДС, работающей по принципу корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания).** Аналитическое исследование устойчи-

ности движения МКМ весьма затруднительно ввиду необходимости проводить громоздкие преобразования дифференциальных уравнений движения. Это влечет за собой необходимость принимать многочисленные упрощающие допущения, что существенным образом сказывается не только на точности вычислений, но и приводит порой к необоснованным выводам об устойчивости и управляемости колесных машин. В то же время такой анализ достаточно просто и наглядно в случае создания стабилизирующих воздействий путем подруливания можно провести с помощью методов построения диаграммы устойчивости движения МКМ, аппарат которых достаточно подробно проработан отечественными учеными [7].

Диаграмма устойчивости движения МКМ представляет собой зависимость удельной боковой силы, действующей на машину, от относительной кривизны поворота, вызванного совместным действием всех факторов, порожденных этой боковой силой.

Любую удельную боковую силу  $\eta_y$ , действующую на МКМ, можно определить по формуле

$$\eta_y = P_y / G_a = j_y / g,$$

где  $P_y$  — боковая сила, действующая на автомобиль (МКМ);  $G_a$  — вес автомобиля (МКМ);  $j_y$  — боковое ускорение МКМ.

Пусть боковая сила — это центробежная сила, возникающая при движении центра масс МКМ по криволинейной траектории радиуса  $R$ , тогда

$$\eta_y = \frac{P_y}{G_a} = \frac{V_a^2 L}{g L R}.$$

Здесь  $L$  — база автомобиля;  $V_a$  — скорость движения автомобиля (МКМ);  $R$  — радиус поворота.

При  $V_a = \text{const}$  получается линейная зависимость между удельной боковой силой и относительной кривизной траектории движения центра масс. Соответствующий этому случаю вид диаграммы поворачиваемости (МКМ с ярко выраженной избыточной общей поворачиваемостью) показан на рис. 1.

Структура этой диаграммы позволяет определить составляющие поворачиваемости при заданном режиме движения МКМ. На машину с базой  $L$ , движущуюся по траектории с относительной кривизной  $OB$ , действует относительная боковая сила  $BA$ . Это движение характеризуется креновой поворачиваемостью  $CD$  и шинной поворачиваемостью  $DE$ . Суммарная нерулевая поворачиваемость МКМ (или само-

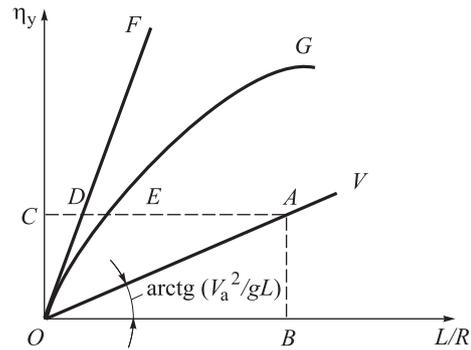


Рис. 1. Диаграмма устойчивости движения МКМ

поворачиваемость) соответствует отрезку  $CE$ . Нерулевая поворачиваемость не контролируется водителем и возникает самопроизвольно как следствие самого факта криволинейности траектории движения центра масс машины.

Очевидно, что для удержания МКМ на криволинейной траектории заданной относительной кривизны необходимо повернуть управляемые колеса, создав дополнительную рулевую поворачиваемость, соответствующую отрезку  $EA$ . При этом линии  $OF$  и  $OG$  характеризуют поворачиваемость МКМ только за счет креновой и шинной составляющих соответственно, а прямая  $OV$  — общую поворачиваемость машины. Длина отрезка  $EA$  равна углу поворота управляемых колес:  $\alpha = \theta_n - \theta_1$ , длина отрезка  $CE$  равна  $(\delta_n - \delta_1)$  [7], длина отрезка  $CA$  равна  $(\alpha + \delta_n - \delta_1)$ . Линия  $OG$  представляет собой границу устойчивого движения МКМ с уводом при угле поворота управляемых колес  $\alpha = 0$ .

Таким образом, если ввести стабилизирующее управление путем коррекции угла поворота передних колес ( $\delta_1 = 0$ ), то длина отрезка  $CE$  будет равна  $\delta_n$ , т. е. линия  $OG$  переместится влево. При этом зона неустойчивого движения (слева от линии  $OG$ ) сузится, а зона устойчивого движения, соответственно, расширится. Следовательно, введение подруливания передними колесами повышает запас устойчивости МКМ по сравнению с машинами без стабилизирующего воздействия.

В случае подруливания задними колесами длина отрезка  $CE$  равна  $(-\delta_1)$ , т. е. линия  $OG$  сместится влево от оси ординат. Это означает, что МКМ с подруливанием задними колесами обладает недостаточной поворачиваемостью и будет устойчива всегда.

При подруливании передними и задними колесами длина отрезка  $CE$  будет равна нулю, а линия  $OG$  совпадет с осью ординат. Такая МКМ обладает нейтральной поворачиваемостью и будет устойчива всегда.

**Обоснование состава информационного поля, обеспечивающего работу СДС движения многоосных МКМ.** При криволинейном движении МКМ в зависимости от соотношения между углами увода колес передней и задней осей принято различать машины с избыточной поворачиваемостью ( $\delta_n > \delta_1$ ), с недостаточной поворачиваемостью ( $\delta_n < \delta_1$ ) и нейтральной поворачиваемостью ( $\delta_n = \delta_1$ ).

Физический смысл этих названий обусловлен характером изменения радиуса поворота машины с колесами, деформируемыми в боковом направлении по сравнению с радиусом поворота МКМ, имеющего жесткие шины.

При учете увода радиус поворота  $R_\delta$  определяется по формуле

$$R_\delta = \frac{L}{(\theta_{1cp} - \delta_1) - (\theta_{ncp} - \delta_n)},$$

а при отсутствии увода

$$R = \frac{L}{\theta_{1cp} - \theta_{ncp}}.$$

Здесь  $\theta_{1cp}$  — средний угол поворота управляемых колес передней оси;  $\theta_{ncp}$  — средний угол поворота управляемых колес задней оси.

- Если  $\delta_n < \delta_1$ , то  $R_\delta > R$ ;
- если  $\delta_n > \delta_1$ , то  $R_\delta < R$ ;
- если  $\delta_n = \delta_1$ , то  $R_\delta = R$ .

Следует отметить, что соотношение углов увода  $\delta_n$  и  $\delta_1$  не характеризует полностью границу перехода от устойчивого по А.М. Ляпунову движения к неустойчивому.

Движение может быть устойчиво как при  $\delta_n < \delta_1$ , так и при  $\delta_n > \delta_1$ . В первом случае движение устойчиво при любой скорости автомобиля, а во втором — при скоростях меньше критической. Границей перехода от устойчивого движения к неустойчивому является критическая скорость. При этом понятие поворачиваемости определяет уже не только конструктивные особенности автомобиля, но и условия движения. При такой трактовке один и тот же автомобиль, в зависимости от характера движения, может обладать и недостаточной, и избыточной, и нейтральной поворачиваемостью.

При разработке системы управления курсовой и траекторной стабилизации движения МКМ в процессе управления необходимо определять параметры, которые достаточно надежно характеризуют свойство поворачиваемости в текущий момент времени. К таким параметрам можно отнести угловую скорость вращения МКМ  $\omega_a$ , продольное  $j_x$  и боковое  $j_y$  ускорения

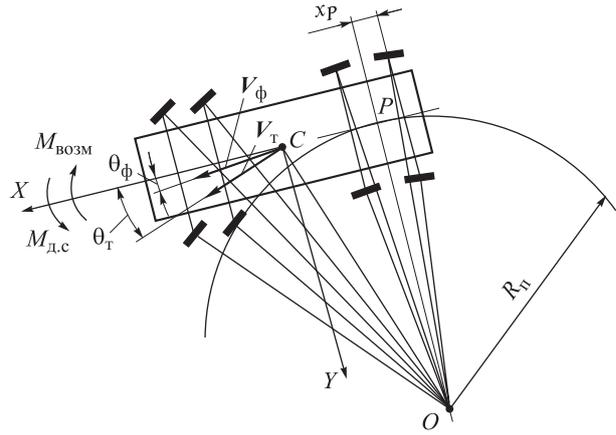


Рис. 2. Угол отклонения вектора скорости от продольной оси и схема действия стабилизирующего момента на МКМ

центра масс, разность углов увода крайних осей ( $\delta_n - \delta_1$ ). Последний параметр в процессе движения вообще невозможно измерить.

В качестве параметра, характеризующего степень поворачиваемости МКМ, предлагается использовать угол  $\beta = \theta_T - \theta_\Phi \neq 0$  между векторами линейных скоростей центра масс: теоретической ( $V_T$ ) и фактической ( $V_\Phi$ ) (рис. 2).

Составляющие вектора фактической скорости автомобиля ( $V_x, V_y$ ) определяются путем интегрирования производных  $dV_x/dt$  и  $dV_y/dt$ :

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= a_x + \omega_z V_y; \\ \frac{dV_y}{dt} &= a_y - \omega_z V_x. \end{aligned}$$

Алгоритмы оценки составляющих вектора фактической скорости автомобиля в настоящее время хорошо известны (см., например, [8]) и в данной работе не рассматриваются.

Определим текущее значение тангенса угла между вектором скорости и продольной осью автомобиля  $\text{tg } \theta_\Phi$  (см. рис. 2), а также теоретическое значение тангенса этого угла  $\text{tg } \theta_T$ . Курсовая устойчивость МКМ будет обеспечиваться при равенстве этих углов, а значит и их тангенсов. Значения  $\text{tg } \theta_\Phi$  и  $\text{tg } \theta_T$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \text{tg } \theta_\Phi &= V_y/V_x; \\ \text{tg } \theta_T &= \frac{l_n - x_p}{L - x_p + B/2} \text{tg } \theta_1, \end{aligned}$$

где  $V_x, V_y$  — проекции вектора скорости центра масс автомобиля на оси подвижной системы координат;  $x_p$  —  $x$ -координата смещения полю-

са поворота относительно задней оси МКМ;  $l_{ln}$  — расстояние от центра масс корпуса МКМ до задней оси;  $B$  — колея МКМ;  $\theta_1$  — угол поворота задающего (внутреннего переднего) управляемого колеса.

Факт возникновения заноса передних или задних осей МКМ устанавливается исходя из следующих условий:

- 1) если  $\text{sign}(\theta_T - \theta_\Phi) \text{sign}(\theta_1) > 0$ , система диагностирует наступление заноса передних осей;
- 2) если  $\text{sign}(\theta_T - \theta_\Phi) \text{sign}(\theta_1) < 0$ , система диагностирует наступление заноса задних осей.

Несовпадение углов направлений теоретического и фактического векторов скорости означает, что на МКМ действует динамический возмущающий момент  $M_{\text{возм}}$  (см. рис. 2), стремящийся «увести» машину с заданной водителем траектории движения. Для компенсации этого возмущающего воздействия необходимо создать динамический стабилизирующий момент  $M_{\text{д.с.}}$ , который не позволит МКМ сойти с траектории.

Покажем, что угол  $\beta$  связан с разностью углов увода  $(\delta_n - \delta_1)$ . Для этого рассмотрим схему движения МКМ, поворот которой определяется только шинной поворачиваемостью (рис. 3). Тогда отклонение от прямолинейной траектории определяется только разностью углов увода  $(\delta_n - \delta_1)$ . Запишем выражения для определения угла  $\beta$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_\delta \approx \frac{L}{\delta_1 + \delta_n}; \\ x_P \approx R_\delta \delta_n = \frac{L}{\delta_1 + \delta_n} \delta_n; \\ \beta \approx \frac{b - L \frac{\delta_n}{\delta_1 + \delta_n}}{L \frac{\delta_n}{\delta_1 + \delta_n}} = \left[ b - L \frac{\delta_n}{\delta_1 + \delta_n} \right] (\delta_1 + \delta_n) = \\ = \frac{b}{L} \delta_1 + \left( \frac{b}{L} - 1 \right) \delta_n. \end{array} \right.$$

Пусть  $b/L \approx 0,5$ , т. е. центр тяжести МКМ находится посередине базы. Тогда  $\beta = 0,5(\delta_n - \delta_1)$ . Таким образом установлено, что  $\beta \sim (\delta_n - \delta_1)$ . Следовательно, по величине параметра  $\beta$  в процессе управления можно судить о том, какой поворачиваемостью обладает МКМ в текущий момент времени.

Как показано выше, для того чтобы обеспечить устойчивое движение МКМ за счет корректирующего изменения угла поворота управляемых колес угол подруливания должен быть

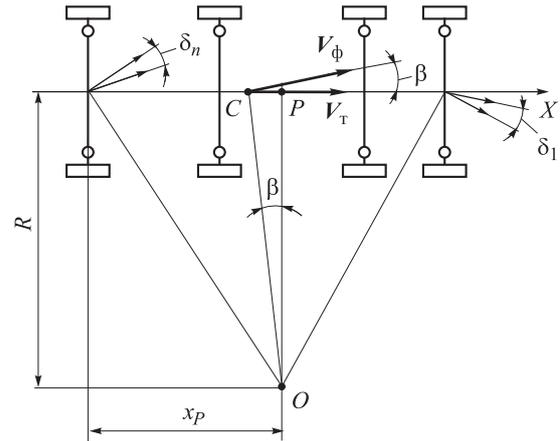


Рис. 3. Схема поворота МКМ за счет шинной поворачиваемости

не меньше разности  $(\delta_n - \delta_1)$ . Примем, что средний угол подруливания для управляемых колес передней оси  $\theta_{\text{иср}}^{\text{подр}} = \beta$ . Тогда углы подруливания внешнего и внутреннего (по отношению к направлению поворота) управляемых колес различных осей МКМ определяются по следующим формулам:

- для внешних (по отношению к направлению поворота) управляемых колес  $i$ -й оси, расположенной перед полюсом поворота (см. рис. 2),

$$\theta_{i\text{ext}}^{\text{подр}} = \frac{l_i - x_P}{(L - x_P)/\beta + B/2};$$

- для внутренних (по отношению к направлению поворота) управляемых колес  $i$ -й оси, расположенной перед полюсом поворота (см. рис. 2),

$$\theta_{i\text{in}}^{\text{подр}} = \frac{l_i - x_P}{(L - x_P)/\beta - B/2};$$

- для внешних (по отношению к направлению поворота) управляемых колес  $i$ -й оси, расположенной за полюсом поворота (см. рис. 2),

$$\theta_{i\text{ext}}^{\text{подр}} = \frac{x_P - (L - l_i)}{(L - x_P)/\beta + B/2};$$

- для внутренних (по отношению к направлению поворота) управляемых колес  $i$ -й оси, расположенной за полюсом поворота (см. рис. 2),

$$\theta_{i\text{ext}}^{\text{подр}} = \frac{x_P - (L - l_i)}{(L - x_P)/\beta - B/2}.$$

Здесь  $l_i$  — расстояние от передней до  $i$ -й оси машины;  $x_P$  — расстояние от последней оси МКМ до полюса поворота  $P$  (см. рис. 2).

**Исследование эффективности работы алгоритмов стабилизации движения для МКМ с тяговым электроприводом.** Объект моделирования и условия движения. Объектом моделирования является МКМ с электромеханической трансмиссией, построенной по схеме «мотор–ось» [9], полной массой 43 т с колесной формулой 8×8, оснащенная пневмогидравлической подвеской.

Основные технические характеристики МКМ приведены ниже:

Параметр	Значение
Расстояние, м:	
от 1-й оси до 2-й оси $l_2$ .....	2,35
от 1-й оси до 3-й оси $l_3$ .....	6,25
от 1-й оси до 4-й оси $l_4$ .....	8,45
от 1-й оси до ЦТ $a$ .....	3,9
от 4-й оси до ЦТ $b$ .....	4,55
База МКМ $L$ , м .....	8,45
Колея МКМ $B$ , м .....	2,6
База передней тележки $l_{п}$ , м .....	2,35
База задней тележки $l_3$ , м .....	2,2
Момент инерции МКМ относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести $J_z$ , кг·м <sup>2</sup> .....	30 400
Вес МКМ $G_a$ , Н .....	423 360
Максимальная мощность двигателя при 1 900 об/мин, $N_{дв}$ , л.с. ....	500
Максимальный крутящий момент двигателя при оборотах коленвала 1 300 об/мин, $M_{max}$ Н·м .....	2 300

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма повышения устойчивости движения МКМ, оснащенной системами активной безопасности, было проведено численное моделирование движения машин со стабилизирующим управлением и без него. Сочетания алгоритмов стабилизации, для которых проводилось исследование эффективности, представлены ниже:

Алгоритм стабилизации	Условное обозначение
Снижение потребляемой мощности двигателя .....	LP (Low Power)
Подруливание .....	S (Steering)
Снижение потребляемой мощности двигателя + подруливание .....	LP + T (Low Power + Steering)

Движение МКМ моделировалось на четырех типах опорного основания: 1) грунтовое основание (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании  $\mu_{smax} = 0,6$ ); 2) лед со снегом (с коэффициентом взаимодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании  $\mu_{smax} = 0,3$ ); 3) сухой лед (с коэффициентом вза-

имодействия движителя с опорным основанием при полном буксовании  $\mu_{smax} = 0,1$ ); 4) микст.

Моделировалось выполнение маневров «поворот» и «переставка». Все колеса автомобиля управляемые. При моделировании использован закон управления поворотом колес, описанный в работах [10, 11].

Движение МКМ моделировалось при постоянных управляющих воздействиях на педаль подачи топлива со стороны водителя:  $h = 0,5$  (на грунтовом основании) и  $h = 0,3$  (лед со снегом,

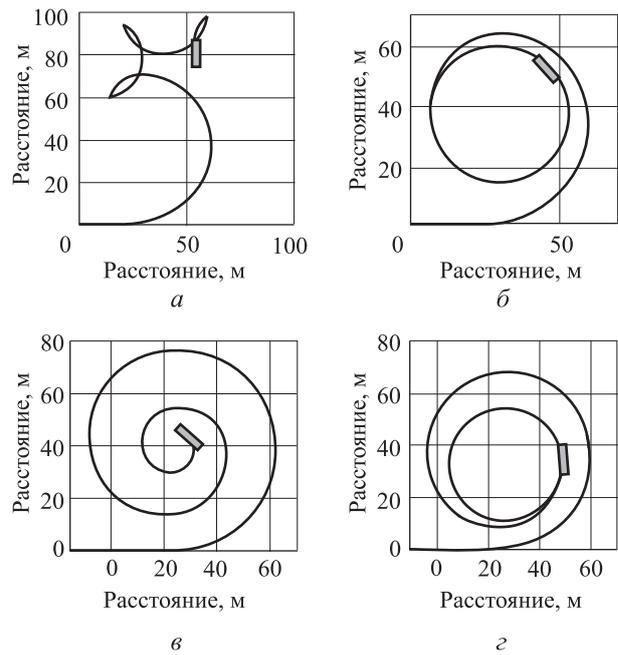


Рис. 4. Траектории движения МКМ при совершении маневра «поворот» при различных сочетаниях алгоритмов стабилизации (лед со снегом): а — без управления; б — LP; в — S; з — LP + S

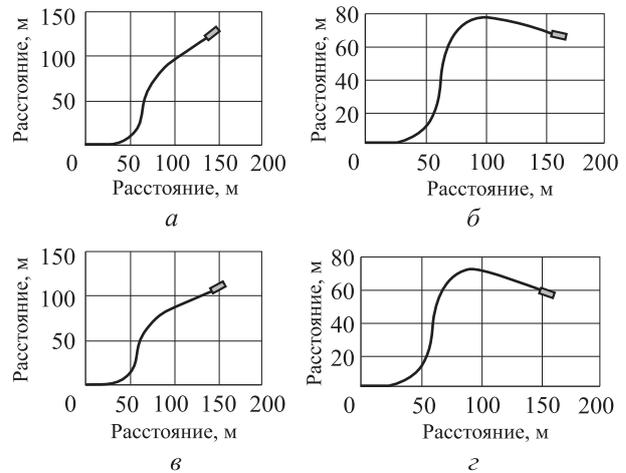


Рис. 5. Траектории движения МКМ при совершении маневра «переставка» при различных сочетаниях алгоритмов стабилизации (лед со снегом): а — без управления; б — LP; в — S; з — LP + S

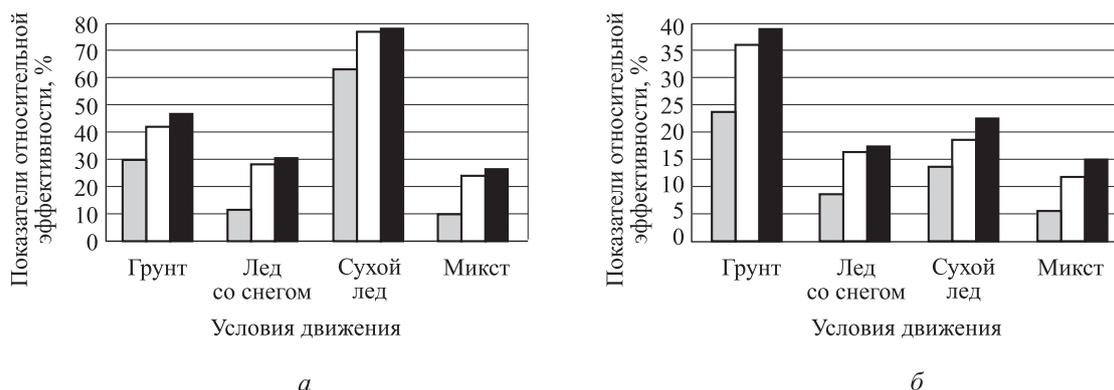


Рис. 6. Значения показателей относительной эффективности алгоритмов стабилизации для различных условий движения: а — маневр «поворот»; б — маневр «переставка»; ■ — S; □ — LP; ■ — LP + S

сухой лед и микст); угол поворота рулевого колеса изменялся от нуля до максимального значения в течение 1 с и далее оставался неизменным (что соответствует радиусу поворота 21 м).

Описание алгоритма «Снижение потребляемой мощности двигателя» приведено в работе [9].

**Результаты моделирования.** Для примера на рис. 4 представлены траектории движения МКМ для маневра «поворот» при различных сочетаниях алгоритмов стабилизации на опорном основании сухой лед, а на рис. 5 — для маневра «переставка».

Согласно предложенным в [12] критериям оценки эффективности работы СДС курсовой и траекторной устойчивости было проведено исследование относительной эффективности каждого из разработанных алгоритмов стабилизации. Значения показателей относительной эффективности алгоритмов стабилизации для различных условий движения приведены на рис. 6.

Анализ рис. 6 показывает, что для МКМ с электромеханической трансмиссией, выполненной по схеме «мотор–ось», применение корректирующего изменения угла поворота

управляемых колес в качестве стабилизирующего воздействия наиболее эффективно в сочетании с алгоритмом снижения потребляемой мощности силовой установки. В этом случае обеспечивается снижение среднеквадратических значений угла  $\beta$  на 15...79 %.

## Выводы

1. Разработан алгоритм корректирующего изменения угла поворота управляемых колес (подруливания) для МКМ, обеспечивающий повышение курсовой и траекторной устойчивости машины.

2. Методами имитационного моделирования установлено, что для МКМ с электромеханической трансмиссией, выполненной по схеме «мотор–ось», применение корректирующего изменения угла поворота управляемых колес в качестве стабилизирующего воздействия наиболее эффективно в сочетании с алгоритмом снижения потребляемой мощности силовой установки. При этом обеспечивается повышение эффективности работы системы стабилизации движения машины на 15...79 %.

## Литература

- [1] Рязанцев В.И. *Активное управление сходимением колес автомобиля*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 212 с.
- [2] Karogal I., Ayalew B. Independent Torque Distribution Strategies for Vehicle Stability Control. *SAE Technical Papers*, 2009. Doi: 10.4271/2009-01-0456.
- [3] Osborn R., Shim T. Independent Control of All-Wheel-Drive Torque Distribution. *SAE Technical Paper*, 2004-01-2052, 2004. Doi: 10.4271/2004-01-2052.
- [4] Mammari S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [5] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system*. Master's degree project. Sweden, 2004. URL: [http://people.kth.se/~kallej/grad\\_students/rodrigues\\_orozco\\_thesis04.pdf](http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodrigues_orozco_thesis04.pdf) (дата обращения 1 сентября 2014).

- [6] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, vol. 216 (2), pp. 115–124.
- [7] Белоусов Б.Н., Попов С.Д. *Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.
- [8] Ryu J., Gerdes J.C. Estimation of vehicle roll and road bank angle. *American Control Conference*, 2004, vol. 3, pp. 2110–2115.
- [9] Жилейкин М.М., Середюк В.А. Разработка закона распределения моментов по колесам многоосной колесной машины с электро-механической трансмиссией, выполненной по схеме «мотор–ось». *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 5. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/567714.html>, doi: 10.7463/0514.0705516 (дата обращения 1 сентября 2014).
- [10] Горелов В.А., Котиев Г.О., Тропин С.Л. «Веерный» закон для всеколесного рулевого управления многоосных колесных транспортных средств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 2, с. 102–116.
- [11] Горелов В.А., Масленников Л.А., Тропин С.Л. Прогнозирование характеристик криволинейного движения многоосной колесной машины при различных законах всеколесного рулевого управления. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 05. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/403845.html>. Doi: 10.7463/0512.0403845 (дата обращения 1 сентября 2014).
- [12] Жилейкин М.М., Чулюкин А.О. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для автомобиля 4×4 с подключаемой задней осью. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 4. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704685.html>. Doi: 10.7463/0414.0704685 (дата обращения 20 августа 2014).

## References

- [1] Riazantsev V.I. *Aktivnoe upravlenie skhozheniem koles avtomobilia* [Active control of the vehicle wheel alignment]. Moscow, Bauman Press, 2007. 212 p.
- [2] Karogal I., Ayalew B. Independent Torque Distribution Strategies for Vehicle Stability Control. *SAE Technical Papers*, 2009. Doi: 10.4271/2009-01-0456.
- [3] Osborn R., Shim T., Independent Control of All-Wheel-Drive Torque Distribution. *SAE Technical Paper*, 2004-01-2052, 2004. Doi: 10.4271/2004-01-2052.
- [4] Mammari S., Baghdassarian V.B. Two-degree-of-freedom formulation of vehicle handling improvement by active steering. *Proceedings of the American Control Conference*, 2000, vol. 1, pp. 105–109.
- [5] Rodrigues A.O. *Evaluation of an active steering system*. Master's degree project. Sweden, 2004. Available at: [http://people.kth.se/~kallej/grad\\_students/rodriguez\\_orozco\\_thesis04.pdf](http://people.kth.se/~kallej/grad_students/rodriguez_orozco_thesis04.pdf) (accessed 1 September 2014).
- [6] Mokhiamar O., Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety. *Journal of Automobile Engineering*, 2002, vol. 216 (2), pp. 115–124.
- [7] Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoi gruzopod'emnosti. Konstruktsiia. Teoriia. Raschet* [Wheeled vehicles especially big load capacity. Design. Theory. Payment]. Moscow, Bauman Press, 2006. 728 p.
- [8] Ryu J., Gerdes J.C. Estimation of vehicle roll and road bank angle. *American Control Conference*, 2004, vol. 3, pp. 2110–2115.
- [9] Zhileikin M.M., Serediuk V.A. Razrabotka zakona raspredeleniia momentov po kolesam mnogoosnoi kolesnoi mashiny s elektro-mekhanicheskoi transmissiei, vypolnennoi po skheme «motor–os'» [A Development of the Distributive Law of Points on the Multi-Wheeled Machine Wheels with Electro-Mechanical Transmission, Made Under the Scheme «Motor–Axis»]. *Nauka i obrazovanie. MGTU imeni N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman Moscow State Technical University]. 2014, no. 5. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/705516.html> (accessed 1 September 2014). Doi: 10.7463/0514.0705516.

- [10] Gorelov V.A., Kotiev G.O., Tropin S.L. «Veernyi» zakon dlia vsekolesnogo rulevogo upravleniia mnogoosnykh kolesnykh transportnykh sredstv [Control Law of All-Wheel Steering for Multiaxis Wheeled Vehicles]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2012, no. 2, pp. 102–116.
- [11] Gorelov V.A., Maslennikov L.A., Tropin S.L. Prognozirovaniie kharakteristik krivolineinogo dvizheniia mnogoosnoi kolesnoi mashiny pri razlichnykh zakonakh vsekolesnogo rulevogo upravleniia [Forecasting performance of curvilinear motion in multi wheeled vehicles for different all-wheel steering laws]. *Nauka i obrazovanie. MGTU imeni N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman Moscow State Technical University]. 2012, no. 5. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/403845.html> (accessed 1 September 2014). Doi: 10.7463/0512.0403845.
- [12] Zhileikin M.M., Chuliukin A.O. Algoritm raboty sistemy dinamicheskoi stabilizatsii dlia avtomobilia 4×4 s podkliuchaemoi zadnei os'iu [Algorithm of Dynamic Stabilization System for a Car 4×4 with a Link Rear Axle]. *Nauka i obrazovanie. MGTU imeni N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman Moscow State Technical University]. 2014, no. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/704685.html> (accessed 20 August 2014). Doi: 10.7463/0414.0704685.

Статья поступила в редакцию 18.09.2014

## Информация об авторах

**ЖИЛЕЙКИН Михаил Михайлович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [jileykin\\_m@mail.ru](mailto:jileykin_m@mail.ru)).

**СЕРЕДЮК Валентин Анатольевич** (Набережные Челны) — главный специалист ОАО «КАМАЗ» (423827, Набережные Челны, республика Татарстан, Российская Федерация, Автозаводский пр., д. 2, e-mail: [seredyuk\\_kmz@mail.ru](mailto:seredyuk_kmz@mail.ru)).

## Information about the authors

**ZHILEYKIN Mikhail Mikhaylovich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Wheeled Vehicles» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: [jileykin\\_m@mail.ru](mailto:jileykin_m@mail.ru)).

**SEREDYUK Valentin Anatol'evich** (Naberezhnye Chelny) — Chief Specialist of OJSC «KAMAZ» (Avtozavodskiy prosp., 2, 423827, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation, e-mail: [seredyuk\\_kmz@mail.ru](mailto:seredyuk_kmz@mail.ru)).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие  
**А.Г. Колесникова, Р.А. Яковлева, А.А. Мальцева**

### «Технологическое оборудование прокатного производства»

Рассмотрено основное и вспомогательное оборудование широко распространенных на производстве типов прокатных станов. Наиболее полно раскрыты вопросы конструирования и расчета рабочих клеток прокатных станов и их приводов. Приведены основные этапы динамического расчета деталей привода прокатного стана и вероятностная оценка их долговечности.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru); [www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)