

УДК 629.113

К ВОПРОСУ ВЫБОРА САМОБЛОКИРУЮЩЕГОСЯ МЕЖКОЛЁСНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА (МКД) ДЛЯ КОЛЁСНОГО АТС ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ

Е.В. Габай, к.т.н. / Государственный научно-исследовательский тракторный институт (НАТИ)

В первой части статьи, опубликованной в журнале № 2(79) 2013, допущены неточности, поэтому редакция публикует статью целиком.

При выборе типа самоблокирующегося МКД для АТС (4×4) необходимо учитывать возможность его эксплуатации во внедорожных условиях, которые, в отличие от дорожных, характеризуются большей кривизной траектории движения, более широким диапазоном изменения в процессе перемещения физико-механических свойств грунтовой поверхности, более низким уровнем и большей разницей коэффициентов сцепления отдельных колёс, более высокой их тяговой нагрузкой, более низкими скоростями движения и более высокими допустимыми значениями буксования и углов бокового увода колёс.

Основной проблемой при использовании в этих условиях АТС (4×4) является совмещение достаточной проходимости, обеспечиваемой за счёт блокировки межколёсных дифференциалов (МКД) ведущих осей, и поворачиваемости, которая может быть обеспечена их либо полной, либо частичной разблокировкой.

Решение этой проблемы путём дополнения МКД противобуксовочной системой на основе подтормаживания наиболее буксующих колёс с целью выравнивания буксования колёс ведущих осей для внедорожных условий неэкономично из-за непрерывной в этих условиях работы такой системы, поскольку теряемая при торможении энергия пропорциональна частоте вращения подтормаживаемого колеса. В то время как при дифференциальном режиме самоблокирующегося МКД потери энергии в МКД пропорциональны только разности частоты вращения колёс ведущей оси. По данным [1], такая система наиболее эффективна для неполноприводных АТС в условиях дорожного движения, когда она включается в работу эпизодически.

С целью обеспечения проходимости АТС в наиболее сложных условиях эксплуатации коэффициент блоки-

ровки самоблокирующихся МКД обычно задаётся с запасом, и это достаточно эффективно при движении с малыми углами поворота управляемых колёс. Однако при больших углах поворота, например на мягком грунте, при малом запасе сцепления отстающих (внутренних по отношению к мгновенному центру поворота) колёс для перехода от заблокированного к дифференциальному режиму МКД без тяговой перегрузки наиболее нагруженного отстающего колеса необходим, наоборот, уменьшенный коэффициент блокировки. А при завышенном коэффициенте этот переход, обеспечивающий поворот АТС с малыми радиусами, возможен только при большом запасе сцепления отстающих колёс.

В этом отношении интерес представляет другой режим самоблокировки МКД, обладающий внутренней автоматичностью, когда блокирующий момент $M_{\text{бл}}$ и коэффициент блокировки изменяются в широких пределах в зависимости от разности $\Delta\omega$ частоты вращения колёс. Примером подобного механизма самоблокировки является гидронасос, статор и ротор которого соединены с корпусом дифференциала и одной из полуосей [2], при этом частота их относительного вращения равна $0,5\Delta\omega$, а поток рабочей жидкости, перепускаемой через калиброванное отверстие под давлением из нагнетательной полости гидронасоса во всасывающую, пропорционален ей. Момент сопротивления взаимному вращению статора и ротора, пропорциональный давлению, является блокирующим моментом и пропорционален квадрату разности частоты вращения колёс:

$$M_{\text{бл}} = C \cdot (\Delta\omega)^2, \quad (1)$$

где C — коэффициент, пропорциональный квадрату коэффициента сопротивления дроссельного отверстия, определяющий крутизну характеристики — зависимости $M_{\text{бл}}(\Delta\omega)$ — этого механизма самоблокировки.

Подобный механизм самоблокировки (с той лишь разницей, что давление рабочей жидкости из нагнетательной полости гидронасоса передаётся в гидроцилиндр управления блокирующей фрикционной муфтой, создающей основную часть блокирующего момента) использован в самоблокирующемся МКД Vari-Lok (Gerodisc) на внедорожниках Grand Cherokee 'WJ' фирмы Chrysler. Аналогичный режим самоблокировки может быть также реализован блокирующей фрикционной муфтой с

электронной системой управления, которая позволяет смоделировать указанную выше характеристику (1).

Данная статья посвящена сравнительному анализу двух вышеуказанных режимов самоблокировки МКД в условиях криволинейного внедорожного (по грунту) движения АТС при различных и неодинаковых уровнях сцепления отстающих и забегающих (наружных по отношению к мгновенному центру поворота) колёс. Влияние сравниваемых режимов самоблокировки на поворачиваемость, проходимость и экономичность работы АТС можно оценить при анализе распределения крутящих моментов и буксования колёс одного из ведущих мостов при установившемся круговом движении АТС. Для оценки поворачиваемости наиболее просто использовать относительную величину разности крутящих моментов отстающего и забегающего колёс, влияющую на суммарный момент сопротивления повороту АТС; для оценки проходимости — предельную по буксованию наиболее нагруженного колеса величину относительной касательной силы тяги ведущего моста; для оценки экономичности — относительную величину суммарных потерь энергии в МКД и на буксование колёс ведущего моста.

Указанный сравнительный анализ режимов самоблокировки МКД был проведён для заднего ведущего моста АТС при круговом движении с разной кривизной траектории движения полюса поворота АТС при различных заданных значениях тяговой нагрузки ведущего моста и теоретической скорости движения АТС. Ввиду того, что задавалась фактическая кривизна круговой траектории без связи с углом поворота управляемых колёс, боковые реакции и углы бокового увода колёс не определялись. Сочетание коэффициентов сцепления отстающего и забегающего колёс варьировалось.

В качестве первого сравниваемого варианта рассматривали самоблокирующийся МКД с постоянными коэффициентами блокировки $K_{\text{от}} = 5$ и $K_{\text{за}} = 3$, в качестве второго — самоблокирующийся МКД с переменным коэффициентом блокировки и характеристикой (1) при относительной величине коэффициента крутизны характеристики $\varepsilon = C/(r \cdot F)$, равной $\varepsilon = 0,025$ (с/рад)² и $\varepsilon = 0,015$ (с/рад)², где F — средняя весовая нагрузка колеса ведущего моста, а r — радиус качения колёс. Величина F принята постоянной, а величина r — постоянной и одинаковой для обоих колёс. В последующем анализе первый вариант МКД будем обозначать МКД-I, второй — МКД-II. На рис. 1 представлена расчётная схема кругового движения заднего ведущего моста АТС. Это движение осуществляется вокруг центра O с радиусом траектории полюса поворота O_p , равным R_p , с угловой скоростью $\Omega = V/R_p$, где V — действительная скорость поступательного движения АТС вдоль оси координат X . Проекции абсолютных скоростей движения колёс (с учётом буксования и бокового увода) на ось X определяются из выражений $V_{\text{за}X} = \omega_{\text{за}} \cdot r \cdot (1 - \delta_{\text{за}})$ и $V_{\text{от}X} = \omega_{\text{от}} \cdot r \cdot (1 - \delta_{\text{от}})$

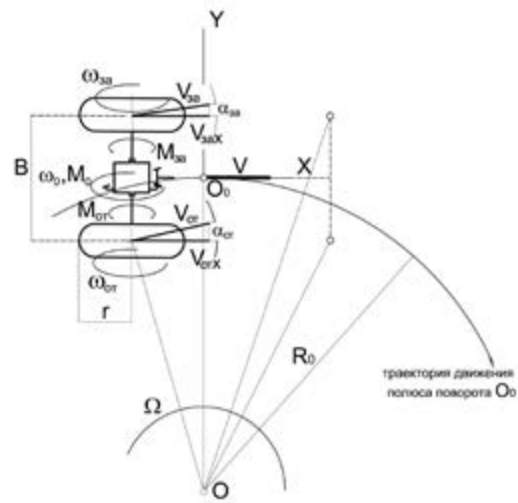


Рисунок 1. Расчётная схема кругового движения заднего ведущего моста АТС

$\cdot r \cdot (1 - \delta_{\text{от}})$, где $\delta_{\text{за}}$ и $\delta_{\text{от}}$ — буксование забегающего и отстающего колёс. Разность этих скоростей $\Delta V = V_{\text{за}X} - V_{\text{от}X}$ определяется формулой

$$\Delta V = V \cdot B/R_0 = V \cdot Q, \quad (2)$$

где B — ширина колеи колёс, Q — безразмерная величина кривизны круговой траектории, описываемой полюсом поворота.

Отношение крутящих моментов отстающего и забегающего колёс обозначим K_M . При круговом движении и меньшем коэффициенте сцепления отстающего колеса в сравнении с забегающим возможно $K_M < 1$. Поэтому условие режима синхронного вращения колёс $\omega_{\text{за}} = \omega_{\text{от}} = \omega_0$ у МКД-I с постоянным коэффициентом блокировки выражается неравенствами $1/K_{\text{от}} < K_M < K_{\text{за}}$. В этом случае кинематическую связь Q с буксованием забегающего и отстающего колёс с учётом выражения (2) можно представить следующей формулой:

$$\delta_{\text{от}} \cdot (1 + 0,5Q) - \delta_{\text{за}} \cdot (1 - 0,5Q) = Q. \quad (3)$$

При этом разность буксования колёс определяется из выражения

$$\Delta \delta = \delta_{\text{от}} - \delta_{\text{за}} = Q \cdot (1 - \delta_0), \quad (3a)$$

где $\delta_0 = 0,5 \cdot (\delta_{\text{от}} + \delta_{\text{за}})$ — средняя величина буксования колёс.

При $K_M = K_{\text{за}} (\omega_{\text{за}} > \omega_{\text{от}})$ или $K_M = 1/K_{\text{от}} (\omega_{\text{за}} < \omega_{\text{от}})$ МКД разблокирован. В этом случае частоты вращения отстающего и забегающего колёс неодинаковы и определяются из следующих выражений:

$$\omega_{\text{от}} = 2\omega_0 \cdot A_2 / (A_1 + A_2) \text{ и } \omega_{\text{за}} = 2\omega_0 \cdot A_1 / (A_1 + A_2), \quad (4)$$

где $A_1 = (1 - \delta_{\text{от}}) \cdot (1 + 0,5Q)$, $A_2 = (1 - \delta_{\text{за}}) \cdot (1 - 0,5Q)$.

При МКД-II и в дифференциальном режиме МКД-I необходимая кривизна траектории обеспечивается за счёт

разности буксования $\Delta\delta$ и разности частоты вращения $\Delta\omega$ колёс. При этом $Q = Q_\delta + Q_\omega$, где $Q_\omega = \Delta\omega/\omega_0$. На основании (4), с учётом $\omega_{om} = \omega_0 - \Delta\omega$ и $\omega_{sa} = \omega_0 + \Delta\omega$ получим:

$$Q_\delta = \Delta\delta / [(1 - \delta_o) \cdot (1 + 0,25 Q \cdot \Delta w/w_o)]. \quad (4a)$$

Для малых значений Q можно пренебречь множителем $1/(1 + 0,25 Q \cdot \Delta w/w_o)$, и тогда

$$Q_\delta \approx \Delta\delta / (1 - \delta_o) \text{ и } \Delta\delta = (Q - Q_\omega) \cdot (1 - \delta_o). \quad (4b)$$

При увеличении кривизны траектории для обеспечения боковой устойчивости движения необходимо снижение задаваемой скорости перемещения. Относительная величина перераспределения весовой нагрузки под действием проекции центробежной силы P_{jY} на ось Y определяется из выражения

$$\delta F = P_{jY} \cdot h / (F \cdot B), \quad (5)$$

где h — расстояние центра масс до опорной поверхности;

$$P_{jY} \approx (\omega_0 \cdot r)^2 \cdot \lambda \cdot G / (R_o \cdot B). \quad (6)$$

Знак \approx в (6) учитывает неравенство $(\omega_0 \cdot r)^2$ действительной (с учётом буксования) скорости поступательного движения V . Подставляя (6), $\lambda \cdot G = 2F$ в (5), получим:

$$\delta F \approx 2 (\omega_0 \cdot r)^2 \cdot h \cdot Q / (g \cdot B^2). \quad (7)$$

Для того чтобы ужесточить и сделать одинаковыми рассматриваемые условия кругового движения для всех задаваемых значений Q , средняя частота вращения ω_0 колёс подбиралась такой, чтобы для всех исследуемых рабочих режимов относительная величина перераспределения весовой нагрузки между забегавшим и отстающим колёсами δF была примерно одинаковой. Для этого использовалась формула

$$\omega_0 = \sqrt{0,5 \cdot \delta F \cdot g \cdot B^2 / (Q \cdot h \cdot r^2)}. \quad (8)$$

Для определения δF были заданы следующие размерные параметры АТС: $B = 1,8$ м, $r = 0,48$ м, $h = 0,96$ м.

Уравнение тягового баланса ведущего моста $M_0 = M_{sa} + M_{om}$ после преобразования с учётом $M_0 = 2F \cdot r \cdot \varphi_0$, $M_{sa} = F \cdot (1 + \delta F) \cdot \varphi_{sa} \cdot r$ и $M_{om} = F \cdot (1 - \delta F) \cdot \varphi_{om} \cdot r$ для самоблокирующегося МКД с постоянным коэффициентом блокировки при $K_M < K_{\delta l}$ имеет следующий вид:

$$0,5 \cdot [(\varphi_{sa} \cdot (1 + \delta F) + \varphi_{om} \cdot (1 - \delta F))] = \varphi_0, \quad (9)$$

где φ_0 — среднее значение касательной силы тяги колёс.

При дифференциальном режиме МКД с постоянным коэффициентом блокировки относительные величины касательных сил тяги колёс получаем из формул:

$$\begin{aligned} \varphi_{sa} &= 2\varphi_0 / [(1 + \delta F) \cdot (1 + K_{\delta l})] \text{ и} \\ \varphi_{om} &= 2\varphi_0 \cdot K_{\delta l} / [(1 - \delta F) \cdot (1 + K_{\delta l})]. \end{aligned} \quad (10)$$

Для самоблокирующегося МКД с переменным коэффициентом блокировки значения φ_{sa} и φ_{om} также вычисляются по формулам (10), но с подстановкой переменной величины $K_{\delta l}$, которую можно определить из следующих выражений:

$$\begin{aligned} K_{\delta l} &= [\varphi_0 + \text{sgn}(\Delta\omega) \cdot 0,5\varepsilon \cdot \Delta\omega^2] / \\ & / [\varphi_0 - \text{sgn}(\Delta\omega) \cdot 0,5\varepsilon \cdot \Delta\omega^2], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta\omega = \omega_{sa} - \omega_{om}$ — разность частоты вращения колёс.

Зависимость буксования колёс от относительной величины касательной силы тяги в случае движения колеса по недеформируемой поверхности качения — линейная и определяется тангенциальной эластичностью шины [2]. Основываясь на экспоненциальном характере зависимости сопротивления грунта сдвигу от деформации [3], буксование колеса при пониженном давлении воздуха в шине в случае его движения по деформируемой поверхности можно представить в виде следующей функции от коэффициента сцепления $[\varphi]$ и текущего значения φ относительной касательной силы тяги:

$$\delta = \text{sgn}(\varphi) \cdot \ln [([\varphi]/([\varphi] - |\varphi|)]/\beta. \quad (12)$$

Рассмотрены четыре варианта условий движения: А, В, Г. Они соответствовали следующим значениям коэффициентов сцепления отстающего $[\varphi_{om}]$ и забегавшего $[\varphi_{sa}]$ колёс: А) $[\varphi_{om}] = [\varphi_{sa}] = 0,65$; Б) $[\varphi_{om}] = [\varphi_{sa}] = 0,35$; В) $[\varphi_{om}] = 0,65$, $[\varphi_{sa}] = 0,35$; Г) $[\varphi_{om}] = 0,35$, $[\varphi_{sa}] = 0,65$. Для колеса при $[\varphi] = 0,65$ функцию $\varphi = \Phi(\delta)$ принимали линейной с угловым коэффициентом $k_\delta = \Delta\varphi/\Delta\delta = 9$ при $\delta_{max} = 0,07$, а при $[\varphi] = 0,35$ — нелинейной в соответствии с выражением (12) при $\beta = 8$. В качестве предельной величины буксования в этом случае брали $\delta_{max} = 0,25$, которое соответствовало $\varphi_{max} = 0,3$. На основе решения системы уравнений (3) и (9) — для режима блокировки привода колёс при $1/K_{\delta l} < K_M < K_{\delta l}$; (4) и (10) — для дифференциального режима при $K_M = K_{\delta l}$ или $K_M = 1/K_{\delta l}$ в случае самоблокирующегося МКД-I; (4), (10), (11) — для самоблокирующегося МКД-II с учётом нелинейных зависимостей (12) и (12а) получены частоты вращения колёс и относительные значения их касательных сил тяги.

Относительную величину разности крутящих моментов колёс $\mu_c = (M_{om} - M_{sa})/F$ для сравниваемых вариантов МКД определяли из выражения

$$\mu_c = \varphi_{om} \cdot (1 - \delta F) - \varphi_{sa} \cdot (1 + \delta F). \quad (13)$$

В дифференциальном режиме μ_c можно определить из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \mu_c &= 2\varphi_0 \cdot (K_{\delta l} - 1)/(K_{\delta l} + 1) \text{ для МКД-I и} \\ \mu_c &= \text{sgn}(\Delta\omega) \cdot \varepsilon \cdot \Delta\omega^2 \text{ для МКД-II.} \end{aligned} \quad (13a)$$

Относительную величину суммарных потерь энергии в МКД и на буксование колёс $\zeta_N = \zeta_{N0} + \zeta_{N\delta}$ находили из следующих выражений:

$$\zeta_{N0} = 2 \cdot (A_2 - A_1) \cdot (K_{\delta l} - 1) / [(A_1 + A_2) \cdot (K_{\delta l} + 1)], \quad (14)$$

куда для самоблокирующегося МКД-II подставляли текущее значение $K_{\delta l}$, подсчитанное по формуле (11), а для самоблокирующегося МКД-I в дифференциальном режиме — заданное значение $K_{\delta l}$ (в режиме блокировки привода колёс $\zeta_{N0} = 0$);

$$\zeta_{N\delta} = (A_1 \cdot \delta_{3a} + A_2 \cdot \delta_{om}) / (A_1 + A_2). \quad (15)$$

Расчёты проводили для двух видов МКД-I, двух версий МКД-II и четырёх вариантов условий движения. Значения относительных величин касательной силы тяги, буксования и частоты вращения колёс, относительной величины разности крутящих моментов колёс и суммарных потерь энергии в МКД и на буксование колёс определяли при $\delta F = 0,25$ для пяти значений безразмерной кривизны Q траектории движения полюса поворота: 0,02; 0,075; 0,15; 0,3 и 0,45. При $B = 1,8$ м эти значения Q соответствуют следующим величинам радиуса R_0 траектории движения полюса поворота АТС: 90 м, 24 м, 12 м, 6 м и 4 м. Варьировали среднее значение относительной величины касательной силы тяги φ_0 от минимального до предельного φ_{0max} , соответствующего максимально допустимому буксованию наиболее нагруженного колеса. Задавали минимальное значение $\varphi_0 = 0,05$ при $[\varphi]_{om} = [\varphi]_{3a} = 0,65$ и $\varphi_0 = 0,1$ во всех остальных случаях. По результатам расчётов на рис. 2 представлены графики зависимостей $\varphi_{0max} = \Phi_1(Q)$, на рис. 3, а — семейство графиков (для трёх значений Q) $\mu_c = \Phi_2(\varphi_0)$ и на рис. 3, б — семейство графиков $\zeta_N = \Phi_3(\varphi_0)$. Графики, относящиеся к МКД-I, изображены сплошными линиями, к МКД-II — штриховыми. На графиках, относящихся к МКД-I, выделены точки, соответствующие граничным значениям Q и φ_0 , разделяющим режим блокировки и дифференциальный режим привода колёс. Для режима блокировки МКД-I графики каждого из рассматриваемых параметров для вариантов $K_{\delta l} = 5$ и $K_{\delta l} = 3$ совпадают.

Как следует из рис. 2, для всех разновидностей условий движения при малых Q МКД-I заблокирован, исключая вариант В для $K_{\delta l} = 3$, когда МКД-I во всём диапазоне Q разблокирован. С увеличением Q величина φ_{0max} при $[\varphi_{om}] = 0,65$ (А) снижается резко, а при $[\varphi_{om}] = 0,35$ (Б) — более плавно, в соответствии с характером функции $\delta_{om}(\varphi_{om})$ (12). Излом графика 1 ($K_{\delta l} = 5$) при $Q \approx 0,215$ соответствует изменению режима блокировки МКД-I: при $Q < 0,215$ величина φ_{0max} ограничена предельным буксованием $\delta_{max} = 0,07$ забегающего колеса, а при $Q > 0,215$ — предельным буксованием $\delta_{max} = 0,25$ отстающего колеса. Переход к дифференциальному режиму (условие $K_M = K_{\delta l}$) происходит при $Q = 0,06... 0,065$ для варианта А, $Q \approx 0,04$ для варианта В ($K_{\delta l} = 5$), $Q = 0,26... 0,28$ для вариантов Б и Г, при этом $\Delta\omega > 0$. При переходе к указанному режиму для варианта Б величина φ_{0max} (при $\delta_{om max} = 0,25$) снижается до 0,136 для МКД-I с $K_{\delta l} = 5$ и до 0,151 для МКД-I с $K_{\delta l} = 3$. Такие значения относительной тяговой нагрузки недостаточны при пониженном до 0,35

коэффициенте сцепления обоих колёс, например, в случае движения по влажному мягкому грунту или сухому песку, где коэффициент сопротивления только качению колёс без учёта других составляющих может превысить 0,015 и 0,2 соответственно. На основании (10) из условия $\varphi_{om} = \varphi_{om max}$, где $\varphi_{om max}$ соответствует предельному буксованию $\delta_{om max} = 0,25$, максимальное значение $K_{\delta l} = K_{\delta l max}$ можно определить из следующего выражения: $K_{\delta l max} = 1/[2f_0/(\varphi_{om max} \cdot (1 - \delta F) - 1)]$, (16) где f_0 — средняя величина коэффициента сопротивления качению ведущего моста с учётом угла подъёма поверхности качения и межосевого перераспределения тяговой нагрузки АТС. При $K_{\delta l} > K_{\delta l max}$ переход к дифференциальному режиму у МКД-I невозможен. Для заданных условий ($\varphi_{om max} = 0,3$, $f_0 = 0,2$ и $\delta F = 0,25$) необходим $K_{\delta l} < 1,29$.

Для варианта Г, в отличие от Б, при $Q \leq 0,05$ ($K_{\delta l} = 5$) и $Q \leq 0,22$ ($K_{\delta l} = 3$) у МКД-I дифференциальный режим — при $\Delta\omega < 0$ (условие включения $K_M = 1/K_{\delta l}$), что связано с большей разницей в буксовании колёс (при $\delta_{om} > \delta_{3a}$), чем при варианте Б. При дифференциальном режиме МКД-I величина φ_{om} и пропорциональное ей значение φ_{0max} в соответствии с (10) не зависят от $\Delta\omega$ и Q , и поэтому на соответствующих участках графиков $\varphi_{0max} = const$. Чем выше $K_{\delta l}$, тем ниже величина φ_{0max} , что связано с увеличением тяговой нагрузки забегающего колеса $\varphi_{3a} = [\varphi_{om}](1 - \delta F)/[(1 + \delta F)K_{\delta l}]$, поэтому при $K_{\delta l} = 3$ (график 2) величина φ_{0max} выше, чем при $K_{\delta l} = 5$ (график 1).

При МКД-II возрастание $\Delta\omega$ и Q согласно (11) вызывает увеличение $K_{\delta l}$, интенсивность которого снижается по мере роста φ_0 . Поэтому уменьшение $\varphi_{0max} = \Phi_1(Q)$ для МКД-II с увеличением Q имеет плавный характер. При $\varepsilon = 0,015$ (график 4) значение φ_{0max} несколько выше, чем при $\varepsilon = 0,025$ (график 3).

Из анализа графиков на рис. 2 следует, что для условий движения А и В преимущество в более высоких значениях φ_{0max} у варианта МКД-II, для условий Б и Г при $0,02 < Q < 0,2$ и $0,05 < Q < 0,27$ соответственно — у МКД-I в режиме блокировки. При более высоких значениях $Q > 0,2$ и $Q > 0,27$ соответственно превосходство на стороне МКД-II. При меньших — $Q < 0,02$ — для условий Б сравнимые МКД практически равноценны, а при $Q < 0,05$ для условий Г — небольшое преимущество у МКД-II.

На рис. 3, а представлены семейства графиков (для трёх значений Q) $\mu_c = \Phi_2(\varphi_0)$. При малых значениях $Q = 0,02... 0,15$ у МКД-I основным рабочим режимом для вариантов А, Б и Г является режим блокировки. Для варианта В — дифференциальный режим. В этих условиях режим блокировки имеет место только при $K_{\delta l} = 5$ и $\varphi_0 > 0,135$. В режиме блокировки (при $\omega_{3a} = \omega_{om}$) разность действительных окружных скоростей колёс обеспечивается за счёт увеличения буксования δ_{om} отстающего и снижения буксования δ_{3a} забегающего колеса. Разность

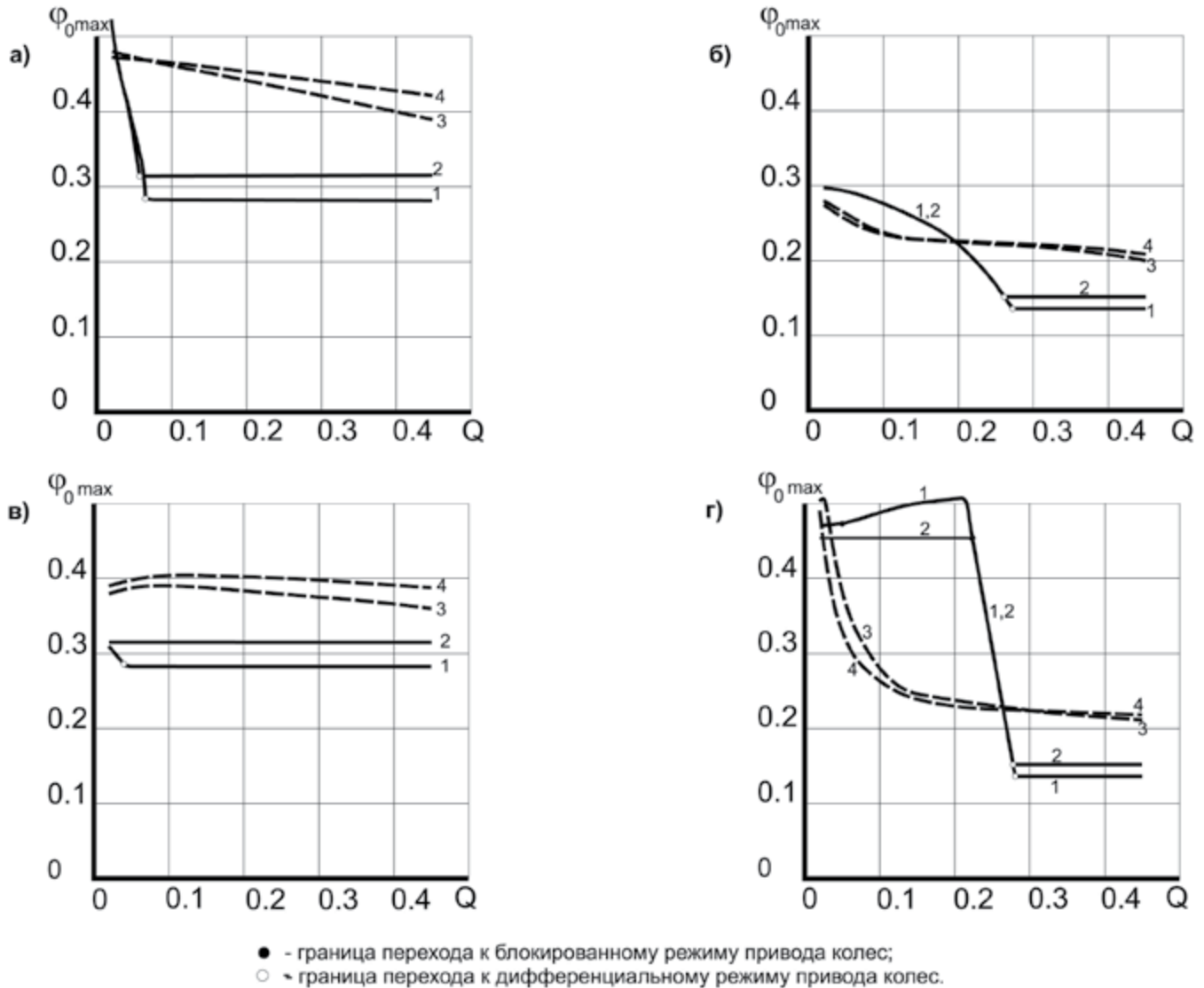


Рисунок 2. Относительная величина предельной по буксованию тяговой нагрузки φ_{0max} заднего ведущего моста АТС в зависимости от безразмерной величины кривизны Q траектории движения полюса поворота АТС для двух вариантов самоблокирующихся МКД: 1, 2 — МКД-I с $K_{от} = 5$, $K_{от} = 3$; 3, 4 — МКД-II с $\varepsilon = 0,025$, $\varepsilon = 0,015$; при следующих коэффициентах сцепления отстающего и забегающего колёс: а) $[\varphi]_{от} = [\varphi]_{за} = 0,65$; б) $[\varphi]_{от} = [\varphi]_{за} = 0,35$; в) $[\varphi]_{от} = 0,65$, $[\varphi]_{за} = 0,35$; г) $[\varphi]_{от} = 0,35$, $[\varphi]_{за} = 0,65$

буксования колёс $\Delta\delta$ — линейная функция (3а) от Q и δ_0 — уменьшается при снижении Q и увеличении δ_0 , а следовательно и φ_0 . В тех случаях, когда $[\varphi]_{за} \geq [\varphi]_{от}$, уменьшение $\Delta\delta$ сопровождается снижением μ_c (А, Б, Г), а при $[\varphi]_{от} > [\varphi]_{за}$, наоборот, уменьшением μ_c (В). В первом случае, при малых Q , графики $\mu_c = \Phi_2(\varphi_0)$ (практически прямые) частично или полностью расположены под горизонтальной осью координат ($\mu_c < 0$), а во втором — выше неё ($\mu_c > 0$). Во всех примерах графики смещаются вниз при уменьшении Q , а при увеличении (в пределах режима блокировки) — вверх.

В дифференциальном режиме разность буксования $\Delta\delta$ снижается и может стать отрицательной величиной за счёт разнонаправленного изменения частоты вращения колёс. При этом увеличение Q компенсируется соот-

ветствующим изменением $\Delta\omega/\omega_0$. Величина μ_c для МКД-I в дифференциальном режиме согласно (13а) изменяется пропорционально φ_0 . При $K_{от} = const$ графики $\mu_c = \Phi_2(\varphi_0)$ — прямые, угол наклона которых при снижении $K_{от}$ уменьшается. При $\Delta\omega < 0$ тангенс угла наклона отрицательный, а при $\Delta\omega > 0$ — положительный. Согласно (10, 13), μ_c не зависит от Q , поэтому участки графиков, соответствующие дифференциальному режиму МКД-I, для разных значений Q лежат на одной прямой (график 1 при $\varphi_0 \leq 0,09$ и график 2 при $\varphi_0 \leq 0,11$ для А; график 1 при $\varphi_0 \leq 0,135$ для В; график 2 при $\varphi_0 \geq 0,406$ для Г) либо полностью совпадают (график 2 для А и В) во всём диапазоне φ_0 .

Разность частоты вращения колёс для МКД-II из (46) $\Delta\omega = \omega_0 \cdot [Q - \Delta\delta/(1 - \delta_0)]$. Подставляя это значение $\Delta\omega$

в выражение (13а), при заданных значениях $\omega_o, [\varphi_{om}]$ и $[\varphi_{sa}]$ получим функцию двух переменных δ_o и Q :

$$\mu_c = \text{sgn}(\Delta\omega) \cdot \varepsilon \cdot \omega_o^2 \cdot [Q - \Delta\delta/(1 - \delta_o)]^2, \quad (17)$$

где $Q_o = [Q - \Delta\delta/(1 - \delta_o)]$ — относительная величина разности частоты вращения колёс.

При увеличении φ_o , а следовательно и δ_o , μ_c возрастает при $\Delta\delta < 0$ (вариант В) и уменьшается при $\Delta\delta > 0$ (варианты А, Б, Г). При одинаковом коэффициенте сцепления колёс (варианты А и Б) разность буксования колёс невелика, поскольку вызвана только перераспределением δF их весовой нагрузки, и поэтому снижение m_c при увеличении φ_o незначительно. При увеличении Q графики $\mu_c = \Phi_2(\varphi_o)$ смещаются вверх, а при уменьшении — вниз. При этом их характер для каждого из рассматриваемых вариантов условий движения существенно не меняется.

Значения $\mu_c > 0$ увеличивают момент сопротивления повороту АТС, а $\mu_c < 0$ его уменьшают. При этом момент сопротивления повороту АТС может снизиться до 0 и изменить свой знак, превращаясь в поворачивающий момент, а в случае чрезмерного увеличения абсолютной величины $\mu_c < 0$ (вариант Г) возникает возможность бокового скольжения задних колёс АТС.

Как следует из (17), для МКД-II произведение $\varepsilon \cdot \omega_o^2$ определяет крутизну графика функции $\mu_c(Q_o)$. Чем больше это произведение, тем меньше изменения относительной разности частоты вращения колёс Q_o при переменном $\mu_c(t)$ из-за непостоянства коэффициентов сцепления и сопротивления колёс, а также других внешних факторов. Пропорциональность этого произведения заданной скорости движения позволяет по мере её увеличения уменьшать чувствительность АТС к внешним возмущающим воздействиям $\mu_c(t)$, облегчая управление АТС, прежде всего при высоких скоростях движения с малой кривизной Q траектории.

Из анализа графиков $\mu_c = \Phi_2(\varphi_o)$ на рис. 3, а можно заключить, что лучшими вариантами сравниваемых МКД являются МКД-I с $K_{от} = 3$ (график 2) и МКД-II с $\varepsilon = 0,015$ (график 4). Из сравнения этих версий следует, что во всех рассматриваемых условиях движения для малых значений $Q = 0,02... 0,15$ МКД-II обеспечивает меньшие значения абсолютной величины m_c при $\varphi_o < \varphi_{o\max}$. Такое же преимущество МКД-II характерно и при больших значениях $Q = 0,3... 0,45$ (графики не представлены) — для вариантов Б и Г при $\varphi_o < \varphi_{o\max}$ и для вариантов А и В при $\varphi_o > 0,11$. При $Q = 0,02$ и с увеличением φ_o в диапазоне $0,4 < \varphi_o < \varphi_{o\max}$ (вариант Г) значения $|\mu_c|$ для МКД-I

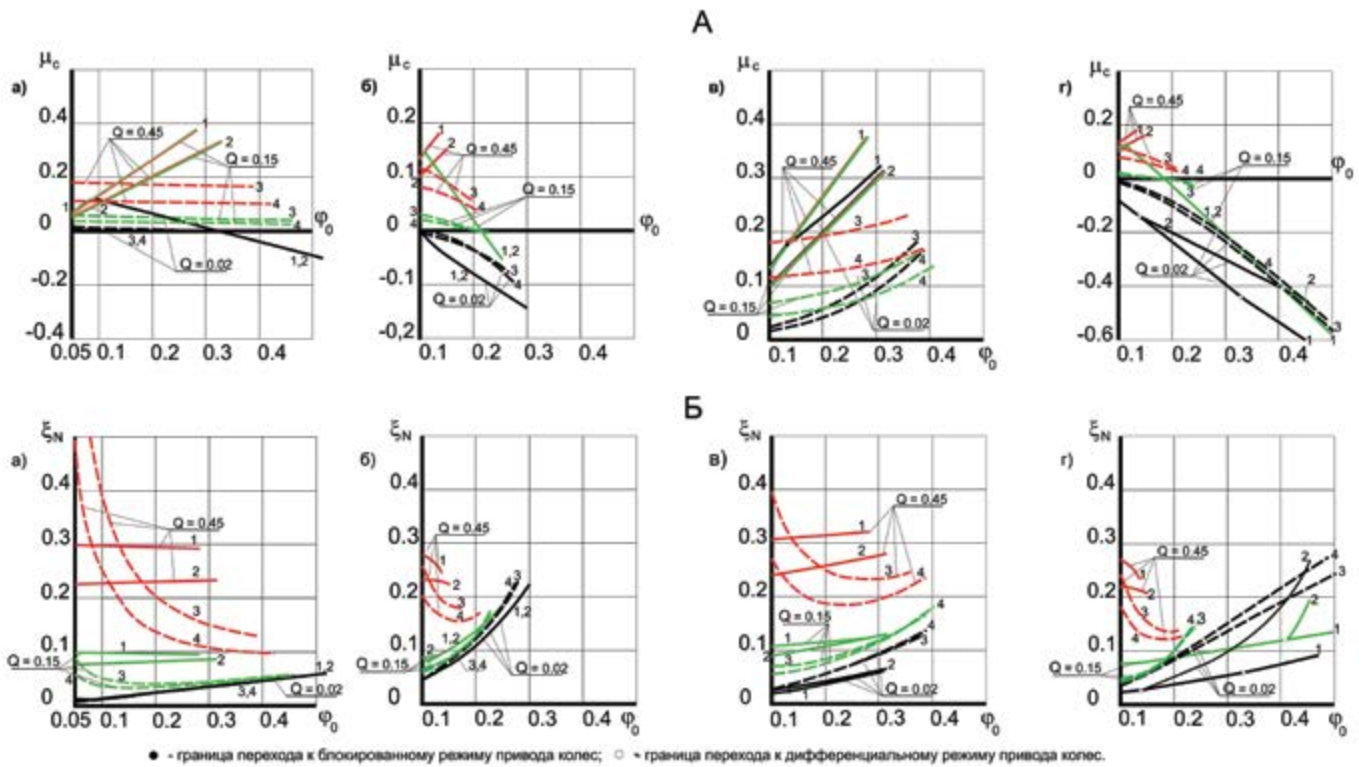


Рисунок 3. Графики зависимостей: А — относительной величины разности крутящих моментов колёс m_c заднего ведущего моста АТС; Б — относительной величины ζ_N суммарных потерь энергии в МКД и на буксование колёс от среднего значения φ_o их относительной касательной силы тяги при разных значениях безразмерной величины кривизны Q траектории движения полюса поворота АТС для двух вариантов самоблокирующихся МКД: 1, 2 — МКД-I с $K_{от} = 5, K_{от} = 3$; 3, 4 — МКД-II с $\varepsilon = 0,025, \varepsilon = 0,015$; при различных и одинаковых коэффициентах сцепления отстающего и забегавшего колёс: а) $[\varphi]_{om} = [\varphi]_{sa} = 0,65$; б) $[\varphi]_{om} = [\varphi]_{sa} = 0,35$; в) $[\varphi]_{om} = 0,65, [\varphi]_{sa} = 0,35$; г) $[\varphi]_{om} = 0,35, [\varphi]_{sa} = 0,65$

и МКД-II повышаются сверх 0,4, вызывая возможность чрезмерного увеличения поворачивающего момента АТС. Небольшое преимущество МКД-I наблюдается при $Q = 0,3... 0,4$ и $\varphi_0 \leq 0,11$ для вариантов А и В, причём для В $\varphi_0 = 0,11$ — это практически нижняя граница возможной для указанных условий величины φ_0 .

На рис. 3, б представлены семейства графиков (для трёх значений Q) $\zeta_N = \Phi_3(\varphi_0)$. Если для МКД-I в режиме блокировки величина ζ_N учитывает только потери энергии на буксование колёс, то в дифференциальном режиме дополнительно принимаются в расчёт потери энергии на сухое трение в МКД-I и дросселирование рабочей жидкости в механизме самоблокировки МКД-II. Из сравнения графиков 1 и 2 для $K_{от} = 5$ и $K_{от} = 3$ у МКД-I следует, что за исключением варианта Г при $Q = 0,02$ и $Q = 0,075$ меньшие потери в энергии (в дифференциальном режиме) при $K_{от} = 3$. Аналогичное сравнение графиков 3 и 4 свидетельствует о преимуществе МКД-II с $\varepsilon = 0,015$ перед $\varepsilon = 0,025$ (для вариантов Б и Г — незначительное).

Из сравнения графиков 2 и 4 $\zeta_N = \Phi_3(\varphi_0)$ следует, что ни МКД-I, ни МКД-II в рассматриваемых условиях движения не обладает однозначным превосходством при меньших значениях ζ_N . Преимущество МКД-II имеет место для варианта А — при $Q = 0,02... 0,15$ и $\varphi_0 < \varphi_{0max}$, $Q = 0,3... 0,45$ и $\varphi_0 > 0,11$; для варианта Б — при $Q = 0,15$ и $\varphi_0 < 0,215$, $Q = 0,3... 0,45$ и $\varphi_0 < \varphi_{0max}$; для варианта В — при $Q \geq 0,15$ и $\varphi_0 < \varphi_{0max}$, $Q = 0,3... 0,45$ и $\varphi_0 > 0,11$; для варианта Г — при $Q = 0,02$ и $\varphi_0 > 0,414$, $Q = 0,15$ и $\varphi_0 < 0,185$, $Q = 0,3... 0,45$ и $\varphi_0 < \varphi_{0max}$. В остальных случаях — преимущество на стороне МКД-I, причём для вариантов А и Б — в режиме блокировки. Тем не менее это преимущество МКД-I для рассматриваемых условий движения состоит в более узком диапазоне изменения Q и φ_0 , чем у МКД-II.

Таким образом, на основании проведённого сравнительного анализа двух альтернативных вариантов самоблокирующегося МКД-I и МКД-II заднего ведущего моста АТС в условиях установившегося кругового движения при различной и одинаковой величине коэффициентов сцепления колёс (отстающего и забегающего) можно сделать следующее заключение:

– МКД-II в сравнении с МКД-I увеличивает предельные значения суммарной касательной силы тяги ведущего моста как при наличии запаса сцепления у отстающего колеса (варианты А и В) при различной кривизне траектории движения, так и при его пониженном до 0,35 коэффициенте сцепления (варианты Б и Г) и большой кривизне ($Q > 0,2$ при $[\varphi]_{sa} = 0,35$ и $[\varphi]_{om} = 0,35$ и $Q > 0,27$ при $[\varphi]_{sa} = 0,65$ и $[\varphi]_{om} = 0,35$) траектории движения. Преимущество же МКД-I для меньших значений кривизны траектории ($Q < 0,27$ при $[\varphi]_{sa} = 0,65$ и $[\varphi]_{om} = 0,35$) не имеет особого значения из-за чрезмерного увеличения абсолютной величины относительной отрицательной разности μ_c крутящих моментов отстающего и забега-

ющего колёс, связанного с возможностью нарушения боковой устойчивости кругового движения АТС.

– МКД-II в сравнении с МКД-I снижает абсолютную величину μ_c при различной кривизне траектории движения полуса поворота АТС, исключая диапазон малых тяговых нагрузок ($\varphi_0 \leq 0,11$) при малых радиусах поворота в одинаково хороших условиях движения колёс (отстающего и забегающего) ведущего моста (вариант А).

– МКД-II для рассматриваемых условий движения экономичнее МКД-I в более широком диапазоне изменения кривизны траектории движения и тяговой нагрузки ведущего моста. И прежде всего — при большой кривизне траектории движения, в диапазоне $0,3 < Q < 0,45$ для всех рассматриваемых условий движения колёс; при $Q = 0,15$, исключая варианты (Б и Г) с пониженным коэффициентом сцепления отстающего колеса при большой тяговой нагрузке; при $Q = 0,02$ — только в одинаково хороших условиях движения колёс (вариант А).

– Полученные сравнительные данные для двух рассмотренных вариантов режима самоблокировки свидетельствуют о перспективности МКД-II с зависимостью блокирующего момента от квадрата разности частоты вращения колёс для колёсных АТС повышенной проходимости. При этом эффективность МКД-II может быть повышена на основе комбинации режимов самоблокировки и полной блокировки.

– При практической реализации МКД-II на основе гидравлической системы [2], кроме указанных режимов блокировки, возникает необходимость в режиме полной разблокировки МКД. Это связано с обеспечением нормальной работы АБС торможения. Один из вариантов технического решения этого вопроса применительно к вышеупомянутому самоблокирующемуся дифференциалу Vari-Lok, у которого сопротивление перепускного дроссельного клапана, размещённого внутри вращающегося корпуса дифференциала, не регулируется, содержится в патенте Daimler-Chrysler Co. [4]. В нём предложено электромагнитное управление дроссельным клапаном, позволяющее изменять его сопротивление. На основе подобного устройства наряду с режимом самоблокировки МКД-II можно обеспечить также режимы полной блокировки и разблокировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Келлер А.А. Повышение проходимости автомобиля с межколёсным дифференциалом ограничением буксования ведущих колёс: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Челябинск, 1999.
2. Андреев А.Ф., Ванцевич В.В., Лефаров А.Х. Дифференциалы колёсных машин / под общ. ред. А.Х. Лефарова. — М.: Машиностроение, 1987. — 176 с.
3. Агейкин Я.С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. — М.: Машиностроение, 1972. — 184 с.
4. Schrand E.V. Limited slip differential with integrated solenoid valve and plenum: patent № US 6,902,506 B2; 07.06.2005.