

УДК 629.113

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ САМОБЛОКИРУЮЩИХСЯ МЕЖКОЛЁСНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛОВ (МКД) ПРИ КРУГОВОМ ДВИЖЕНИИ АТС (4 x 4) ДЛЯ НЕОДИНАКОВЫХ УСЛОВИЙ КАЧЕНИЯ И СЦЕПЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ И НАРУЖНЫХ КОЛЁС НА ДЕФОРМИРУЕМОЙ ГРУНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Е. В. Габай, к. т. н.

В статье изложены результаты компьютерного моделирования кругового движения полноприводного АТС по деформируемой грунтовой поверхности при различном соотношении коэффициентов сцепления и сопротивления качению внутренних и наружных колёс. Рассмотрены варианты самоблокирующихся МКД с постоянным и переменным коэффициентами блокировки. Компьютерное моделирование выполнено на основе математической модели, разработанной автором и представленной в [1]. Задачей исследования является поиск наиболее рационального варианта МКД, обеспечивающего эффективность и экономичность системы управления поворотом АТС в различных условиях и режимах непрямолинейного движения. Цель исследования — сравнение эффективности системы управления поворотом АТС в условиях непрямолинейного внедорожного движения при постоянном и переменном (в случае квадратичной зависимости блокирующего момента от частоты вращения колёс) коэффициентах блокировки самоблокирующегося МКД.

В качестве прототипа для исследования было выбрано АТС (4 x 4) повышенной проходимости со следующими параметрами:

- эксплуатационная масса (в погруженном состоянии) — 3 000 кг;
- одинаковая (по 1 500 кг) статическая весовая нагрузка передней и задней осей колёс;
- колёсная база — 2,8 м, ширина колеи колёс — 1,8 м;
- статический радиус колёс — 0,48 м;
- вертикальная координата центра масс относительно опорной поверхности — 0,96 м;
- максимальный угол поворота отстающего переднего колеса — 45°;
- шины пониженного давления с малым коэффициентом насыщенности протектора и вездеходными грунтозацепами, подвеска колёс — упругая и независимая, ступицы колёс снабжены механизмом автоматического отключения привода при изменении знака крутящего момента;
- лобовая площадь — 3,65 м², коэффициент аэродинамического сопротивления — 0,5.

Рассматривали идентичные для передних и задних колёс самоблокирующиеся МКД: чувствительные к моменту с постоянными коэффициентами блокировки $K_{от} = 5$ — вариант I, $K_{от} = 3$ — вариант II и чувствительные к разности частоты вращения колёс с квадратичной зависимостью $\Delta M = C \times \Delta\omega^2$ блокирующего момента от разности частоты вращения колёс при следующих значениях коэффициента C : вариант III — $C = 0,589$, вариант IV — $C = 0,294$, вариант V — $C = 0,147$ и вариант VI — $C = 0,049$ (кН·м × с²/рад²). В качестве прототипа механизма самоблокировки для моделирования этих МКД приняли электромагнитную фрикционную муфту с электронной системой управления. Подобные муфты используются, например, в межосевом дифференциале Subaru Impreza WRX STi (система DCCD). При наличии датчиков крутящего момента и частоты вращения колёс можно реализовать требуемую характеристику самоблокировки МКД $\Delta M = C \times \Delta\omega^2$ с различной величиной коэффициента C , который можно рассматривать как коэффициент жёсткости самоблокировки.

В качестве межосевого дифференциала (МОД) рассматривали самоблокирующийся дифференциал, аналогичный варианту III с коэффициентом $C = 0,589$.

Варианты МКД I и II рассматривались с учётом наличия в ступицах колёс муфт свободного хода.

Круговое движение АТС моделировали для трёх вариантов соотношения условий качения и сцепления внутренних и наружных колёс: лучшие условия у внутренних колёс (варианты А), лучшие условия у наружных колёс (варианты Б) и одинаковые условия для этих колёс (варианты В). Для лучших условий коэффициент сцепления $[\varphi]$ составлял 0,45, 0,55 и 0,65, для одинаковых условий — 0,45, 0,4 и 0,35, а для худших — 0,35. Таким образом, рассмотрено девять вариантов условий движения. Значения коэффициентов сцепления и сопротивления качению для этих вариантов приведены в табл. 1. Средняя величина коэффициентов сопротивления качению 0,165 одинакова для вариантов 1А... 3А, 1Б... 3Б, 2В, что предопределяло при одинаковых режимах

движения примерно одинаковую тяговую нагрузку АТС. Для увеличения тяговой нагрузки АТС указанные значения коэффициентов сопротивления качению для всех вариантов были увеличены за счёт дополнительного введения небольшого (0,03) угла подъёма поверхности качения.

Варьировали относительную величину кривизны траектории движения полюса O_0 поворота Q , равную V_0/R_0 [1] и условно принятую в качестве задаваемой водителем траектории движения АТС. Минимальная скорость кругового движения задавалась исходя из минимального относительного значения проекции центростремительного ускорения на поперечную координатную ось Y [1] $j_c = 0,02$. Максимальное значение скорости соответствовало $j_c = 0,16 \dots 0,24$ и ограничивалось либо углом бокового увода внутреннего переднего колеса, либо буксованием наиболее нагруженного колеса.

Фиксировали свыше пятидесяти параметров. Для сравнительной оценки исследуемых вариантов МКД определяли показатели статической и динамической поворотливости, экономичности и запаса сцепления: минимальный радиус поворота R_0 , относительную величину угловой скорости поворота $\delta\Omega$, относительную величину суммарных потерь в дифференциалах и на буксование энергии δN_z , абсолютную величину этих потерь δA_z при развороте АТС на 180° с минимальным радиусом, относительную величину буксования колеса с наименьшим запасом сцепления $\varepsilon_{\delta_{max}}$ и относительную величину потерь на буксование δN_δ .

Неодинаковые условия сцепления и качения внутренних и наружных колёс при круговом движении АТС существенно увеличивают величину результирующего момента $M_{СП}$ от разницы проекций реакций сил в контакте колёс с поверхностью качения на продольную координатную ось X [1], который оказывает на АТС отклоняющее воздействие. В дальнейшем этот момент будем называть моментом сопротивления повороту. Если в лучших условиях движутся внутренние колёса, то $M_{СП} > 0$ препятствует повороту АТС, если в лучших условиях находятся наружные колёса, то $M_{СП} < 0$ способствует повороту АТС. Для каждого заданного режима и заданных условий кругового движения АТС величина $M_{СП}$ зависит от характеристик исследуемых вариантов МКД. В свою очередь, от величины и знака этого момента зависят перераспределение сил сопротивления боковому уводу, величина углов бокового увода передних и задних колёс, положение полюса поворота относительно осей колёс, распределение тяговой нагрузки между внутренними и наружными колёсами и величина указанных выше оценочных показателей эффективности МКД.

Таблица 1. Варианты условий кругового движения АТС

Условия	№ вар.	1	2	3
А	$[\varphi]_в$	0,65	0,55	0,45
	$[\varphi]_н$	0,35	0,35	0,35
	$f_в$	0,07	0,11	0,15
Б	$f_н$	0,26	0,22	0,18
	$[\varphi]_в$	0,35	0,35	0,35
	$[\varphi]_н$	0,65	0,55	0,45
В	$f_в$	0,26	0,22	0,18
	$f_н$	0,07	0,11	0,15
	$[\varphi]_в$	0,35	0,4	0,45
Б	$[\varphi]_н$	0,35	0,4	0,45
	$f_в$	0,22	0,165	0,15
	$f_н$	0,22	0,165	0,15

Как следует из уравнения баланса моментов $\Sigma M_c = 0$ (3), с учётом исключения стабилизирующих моментов колёс [1], момент сопротивления повороту $M_{СП}$ состоит из трёх составляющих: $M_{\Delta f}$ — момента от разности сил сопротивления качению соответствующих наружных и внутренних колёс, $M_{\Delta\phi}$ — момента от разности касательных сил тяги соответствующих внутренних и наружных колёс, $M_{\Delta\theta}$ — момента от разности проекций сил сопротивления боковому уводу передних колёс на ось X .

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимости $M_{СП}$ и его составляющих от заданной относительной кривизны круговой траектории движения Q для вариантов условий движения 2А и 2Б, изменяющейся в диапазоне $0 \dots 0,06$ ($R_0 = 30$ м) при заданной окружной скорости кругового движения АТС $V = 7$ м/с (25,2 км/ч), при которой исключались запредельные значения буксования и углов бокового увода внутренних колёс.

Как следует из рис. 1, величина $M_{\Delta f}$ линейно возрастает с увеличением Q . Это вызвано тем, что в этом случае увеличиваются центростремительное ускорение, центробежная сила и перераспределение весовой нагрузки между внутренними и наружными колёсами (наружные колёса догружаются, внутренние — разгружаются). Это перераспределение вызывает соответствующее перераспределение величин сил сопротивления качению указанных колёс. В случае худших условий качения (2А) наружных колёс абсолютная величина $M_{\Delta f}$ возрастает, а в случае лучших условий (2Б) их качения — снижается. Соответственно, в первом случае суммарный крутящий момент колёс, характеризующий тяговую нагрузку АТС, несколько возрастает, а во втором случае — несколько снижается. Для исследуемых вариантов МКД графики $M_{\Delta f}$ практически совпадают.

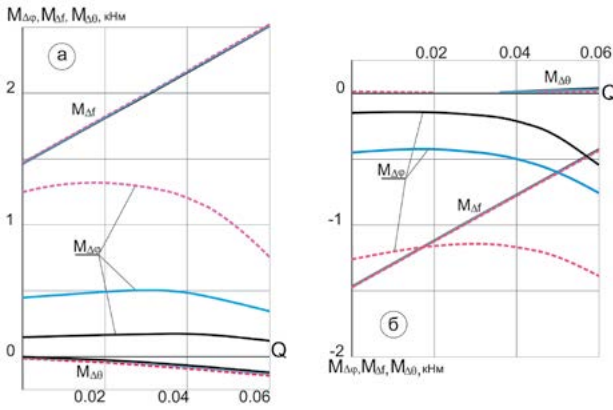


Рисунок 1. Графики зависимостей составляющих момента сопротивления повороту АТС от относительной кривизны Q траектории кругового движения при $V = 7$ м/с: а) вариант условий движения 2А; б) вариант условий движения 2Б

- Варианты МКД I ($K_{от} = 5$) и II ($K_{от} = 3$) в режиме полной блокировки
- Вариант МКД IV ($C = 0,294$)
- Вариант МКД VI ($C = 0,049$)

Разность касательных сил тяги внутренних и наружных колёс для каждого исследуемого варианта МКД формируется за счёт совместного воздействия трёх факторов: заданной разницы коэффициентов сцепления, перераспределения весовой нагрузки между внутренними и наружными колёсами, кинематического рассогласования наружных и внутренних колёс. Последние два фактора определяются задаваемыми параметрами режима кругового движения АТС: относительной кривизной Q (или расчётным радиусом R_0) траектории движения и окружной скоростью V кругового движения АТС.

Перераспределение весовой нагрузки ΔG между внутренними и наружными колёсами, как следует из [1], определяется суммой ΔG_j , пропорциональной поперечной составляющей центростремительного ускорения j_c , и ΔG_r , зависимой от угла поворота колёс. При этом наибольшую значимость имеет величина ΔG_j , которая пропорциональна произведению $V^2 \times Q$. Это перераспределение вызывает увеличение относительной касательной силы тяги φ_x и буксования внутренних колёс и уменьшение указанных параметров наружных колёс. Вследствие принятой в [2] экспоненциальной зависимости φ_x от буксования интенсивность увеличения разности буксования соответствующих внутренних и наружных колёс по мере увеличения ΔG возрастает.

Для передней оси колёс абсолютная величина кинематического рассогласования определяется из выражения.

$$\Delta\omega_{КА} = V \times Q \times (R_3 - R_1) / (B_0 \times r), \quad (1)$$

где R_3 и R_1 — радиусы круговых траекторий движения переднего наружного и внутреннего колёс; B_0 — ширина колеи колёс; r — радиус качения, принятый одинаковым для всех колёс.

Если принять $\cos \theta \approx \cos \theta_1 \approx \cos \theta_3$, то приближенное выражение $\Delta\omega_{КА}$ имеет вид:

$$\Delta\omega_{КА} \approx V \times Q / (B_0 \times r \times \cos \theta). \quad (2)$$

Для задней оси колёс:

$$\Delta\omega_{КВ} = V \times Q / r. \quad (3)$$

Таким образом, для любой оси колёс кинематическое рассогласование внутреннего и наружного колёс пропорционально произведению $V \times Q$.

В режиме полной блокировки МКД (варианты I и II) кинематическое рассогласование компенсируется только за счёт разницы буксования $\Delta\omega_{\delta_A}$ передних и $\Delta\omega_{\delta_B}$ задних колёс:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{КА} &= \Delta\omega_{\delta_A} = \omega_A \times (\delta_1 - \delta_3) \\ \text{и } \Delta\omega_{КВ} &= \Delta\omega_{\delta_B} = \omega_B \times (\delta_2 - \delta_4). \end{aligned} \quad (4)$$

С увеличением Q , $\Delta\omega_{КА}$ и $\Delta\omega_{КВ}$ от начальных нулевых значений при прямолинейном движении разница буксования $(\delta_1 - \delta_3)$ передних и $(\delta_2 - \delta_4)$ задних колёс пропорционально увеличивается, вызывая увеличение крутящих моментов внутренних и снижение крутящих моментов наружных колёс. По мере увеличения Q интенсивность увеличения этой разности снижается из-за упомянутой выше экспоненциальной зависимости относительной касательной силы тяги от буксования. В то же время из-за увеличения перераспределения ΔG весовой нагрузки между внутренними и наружными колёсами блокирующие моменты передних и задних колёс начинают прогрессивно снижаться. Это объясняет наличие точек максимума на графиках зависимости $M_{\Delta\varphi}$ от Q для вариантов I и II на рис. 1. Аналогичные графики построены для вариантов МКД IV и VI. В условиях движения 2А более нагружены внутренние колёса и величина $M_{\Delta\varphi} > 0$, в условиях движения 2Б более нагружены наружные колёса, а величина $M_{\Delta\varphi} < 0$.

В дифференциальном режиме МКД (в рассматриваемом диапазоне изменения Q этот режим имеет место только у вариантов IV и VI) кинематическое рассогласование компенсируется также за счёт составляющих $\Delta\omega_{DA}$ и $\Delta\omega_{DB}$, пропорциональных дифференциальным изменениям $\Delta\omega_A$ частоты вращения передних и $\Delta\omega_B$ частоты вращения задних колёс:

$$\Delta\omega_{КА} = \Delta\omega_{\delta_A} + \Delta\omega_{DA} \text{ и } \Delta\omega_{КВ} = \Delta\omega_{\delta_B} + \Delta\omega_{DB}, \quad (5)$$

где величины $\Delta\omega_{DA}$ и $\Delta\omega_{DB}$ составляют:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{DA} &= \Delta\omega_A \times [1 - 0,5 \times (\delta_1 + \delta_3)], \\ \Delta\omega_{DB} &= \Delta\omega_B \times [1 - 0,5 \times (\delta_2 + \delta_4)]. \end{aligned} \quad (6)$$

При прямолинейном движении в этом режиме МКД и неравенстве крутящих моментов на соответствующих внутренних и наружных колёсах $\Delta\omega_{DA0} = -\Delta\omega_{\delta_{A0}}$, $\Delta\omega_{DB0} = -\Delta\omega_{\delta_{B0}}$ (для условий 2А) и $-\Delta\omega_{DA0} = \Delta\omega_{\delta_{A0}}$, $-\Delta\omega_{DB0} = \Delta\omega_{\delta_{B0}}$ (для условий 2Б), что обеспечивает равенство фактической скорости движения указанных колёс.

В первом случае (2А) с увеличением Q , $\Delta\omega_{КА}$ и $\Delta\omega_{КВ}$ от начального нулевого значения и перераспределения ΔG весовой нагрузки колёс величина буксования наружных колёс снижается, а внутренних — возрастает, а абсолютные величины $\Delta\omega_{ДА0}$, $\Delta\omega_{\delta А0}$, $\Delta\omega_{ДВ0}$ и $\Delta\omega_{\delta В0}$ снижаются, а при больших значениях Q составляющие $\Delta\omega_{\delta А0}$ и $\Delta\omega_{\delta В0}$ меняют знак. При этом интенсивность снижения $\Delta\omega_{ДА0}$, $\Delta\omega_{ДВ0}$, $\Delta\omega_A$ и $\Delta\omega_B$ и увеличения положительных значений $\Delta\omega_{\delta А0}$ и $\Delta\omega_{\delta В0}$ возрастает. Как и в режиме полной блокировки, блокирующие моменты несколько возрастают, достигают максимума, а затем снижаются. Благодаря малым коэффициентам блокировки, величина которых ограничена коэффициентом C жёсткости самоблокировки у МКД IV и VI, в несколько раз снижается максимальная величина $M_{\Delta\varphi}$ в сравнении с режимом полной блокировки (рис. 1а) вариантов МКД I и II.

Во втором случае (2Б) частота вращения внутренних колёс превышает частоту соответствующих наружных колёс. Абсолютные величины $\Delta\omega_{\delta А0}$, $\Delta\omega_{\delta В0}$, $\Delta\omega_{ДА0}$ и $\Delta\omega_{ДВ0}$ при $Q = 0$ минимальны и равны начальным значениям этих составляющих для рассмотренного выше варианта (2А) условий движения. В дифференциальном режиме и режиме полной блокировки МКД более нагруженными являются наружные колёса и величина $M_{\Delta\varphi} < 0$. По мере увеличения Q и перераспределения ΔG весовой нагрузки абсолютные значения всех указанных составляющих возрастают. При этом диапазон дифференциального изменения частоты вращения передних и задних колёс и коэффициентов блокировки вариантов МКД IV и VI увеличивается. Это вызывает более резкое снижение отрицательных значений $M_{\Delta\varphi}$ при $Q = 0,04 \dots 0,06$ в сравнении с рассмотренным ранее вариантом (2А) условий движения.

Третья составляющая $M_{\Delta\theta}$ момента сопротивления повороту определяется [1] из выражения:

$$M_{\Delta\theta} = 0,5 \times B_0 \times (P_{\delta 3} \times \sin \theta_3 - P_{\delta 1} \times \sin \theta_1), \quad (7)$$

где $P_{\delta 3}$ и $P_{\delta 1}$ — силы сопротивления боковому уводу передних колёс; θ_3 и θ_1 — углы поворота передних колёс.

С учётом $\theta_3 < \theta_1$ и $P_{\delta 3} > P_{\delta 1}$ при худших условиях (2Б) движения внутренних колёс величиной $M_{\Delta\theta}$ можно пренебречь. В худших условиях (2А) движения (рис. 1а) наружных колёс $M_{\Delta\theta} < 0$, причём более или менее существенное значение этого момента имеет место при $Q > 0,04$ ($R_0 < 45$ м). Как следует из рис. 3а, б, в, где представлены графики зависимости расчётного угла θ поворота передних колёс от Q для вариантов 2А, 2Б и 2В условий движения, $Q = 0,04$ для варианта условий 2А соответствует примерно $\theta = 8^\circ$. Графики зависимости $M_{\Delta\theta}$ на рис. 1а для трёх представленных вариантов МКД практически идентичны.

Наиболее значимой составляющей момента $M_{СП}$ сопротивления повороту для условий 2А движения является момент $M_{\Delta f}$ от разности сил сопротивления качению наружных и внутренних колёс, который линейно возрастает с увеличением Q . Для вариантов МКД IV и VI это обеспечивает соответствующее увеличение $M_{СП}$ (рис. 2), а для вариантов МКД I и II в режиме полной блокировки из-за более резкого снижения момента $M_{\Delta\varphi}$ при $Q > 0,04$ график зависимости $M_{СП}$ после достижения максимума при $Q = 0,04$ плавно снижается. При этом увеличение $M_{СП}$ в сравнении с вариантами IV и VI составляет от 1,15 (вариант IV) и 1,25 (вариант VI) при $Q = 0,06$ до 1,42 (вариант IV) и 1,69 (вариант VI) при $Q = 0$.

Для условий движения 2Б наиболее значимой составляющей момента $M_{СП}$ является момент $M_{\Delta\varphi}$ от разности касательных сил тяги внутренних и наружных колёс. Это вызвано указанным выше снижением абсолютной величины моментов $M_{\Delta f}$. Поэтому при увеличении Q абсолютная величина отрицательного $M_{СП}$ снижается. Увеличение абсолютных значений $M_{СП}$ для этих условий движения при вариантах I и II в сравнении с вариантами МКД IV и VI составляет от 1,42 (вариант IV) и 1,69 (вариант VI) при $Q = 0$ до 1,56 (вариант IV) и 2,31 (вариант VI) при $Q = 0,06$.

Для условий 2В момент $M_{\Delta f}$ исключается, а величина $M_{\Delta\varphi}$ изменяется в более узких пределах. При увеличении окружной скорости V кругового движения до 5... 8 м/с (для $Q < 0,12$) блокирующие моменты (сначала переднего, а затем и заднего МКД) и момент $M_{\Delta\varphi}$ вследствие перераспределения весовой нагрузки ΔG меняют знак, более нагруженными становятся наружные колёса, как это имеет место и для условий 2Б.

Для сравнительного анализа исследуемых вариантов МКД определяли зависимость оценочных пока-

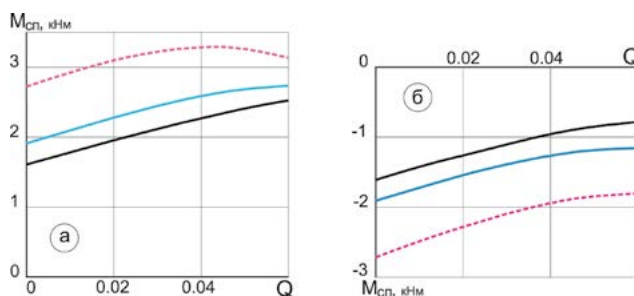


Рисунок 2. Графики зависимости момента сопротивления МСП повороту АТС от относительной кривизны Q круговой траектории движения при $V = 7$ м/с: а) вариант условий движения 2А; б) вариант условий движения 2Б

- Варианты МКД I ($K_{\delta 1} = 5$) и II ($K_{\delta 1} = 3$) в режиме полной блокировки
- Вариант МКД IV ($C = 0,294$)
- Вариант МКД VI ($C = 0,049$)

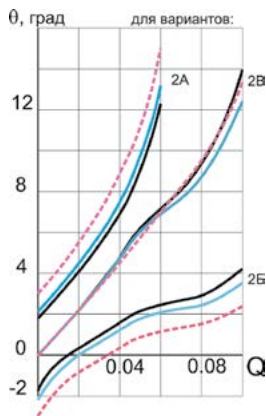


Рисунок 3. Графики зависимости расчётной величины угла θ поворота передних колёс от относительной кривизны Q траектории кругового движения АТС для вариантов условий движения 2А, 2Б и 2В при $V = 7$ м/с

- Варианты МКД I ($K_{от} = 5$) и II ($K_{от} = 3$) в режиме полной блокировки
- Вариант МКД IV ($C = 0,294$)
- Вариант МКД VI ($C = 0,049$)

зателей от величины окружной скорости V кругового движения АТС. Нижеследующий анализ проведён для трёх наиболее характерных вариантов 2А, 2Б и 2В условий кругового движения АТС и четырёх вариантов МКД — I, II, IV и VI.

Показатель статической поворотливости оценивали расчётной величиной минимального радиуса поворота R_{omin} при изменении V в диапазоне от 0,8–1,2 м/с (2,9–4,3 км/ч) до 2,8 м/с (10 км/ч). Величина R_{omin} ограничивалась либо предельной конструктивной величиной угла поворота $\theta_{imax} = 45^\circ$ внутреннего переднего колеса, либо предельно допустимыми значениями буксования 0,25 или угла бокового увода 14° этого колеса. На рис. 4а, б, в представлены графики зависимости R_{omin} от окружной скорости V кругового движения АТС. Для вариантов I и II точки излома графиков соответствуют переходу от режима полной блокировки переднего и заднего МКД к дифференциальному режиму либо только переднего МКД, либо переднего и заднего МКД.

В условиях 2Б и 2В варианты МКД IV и VI обеспечивают в сравнении с вариантами МКД I и II снижение R_{omin} в 1,4... 1,6 раза. При этом варианты МКД IV и VI в отношении к величине R_{omin} практически идентичны. В пределах $V = 2$ м/с (7,2 км/ч) они обеспечивают $R_{omin} < 4$ м (2Б) и $R_{omin} < 4,3$ м (2В). Для варианта I наименьшие значения в этих условиях $R_{omin} = 7$ м при $V = 1,2$ м/с, а для варианта II — $R_{omin} = 6$ м.

В условиях 2А (рис. 4а) разница в величине R_{omin} при $V < 2$ м/с между вариантами IV, VI и вариантом II в дифференциальном режиме одного или обоих МКД уменьшается. Как и в предыдущем случае, наименьшие значения R_{omin} обеспечивает вариант VI. Для этого варианта МКД график зависимости R_{omin} от V практически идентичен аналогичному графику для одинаковых условий (2В) движения внутренних и наружных колёс (рис. 4в), несмотря на разницу в величине $M_{СП}$.

Остальные оценочные показатели определяли при $V > 3$ м/с, при этом верхняя граница окружной скорости движения ограничивалась либо буксованием, либо величиной угла бокового увода передне-

го внутреннего колеса и составляла в зависимости от условий движения 9–10 м/с. Однако для вариантов условий 1Б... 3Б движения из-за отрицательных значений $M_{СП}$ предельная окружная скорость кругового движения АТС ограничена критическим значением $V_{кр}$, при превышении которого АТС приобретает избыточную поворачиваемость. При этом нарушаются устойчивость его кругового движения и управляемость. Известная из теории автомобиля формула для определения критической скорости основывается на плоской расчётной схеме автомобиля и для пространственной расчётной схемы в случае неодинаковых условий движения внутренних и наружных колёс непригодна. Поэтому для определения $V_{кр}$ использовали следующее условие:

$$d\theta/dV = 0, \quad (8)$$

которое соответствует максимальному значению θ на графиках зависимости расчётного угла θ поворота передних колёс от окружной скорости V для условий движения 1Б... 3Б, представленных на рис. 5а, б, в. Эти значения выделены на графиках точками. Графики построены для трёх значений относительной кривизны Q траектории движения — 0,036, 0,075 и 0,15, соответствующих значениям R_0 : 50, 24, 12 м. При $d\theta/dV > 0$ круговое движение АТС устойчиво, при $d\theta/dV < 0$ — неустойчиво.

Из рис. 5 следует, что варианты МКД I и II не обеспечивают устойчивого кругового движения при $Q = 0,036$ и $0,075$. При $Q = 0,15$ — $V_{кр} = 1,879$ м/с (6,76 км/ч) для условий 1Б и 2Б и $V_{кр} = 4,34$ м/с (15,62 км/ч) для условий 3Б. Отсюда следует, что при отрицательных значениях $M_{СП}$ и $Q < 0,15$ варианты I и II практически исключаются. Варианты IV и VI обеспечивают устойчивое круговое движение АТС, при этом с уменьшением разницы в величине коэффициентов сопротивления качению и сцепления внутренних и наружных колёс, а также с уменьшением коэффициента C жёсткости самоблокировки этого типа МКД значения $V_{кр}$ возрастают. Для условий 2Б и $Q = 0,036$ при снижении C с 0,294 до 0,049 величина $V_{кр}$ существенно возрастает — на 58 % (до 7 м/с), а для $Q = 0,075$ — на 22 % (до 6,14 м/с).

Продолжение в следующем номере

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Габай Е. В. Математическая модель кругового движения АТС (4 x 4) при неодинаковых условиях качения и сцепления внутренних и наружных колёс для различных самоблокирующихся межколёсных дифференциалов (МКД) // Журнал автомобильных инженеров. — 2015. — № 2 (91).
2. Габай Е. В. К вопросу выбора самоблокирующегося межколёсного дифференциала (МКД) для колёсного АТС повышенной проходимости // Журнал автомобильных инженеров. — 2013. — № 3 (80).

Таблица 2. Средние значения оценочных показателей для условий движения 2А

Q	0,036				0,075				0,15			
МКД	I	II	IV	VI	I	II	IV	VI	I	II	IV	VI
d_w	0,61	0,61	0,673	0,699	0,653	0,654	0,759	0,792	0,69	0,724	0,823	0,864
d_{NS}	0,103	0,103	0,101	0,1	0,112	0,112	0,101	0,096	0,149	0,147	0,107	0,097
$\varepsilon_{\delta max}$	0,511	0,511	0,467	0,491	0,59	0,59	0,452	0,466	0,76	0,725	0,447	0,44
d_{Nd}	0,102	0,102	0,097	0,098	0,111	0,111	0,093	0,093	0,144	0,13	0,091	0,09

Таблица 3. Средние значения оценочных показателей для условий движения 2В

Q	0,036				0,075				0,15			
МКД	I	II	IV	VI	I	II	IV	VI	I	II	IV	VI
d_w	0,709	0,709	0,716	0,702	0,71	0,71	0,775	0,784	0,71	0,71	0,817	0,841
d_{NS}	0,109	0,109	0,11	0,113	0,113	0,113	0,107	0,106	0,141	0,141	0,11	0,102
$\varepsilon_{\delta max}$	0,541	0,541	0,557	0,58	0,612	0,612	0,565	0,564	0,782	0,782	0,575	0,534
d_{Nd}	0,109	0,109	0,109	0,111	0,112	0,112	0,105	0,105	0,14	0,14	0,103	0,099

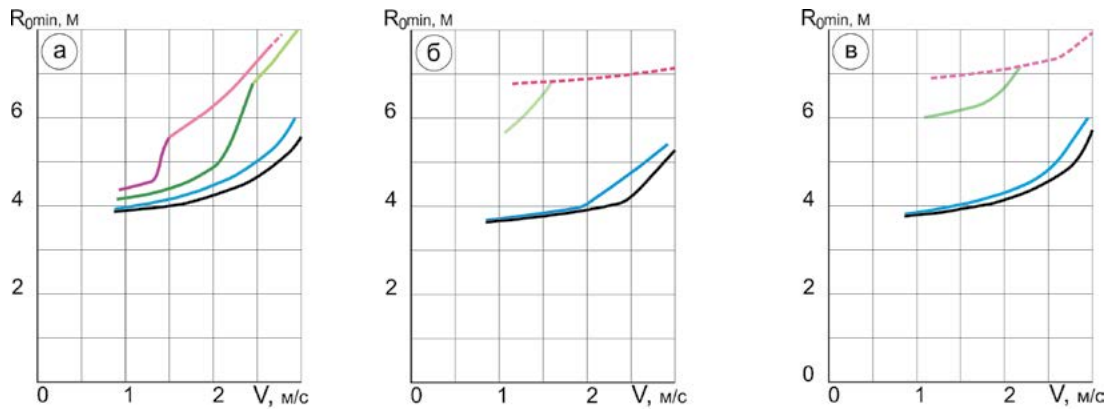


Рисунок 4. Графики зависимости минимального радиуса R_{min} траектории кругового движения АТС от окружной скорости V движения: а) вариант условий движения 2А; б) вариант условий движения 2Б; в) вариант условий движения 2В

- Варианты МКД I ($K_{on} = 5$) и II ($K_{on} = 3$) в режиме полной блокировки
- Варианты МКД I ($K_{on} = 5$) при полной блокировке только заднего МКД
- Варианты МКД I ($K_{on} = 5$) при дифференциальном режиме обоих МКД
- Варианты МКД II ($K_{on} = 3$) при полной блокировке только заднего МКД
- Варианты МКД II ($K_{on} = 3$) при дифференциальном режиме обоих МКД
- Варианты МКД IV ($C = 0,294$)
- Варианты МКД VI ($C = 0,049$)

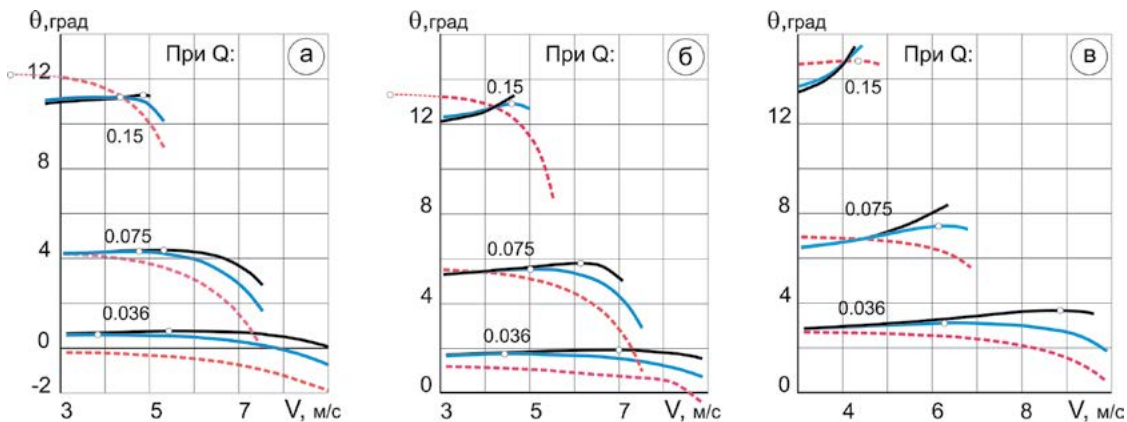


Рисунок 5. Графики зависимости расчётной величины угла θ поворота передних колёс от окружной скорости V кругового движения при отрицательных значениях момента сопротивления повороту АТС: а) вариант условий движения 1Б; б) вариант условий движения 2Б; в) вариант условий движения 3Б

- Варианты МКД I ($K_{on} = 5$) и II ($K_{on} = 3$) в режиме полной блокировки
- Варианты МКД IV ($C = 0,294$)
- Варианты МКД VI ($C = 0,049$)
- o — точки, соответствующие $V = V_{кр}$