

УДК 629.1.032.1

В. Б. Держанский, К. С. Жебелев,
И. А. Тараторкин, В. Н. Наумов,
С. А. Харитонов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ БЫСТРОХОДНЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Приведены результаты экспериментальных исследований динамики управляемого движения быстроходных гусеничных машин. Анализируется зависимость интегрального критерия от удельной мощности машины с дискретными и непрерывными свойствами системы управления поворотом при движении по деформируемому и малодеформируемому грунтам. Показано, что с повышением удельной силы тяги, определяемой удельной мощностью, при некоторой скорости возрастает возможность преодоления сил сопротивления движению машины. Отмечено, что возможности создания дополнительного поворачивающего момента и повышения скоростных свойств инерционной силой при замедлении машины ограничиваются быстродействием системы управления переключением передач.

В результате исследований выявлено, что при переходных процессах регулирования направления движения (поворота) быстроходных гусеничных машин составляет более 60 % времени, скорость движения ограничивается управляемостью и устойчивостью. Интегральный критерий оценки управляемости — это средняя скорость движения на дорогах с интенсивным изменением направления траектории, зависящая от динамических и кинематических свойств, параметров конструкции машин и систем управления поворотом, внешней среды и ограниченности психофизиологических свойств водителя. Цель настоящей работы — исследование зависимости интегрального критерия оценки управляемости от удельной мощности машины, оснащенной системой управления поворотом с дискретными и непрерывными свойствами при движении по деформируемому и малодеформируемому грунтам. Эта зависимость установлена экспериментально при исследовании динамики управляемого движения быстроходных гусеничных машин.

Результаты исследования приведены на рис. 1. Кривая 1 характеризует зависимость средней скорости движения гусеничной машины, имеющей механизм поворота (МП) с дискретными свойствами, при

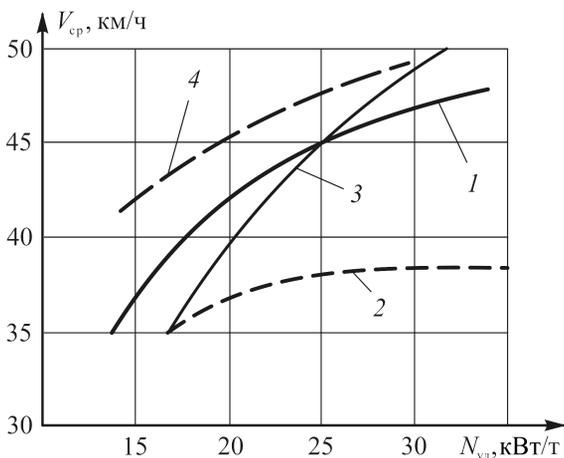


Рис. 1. Зависимость средней скорости движения v_{cp} от удельной мощности $N_{уд}$ машины :
 1, 2 и 3, 4 – МП с дискретными и непрерывными свойствами соответственно; 1, 3 – деформируемый грунт; 2, 4 – бетонное покрытие

движении по деформируемому грунту. Из рисунка видно, что при увеличении удельной мощности от 13,6 до 19,0 кВт/т средняя скорость прохождения тестовой змейки возрастает от 35 до 46 км/ч (т.е. на 30%). В этих же условиях для гусеничных машин, оснащенных гидрообъемным механизмом поворота (ГОМП) с непрерывными свойствами удельная мощность повышается (кривая 3) от 14,8 до 22,7 кВт/т (в 1,53 раза), а средняя скорость прохождения “змейки” возрастает на 40% (от 35 до 48 км/ч).

Следует отметить, что при значении удельной мощности до 20 кВт/т в характерных условиях (деформируемый грунт) средняя скорость движения машины с МП с дискретными свойствами не ниже, чем у машин с непрерывными свойствами (с ГОМП) (см. рис. 1, кривые 1, 3). Это связано с тем, что часть мощности двигателя тратится на привод гидрообъемной передачи (ГОП) ($f_{гоп}$) механизма поворота.

Эти результаты получены при движении машины по деформируемому грунту. При движении гусеничной машины, имеющей МП с дискретными свойствами, по малодеформируемым грунтам с ограниченными сцепными свойствами и интенсивным изменением направления движения ее скоростные характеристики весьма ограничены и не превышают 35...38 км/ч из-за невозможности плавного регулирования кривизны, углового ускорения (см. рис. 1, кривая 2), компенсации отклонения траектории. Анализ спектральной плотности случайного процесса отклонения угловой скорости от заданной показывает, что с ростом скорости движения частота процессов превышает предельные возможности водителя $[f_v] < 0,8 \dots 1,0$ Гц [1]. При движении по дороге

с покрытием число подруливаний составляет $n_a = 96$ на один километр пути. В связи с этим компенсирующее управление эффективно при скорости движения $v < 36$ км/ч. В таких условиях движения преимущества ГОМП (с непрерывными свойствами) существенны (см. рис. 1, кривая 4).

Приведенные факты подтверждаются практикой модернизации машин. Сравнительные испытания двух модернизированных машин с увеличенной на 25 % удельной мощностью (до 17,0 кВт/т) показали, что в характерных условиях движения подвижность машин со ступенчатым механизмом поворота (СМП) лишь на 8...15 % ниже, чем подвижность машин, оснащенных МП с непрерывными свойствами при установочной мощности 250 кВт. Однако на дорогах с интенсивным изменением направления движения и ограниченными сцепными свойствами, например на тестовых трассах “змейка”, “переставка” и затяжных поворотах, динамические и скоростные свойства гусеничных машин, оснащенных СМП, существенно ниже, чем у машин, оснащенных ГОМП, увеличивается интенсивность управляющей деятельности водителя, число включений механизма поворота на километр пути возрастает в 6...9 раз.

Приведенные результаты вполне обоснованы и следуют из дифференциальных уравнений движения машины, полученных из уравнения Лагранжа с учетом взаимосвязи кинетической энергии поступательного и вращательного движений:

$$v\delta_v = f_d(v, \alpha_{шт}) - f_{гоп}(\alpha_{шт}) - (f_c + f_{п} + f_{ив} + f_{иw} + f_{г.д}); \quad \omega = \frac{M_{п} - M_c}{\delta_{\omega} J_z}, \quad (1)$$

где δ_v — коэффициент приращения масс при поступательном движении; $f_d(v, \alpha_{шт})$ — удельная сила тяги (определяется по тяговой характеристике машины); $f_{гоп}$ — удельное сопротивление ГОМП; f_c — коэффициент суммарного сопротивления прямолинейному движению; $f_{п}$ — удельная сила сопротивления, формируемая сопротивлением повороту; $f_{ив}$ и $f_{иw}$ — инерционные составляющие сопротивления при поступательном и вращательном движениях соответственно; $f_{г.д}$ — удельная сила потерь в гусеничном движителе; $M_{п}$ — поворачивающий момент; M_c — момент сопротивления; δ_{ω} — коэффициент приращения масс при вращательном движении; J_z — момент инерции машины относительно вертикальной оси z .

С повышением удельной силы тяги $f_d(V)$, определяемой удельной мощностью при определенной скорости, возрастает возможность преодоления сил сопротивления движению машины.

Поворачивающий момент создается в зависимости от типа МП. Для машин с СМП поворачивающий момент может создаваться силами тяги на отстающей $f_{1т}$ и забегающей $f_{2т}$ гусеницах: $M_{п} =$

$= 0,5mg(f_{2т} - f_{1т})B$, где B — ширина колеи. Сила тяги на отстающей гусенице $f_{1т}$ создается тормозом поворота. Удельная сила тяги на забегающей гусенице создается двигателем $f_{д2}$ и инерционной составляющей $f_2 = f_{д2} + \frac{\dot{V}}{g}\delta_j$ (поворот происходит с замедлением поступательной скорости в силу свойств МП второго типа и возрастания сопротивления движению). Особенно существенно замедление для машин, оснащенных гидромеханическими трансмиссиями.

Для гусеничных машин с СМП, обеспечивающими дискретное регулирование направления движения, угловая скорость ω претерпевает разрыв второго рода, а ее производная является дельта-функцией $\delta(t)$, т.е. по абсолютному значению она может изменяться в неограниченном интервале [2]. Однако из экспериментальных данных следует, что в упруго-инерционной механической системе движитель-трансмиссия, включающей сдвигающиеся фрикционные элементы (ФЭ) и взаимодействующей с грунтом с буксованием, значения производной $\dot{\omega}$ изменяются непрерывно в конечных, хотя и значительных пределах. Даже при ограниченном отклонении угловой скорости (до 5 град/с) с частотой 2,5 Гц (вследствие увода и колебательных процессов в силовом блоке) угловые ускорения достигают 32 град/с² (рис. 2), а при циклическом включении механизма на затяжных поворотах — до

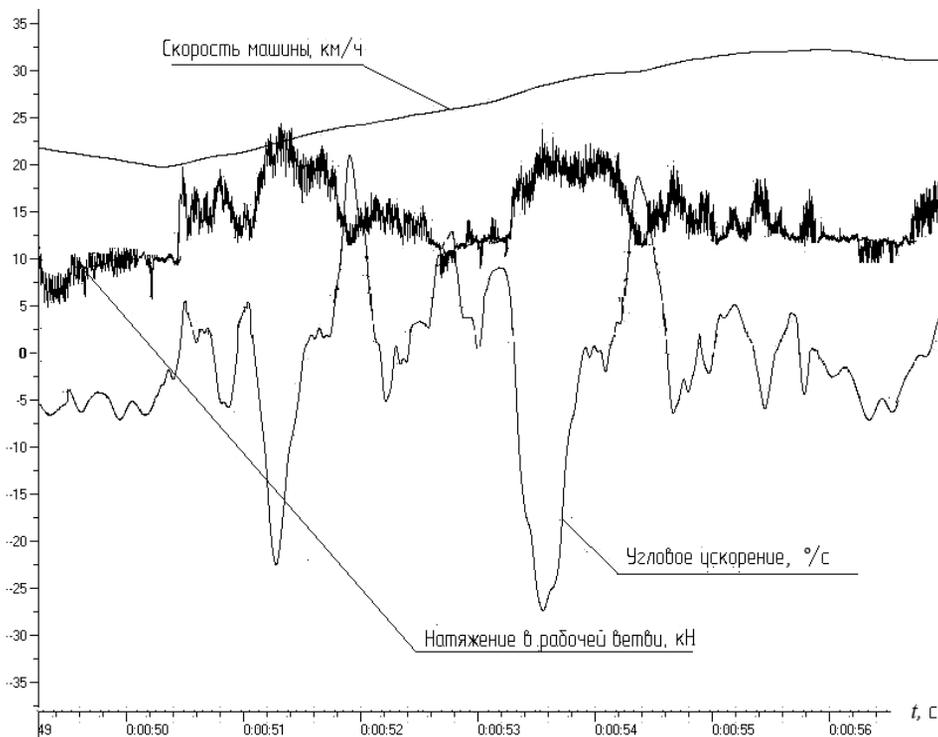


Рис. 2. Изменение параметров при движении гусеничной машины с СМП

74 град/с². Дискретность характеристики с существенными нелинейностями системы управления СМП приводят к высокой цикличности включения МП из-за несовпадения траекторной кривизны с дорожной ограничением скорости по условиям вписываемости, особенно на затяжных поворотах ограниченной кривизны. Поворот с переменной кривизной при буксующих ФЭ МП вследствие неустойчивости процесса трения, применяется, главным образом, для компенсации увода машины от заданного направления. При движении с большой скоростью по малодеформируемым грунтам на горизонтальных участках, когда актуально исследование управляемости и устойчивости, эффективность таких управляющих воздействий незначительна. При движении на подъемах, спусках, на тормозной характеристике и буксировке однотипных изделий выключение блокировочных ФЭ недопустимо из-за полной неуправляемости.

Угловые ускорения при повороте гусеничной машины с дискретными свойствами значительно больше, чем машины с дифференциальным ГОМП, поворачивающий момент которого создается гидромотором. Поэтому при движении на деформируемых грунтах скоростные характеристики машин с дискретными свойствами системы управления поворотом могут быть выше, чем у машин с ГОМП. При этом реализация высоких значений боковых ускорений (до 10...11 м/с²) не сопровождается заносом, так как после нескольких заездов образуется колея глубиной до 60...80 мм. Однако при движении по малодеформируемым грунтам эти возможности не удастся реализовать из-за ограничения сцепных свойств.

Динамические характеристики машины, оснащенной МП с дискретными свойствами, могут быть улучшены при соответствующем управлении поступательной скоростью. При снижении скорости поступательного движения в процессе поворота кинетическая энергия вращательного движения возрастает из-за снижения энергии поступательного движения.

Возникающая при этом продольная сила инерции $\delta_v m \frac{dv}{dt}$ создает дополнительный поворачивающий момент $0,5B\delta_v m \frac{dv}{dt}$. Угловое ускорение от этого момента составляет эту же величину, уменьшенную в $\delta_\omega J_z$ раз. При замедлении поступательного движения до 3 м/с² угловое ускорение гусеничной машины массой 16 т превышает 0,5 рад/с².

Следует отметить, что возможности создания дополнительного поворачивающего момента и повышения скоростных свойств инерционной силой при замедлении машины ограничиваются быстродействием системы управления переключением передач. Так, в конструкции гусеничной машины ТМ-130 с СМП и гидромеханической трансмиссией длительность переключения не превышает 0,8...1,2 с, что позволяет

двигаться в начале выполнения маневра “змейка” на пятой передаче, а с ростом сопротивления — переключаться на третью передачу. Средняя скорость v_{cp} и ее замедление определяются выражениями $v_{cp} = 0,5(q_m^2 + 1)v_3$ и $\dot{v}_{cp} = v_3^2(q_m^2 - 1)/(q_m^2 + 1)\Delta S$ соответственно (здесь q_m — отношение передаточных чисел на смежных передачах, а ΔS — длина полуволны “змейки”).

Длительность переключения передач в механической трансмиссии машины ТМ-120У гораздо больше и составляет 2,5... 3,7 с. Из-за ограниченного быстродействия системы в трудных условиях движения переключение на ходу с высших на низшие передачи не представляется возможным. В связи с этим движение по тестовой “змейке” происходит на заранее выбранной третьей передаче. Ограниченность быстродействия системы переключения передач снижает не только разгонные качества машины, но и среднюю скорость прохождения “змейки” в $0,5(q_m^2 + 1) \approx 1,6$ раз.

Таким образом, скоростные свойства гусеничных машин с дискретными свойствами системы управления поворотом ограничиваются удельной мощностью машины, динамическими явлениями при циклическом включении МП, отклонением (дивергенцией) параметров траектории движения от заданных вследствие несовпадения траекторной кривизны с дорожной, психофизиологическими возможностями выполнения функции обратной связи водителем, а также быстродействием системы управления переключением передач.

Подвижность, а следовательно, и управляемость гусеничных машин с непрерывными свойствами системы управления во многом определяется динамическими и кинематическими свойствами. Динамические свойства определяют качество переходных процессов, при которых угловое ускорение $\dot{\omega}$ определяется отношением разности моментов поворачивающего $M_{п}$ и сопротивления M_c к моменту инерции $\delta_{\omega} I_z$ машины (второе уравнение системы (1)). Для машин с дифференциальным ГОМП поворачивающий момент создается гидромотором $M_{п} = M_{гм} B(1 + k)U_{бр}U_{мс}/2r_{вк}$ [1] автоматически в силу свойств гидropередачи. Момент гидромотора является сложной нелинейной функцией, которая описывается следующей системой дифференциальных уравнений, приведенной в работе [3]:

$$M_{гм} = \Delta P q_{гоп};$$

$$\frac{\Delta P}{dt} = (Q_{гн} - \Delta Q)E(\Delta P, b, n);$$

$$Q_{гн} = q_n(\alpha_{шт})\omega_d(\alpha_{пт})U_{дн},$$

где ΔP — избыточное давление в силовых магистралях; $q_{гоп}$ — объемная постоянная; Q — расход жидкости; ΔQ — утечки жидкости,

включая утечки через предохранительный клапан; $E(\Delta P, b, n)$ — модуль упругости рабочей жидкости, зависящий от избыточного давления ΔP , газосодержания b и показателя политропы n .

Рост давления и расхода жидкости при переходных режимах ограничивается вследствие срабатывания предохранительного клапана. При этом возрастает температура рабочей жидкости в силовых магистралах ГОП, что переводит ее в двухфазное состояние. При этом повышается коэффициент газосодержания, снижается модуль упругости жидкости и, соответственно, механическая жесткость ГОП, увеличивается фазовое отставание реакции на управляющее воздействие и ограничивается работоспособность передачи.

Особое значение при управлении ГОМП имеет учет теплового режима. Процесс регулирования теплового режима силового блока характеризуется количеством теплоты, отдаваемой теплоносителю и рассеиваемой системой охлаждения в единицу времени, т.е. функциями целого ряда параметров.

Линеаризованное дифференциальное уравнение изменения температуры теплоносителя $\Delta\theta$ обычно представляют в следующем виде:

$$T \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = K_\varphi \Delta\varphi + f(t),$$

где T — постоянная времени процесса; K_φ — коэффициент усиления регулирующего органа при подаче дополнительного воздуха; $f(t)$ — функция, характеризующая возмущающие воздействия, вызванные изменением внешних условий и режимов работы ГОП при управлении поворотом. Поскольку коэффициенты T и K_φ меняются в широких пределах при изменении условий движения и режимов работы силовой установки и трансмиссии, то и характер переходных процессов в системе охлаждения также существенно зависит от этих факторов.

Скоростные свойства машин определяются кинематическими и силовыми условиями, создаваемыми системой управления поворотом. Кинематические условия регулирования направления движения машины, в том числе на затяжных поворотах ограниченной кривизны, во многом определяются зависимостью (характеристикой) $\omega_{\text{п}} = \omega_{\text{п}}(\alpha_{\text{шт}}, \alpha_{\text{пт}})$ и чувствительностью $\sum \frac{\partial \omega_{\text{п}}}{\partial \alpha_i}$ к управлению

$\omega_{\text{п}} = \omega_{\text{п0}}(\alpha_{\text{шт}}, \alpha_{\text{пт}}) + \sum \frac{\partial \omega_{\text{п}}}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i$, а также максимальным значением угловой скорости поворота $\omega_{\text{п max}}$. По этому параметру дифференциальные ГОМП превосходят другие.

При отсутствии динамических ограничений положительные производные $\frac{\partial \omega_{\text{п}}}{\partial \alpha_{\text{шт}}} > 0$ и $\frac{\partial \omega_{\text{п}}}{\partial \alpha_{\text{пт}}} \text{sign } \dot{\alpha}_{\text{пт}} > 0$ соответствуют условию управляемости. При росте $\omega_{\text{п}}$ (последнее условие) увеличение подачи топлива выполняет роль форсирующей функции.

Для машин, оснащенных системой управления поворотом с непрерывными свойствами — дифференциальным ГОМП, угловая скорость поворота является функцией двух управлений $\alpha_{шт}$ и $\alpha_{пт}$ [1]:

$$\omega_3 = 2r_{вк}U_{гоп}(\alpha_{шт})\omega_d(\alpha_{пт})/(1+k)BU_{бр}U_{дн}U_{мс}K_R$$

и не зависит от номера включенной передачи.

Передаточные числа $U_{дн}$, $U_{мс}$ определяются из условия движения без бокового заноса по грунтам с высокими сцепными свойствами на максимальном скоростном режиме ($\omega_d = \omega_N$). При этом расчетная угловая скорость поворота принимается равной 1 рад/с. Это обеспечивает высокие скоростные свойства машины на дорогах с интенсивным изменением кривизны. Однако при движении машины со скоростью, ниже максимальной, т.е. $v < v_{j\max}$, на режиме вращения вала $\omega_d = \omega_m$ угловая скорость поворота снижается в ω_N/ω_m раз и может быть недостаточной. Например, при движении по окружности радиусом 20 м ($k = 0,05 \text{ м}^{-1}$) по сухой бетонной дороге ($\mu = 0,8$) с предельной скоростью $v \leq \sqrt{\mu g/k}$, равной 12,6 м/с, угловая скорость должна составлять $\omega = vk = 0,63$ рад/с. Если двигатель работает в режиме максимального момента, то расчетная угловая скорость будет составлять $\omega_p = \omega_{\max}\omega_N/\omega_m \approx 0,5$ рад/с. При юзе и буксовании гусениц фактическая угловая скорость поворота еще меньше и не превышает 0,33... 0,38 рад/с (принято, что на установившемся режиме коэффициент буксования определяется отношением длины опорной поверхности к ширине колеи: $K_R = L/B = 1,3 \dots 1,5$). Следовательно, для обеспечения управляемости передаточное число привода ГОП $U_{дн}$ должно быть регулируемым для обеспечения необходимой угловой скорости поворота машины при работе двигателя не на максимальной угловой скорости $\omega_d \ll \omega_N$. В противном случае следует уменьшить номер включенной передачи.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости изменения кинематических и силовых параметров при переходных процессах управления поворотом гусеничной машины с ГОМП (без учета высокочастотных составляющих, обусловленных динамикой гусеничного движителя и упругостью элементов силового блока). При входе в поворот и выходе из него момент сопротивления определяется не только сопротивлением грунта, но и инерционной составляющей $I_z\dot{\omega}$ (заштрихованная область на рис. 3).

Для обеспечения высоких динамических характеристик поворачивающий момент должен быть достаточен для преодоления сопротивления грунта и инерционных сил. Численная оценка показывает, что для машин массой 20 т необходима установочная мощность ГОП не менее 240 кВт — т.е. 50... 60% мощности двигателя. Применение гидрообъемных передач такой мощности при достигнутом значении

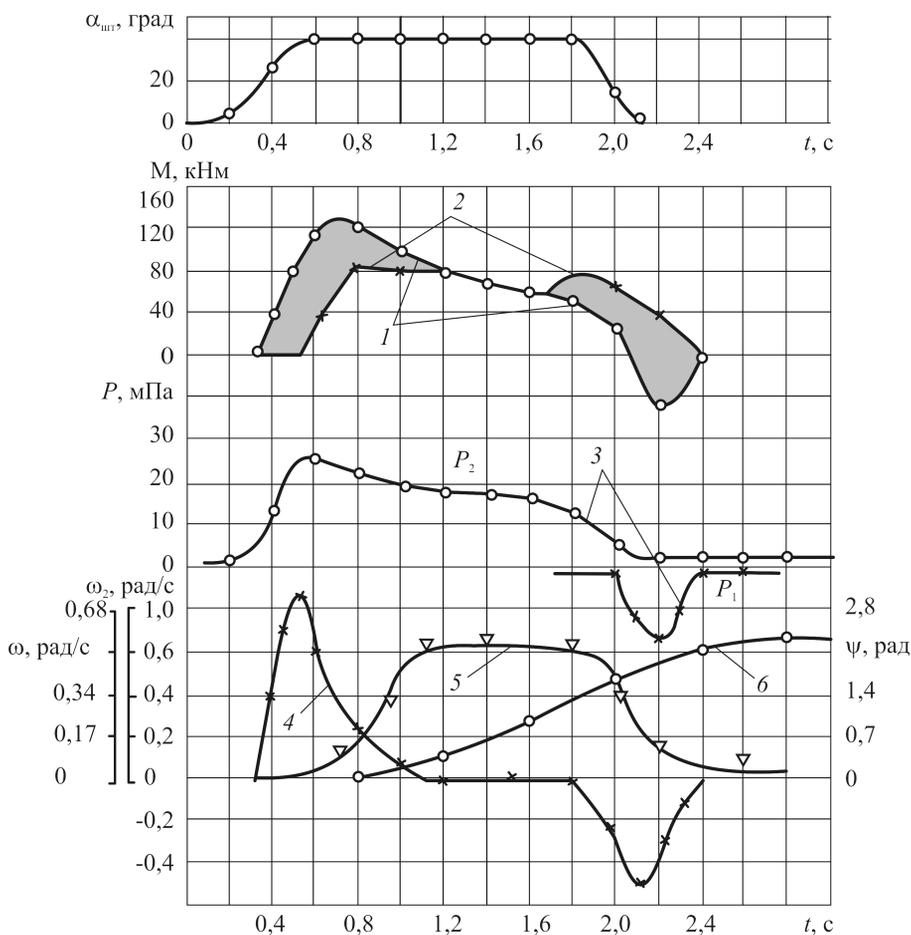


Рис. 3. Изменение кинематических и силовых параметров в процессе поворота

рабочего давления 45 МПа ограничивается условиями компоновки и габаритно-массовыми параметрами.

Запаздывание реакции гусеничной машины на управляющее воздействие приводит к необходимости создания соответствующего упреждения управления. При появлении на трассе полигона внезапных “закрытых” поворотов управление не является упреждающим. В этом случае резкий поворот штурвала не приводит к соответствующему повороту гусеничной машины, движение является неуправляемым, машина проезжает поворот на 5...10 м. Движение в таких случаях приводит к съезду с дороги и другим нежелательным последствиям. Особенно ярко это проявляется при движении на высшей передаче с неполной подачей топлива, так как при этом проявляется нелинейность гидрообъемной передачи, связанная с ограничением расхода рабочей жидкости при недостаточной частоте вращения вала гидронасоса. Снижение скорости движения путем торможения перед поворотом приводит к дополнительному снижению частоты вращения вала гидронасоса и его производительности. Экспериментально установлено,

что при вероятности появления “закрытых” поворотов управляемость может быть улучшена при быстром переключении передачи на номер ниже и при увеличении частоты вращения вала двигателя — ближе к максимальному значению (конструкция системы управления гидромеханической трансмиссией позволяет это осуществить). Первое приводит к повышению чувствительности к управляющему воздействию, а второе увеличивает производительность гидронасоса ГОП.

Для исследования устойчивости замкнутой системы движение машины описывается в векторно-матричной форме:

$$\dot{x} = Ax + By$$

— уравнение динамики управляемого объекта;

$$\dot{y} = F(\sigma); \quad \sigma = C^T - ry$$

— уравнения нелинейного исполнительного устройства (привода) и обратной связи.

Здесь y, σ — скалярные координаты; r — коэффициент обратной связи; C^T — транспонированная матрица-столбец (C_1, C_2, \dots, C_n), т.е. матрица-строка, в соответствии с которой $C^T = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n$.

Нелинейная функция $F(\sigma)$ может иметь произвольную форму, удовлетворяющую следующим условиям

$$F(0) = 0, \quad F(\sigma) > 0 \text{ при } \sigma \neq 0.$$

Для невырожденной матрицы системы $\det \begin{vmatrix} A & B \\ C^T & -r \end{vmatrix} \neq 0$, т.е. $r + C^T A^{-1} B \neq 0$ может быть составлена функция Ляпунова. На основе исследования знакопостоянства функции Ляпунова и ее производной по критерию Сильвестра установлено, что условие асимптотической устойчивости выполняется при определенных значениях коэффициента связи r :

$$\begin{vmatrix} G & \dots & -\left(RB - \frac{1}{2}C\right) \\ \dots & \dots & \dots \\ -\left(RB - \frac{1}{2}C\right)^T & \dots & r \end{vmatrix} > 0$$

или

$$r > \left(RB - \frac{1}{2}C\right)^T G_x^{-1} \left(BR + \frac{1}{2}C\right), \quad (2)$$

где R — некоторая положительно определенная матрица, квадратичная форма n координат, $Z = \dot{X}$; $G = -(A^T R + RA)$ — симметричная матрица.

В условие устойчивости не входят параметры нелинейной функции обратной связи. Однако коэффициент обратной связи r и функция

$F(\sigma)$ определяются характеристикой ГОП. В связи с этим при появлении существенной нелинейности, связанной с ограничением давления или расхода рабочей жидкости, неравенства (2) и $F(\sigma) > 0$ нарушаются. Следовательно, движение замкнутой нелинейной динамической системы не только не устойчиво, но и не управляемо.

Для обеспечения устойчивости движения замкнутой системы с обратной связью и высоких динамических свойств при ограниченной установочной мощности гидрообъемной передачи, ее объемно-габаритных и компоновочных размеров в конструкциях трансмиссий используются двухпоточные управляемые приводы (таблица). Анализ конструктивных решений, обеспечивающих высокие динамические свойства при ограниченной установочной мощности ГОП, показывает наличие существенных функциональных ограничений, приведенных в таблице.

Таблица

Конструктивные решения, обеспечивающие высокие динамические свойства при ограниченной мощности гидрообъемной передачи

Трансмиссия	Устройство, включаемое в дополнительный поток	Основные ограничения
Marder, HSWL-194	Разгрузочные гидромуфты с регулируемым наполнением	Недостаточное быстродействие, особенно при опорожнении; большая длительность переходных процессов, особенно при выходе из поворота, приводящая к режиму эволюционного движения
Гусеничная машина массой 19 т	Раздельное управление торможением гусеницы отстающего борта на низших передачах	Необходимость управления тормозным моментом с обратной связью по угловой скорости из условия $\omega_{\Phi} \leq \omega(\alpha_{шт}, \alpha_{пт})$
Гусеничная машина средней категории по массе	Подключение механической ветви через управляемый фрикцион, двойной дифференциал	Необходимость управления моментом фрикциона с обратной связью по угловой скорости из условия $\omega_{\Phi} \leq \omega(\alpha_{шт}, \alpha_{пт})$
Перспективная машина, Breadyly	Две бортовые гидрообъемные передачи	Синхронность функционирования, сложная программа управления

Например, конструкция системы управления останочными тормозами гусеничной машины на низших передачах позволяет увеличить поворачивающий момент за счет раздельного торможения гусеницы отстающего борта (см. таблицу, 2-я строка). Однако при торможении одной из гусениц при раздельном управлении тормозами, а также при заклинивании одной из гусениц в процессе аварийного сброса гидромотор переходит в режим гидронасоса. Такой режим

работы сопровождается раскруткой вала гидронасоса с угловой скоростью, в несколько раз превышающей номинальную. Предохранительные клапаны силовых магистралей выполнены таким образом, что выдерживают давление при этом режиме выше, чем при номинальном. Поэтому происходит перегрузка ГОП и разрушение ее деталей. В связи с этим в автоматизированную систему управления движением необходимо ввести устройство, предохраняющее ГОП от перегрузок.

Для машин с дифференциальным ГОМП снижение скорости поступательного движения в результате уменьшения подачи топлива (частоты вращения вала двигателя), как показано ранее, недопустимо, так как это приводит к снижению угловой скорости гидромотора и скорости поворота машины и еще в большей степени снижает динамические характеристики. Торможение в процессе поворота недопустимо, так как затрудняется возможность криволинейного движения. Некоторый эффект может быть достигнут при упреждающем переключении передач в ГМТ на номер ниже и соответствующем увеличением подачи топлива. Для повышения динамических свойств и управляемости гусеничной машины с ограниченной мощностью ГОП путем использования кинетической энергии поступательного движения (инерционных сил при замедлении) конструкция МП и управление им должны иметь регулируемый в зависимости от скорости кинематический параметр q , определяющий расстояние от центра масс до точки, сохраняющей при повороте скорость прямолинейного движения. Это может быть реализовано при двух бортовых ГОП (см. таблицу, 4-я строка). Проведенные всесторонние экспериментальные исследования управляемости гусеничных машин с такой системой управления показали, что параметры, характеризующие переходные процессы этих гусеничных машин несколько выше, чем аналогичные параметры машин с обычной системой управления, что обеспечивает более высокие скоростные и динамические свойства. Такое решение, позволяет не только снизить нагруженность гидрообъемной передачи, но и при одновременном управлении расширить кинематический диапазон трансмиссии, осуществить синхронизацию включаемых элементов в процессе переключения передач. В этой схеме управления возникает проблема асинхронности работы гидрообъемных передач из-за нелинейности характеристик, разности моментов на ведущих колесах, необходимости стабилизации прямолинейного движения, а также сложности программы управления, так как при данной системе управления угловая скорость поворота является неоднозначной функцией трех управляющих воздействий: $\alpha_{шт}$, γ_1 и γ_2 .

Схема такого механизма сложнее дифференциального из-за необходимости установки двух гидромашин. Усложняется также система и программа управления поворотом.

Выводы. 1. Реализация скоростных качеств быстроходных гусеничных машин на дорогах с деформируемым основанием и интенсивно изменяющимся направлением движения, в том числе по тестовой “змейке”, существенно зависит от удельной мощности. При значениях этого параметра меньше 20 кВт/т скоростные свойства машин, оснащенных системой управления поворотом с дискретными свойствами, не ниже, чем машин с непрерывными свойствами МП, но это достигается более высокой интенсивностью управляющей деятельности водителя – число включений механизма поворота на километр пути возрастает в 6...9 раз.

2. При движении по малодеформируемому грунту подвижность машин с дискретными свойствами системы управления поворотом весьма ограничена и не превышает 35...38 км/ч, т.е. в 1,3 раза меньше по сравнению с непрерывными свойствами МП. Основными ограничениями скорости движения гусеничной машины с такой системой управления поворотом являются условия вписываемости в заданный коридор. Эти условия определяются качеством переходных процессов, коэффициентом фазовой напряженности, быстродействием системы переключения передач, высоким значением “быстрых” боковых ускорений ($10...11 \text{ м/с}^2$), превышающих сцепные свойства грунта и не компенсируемых водителем из-за ограничений его психофизиологических возможностей как звена обратной связи.

3. Динамические явления (дивергенция параметров траектории), ограничивающие управляемость, могут быть частично компенсированы соответствующими приемами вождения, а при синтезе программ автоматического управления уменьшается их влияние.

4. Эффективным путем повышения управляемости и подвижности машин на дорогах с интенсивным изменением направления движения при ограничениях мощности системы управлением поворотом наряду с совершенствованием известных решений является синтез систем с регулируемым кинематическим параметром, что позволяет повысить качество переходных процессов поворота, используя кинетическую энергию поступательного движения машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благонравов А. А., Держанский В. Б. Динамика управляемого движения гусеничной машины. – Курган: Изд-во КМИ, 1995. – 162 с.
2. Савочкин В. А., Дмитриев А. А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
3. Исследование характеристик криволинейного движения мобильного робототехнического комплекса / В.В. Серебрянный, Г.О. Котиев, И.В. Рубцов и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. – № 4.

Статья поступила в редакцию 28.11.2007

Виктор Борисович Держанский родился в 1947 г., окончил Курганский машиностроительный институт в 1971 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой гусеничных машин Курганского государственного университета. Автор 125 научных работ и 22 изобретений в области динамики управляемого движения транспортных машин.



V.B. Derzhanskiy (b. 1947) graduated from the Kurgan Institute for Mechanical Engineering in 1971. D. Sc. (Eng.), professor, head of department for caterpillars of the Kurgan State University. Author of 125 publications and 22 inventions in the field of dynamics of the controlled motion of vehicles.

Игорь Александрович Тараторкин родился в 1966 г., окончил Курганский машиностроительный институт в 1989 г. Канд. техн. наук, научный сотрудник ИМАШ УрО РАН, доцент кафедры гусеничных машин Курганского государственного университета. Автор 34 научных работ и 2 изобретений в области динамики управляемого движения транспортных машин, прогнозирования динамической нагруженности.



I.A. Taratorkin (b. 1966) graduated from the Kurgan Institute for Mechanical Engineering in 1989. Ph. D. (Eng.), researcher of "IMASH" of Ural branch of RAS, assoc. professor, head of department for caterpillars of the Kurgan State University. Author of 34 publications and 2 inventions in the field of dynamics of the controlled motion of vehicles, prediction of dynamical loading.

Валерий Николаевич Наумов родился в 1941 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. Д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ. Профессор кафедры "Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 230 научных работ в области гусеничных и колесных машин.

V.N. Naumov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. D. Sc. (Eng.), Honored Worker of Science of RF. Professor of "Multipurpose Caterpillars and Mobile Robots" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 230 publications in the field of caterpillars and wheeled vehicles.

Константин Сергеевич Жебелев родился в 1955 г., Канд. техн. наук, заместитель генерального директора ОАО "Специальное конструкторское бюро машиностроения" (г. Курган), начальник центра компьютерных технологий и инженерных расчетов. Автор 22 научных работ в области исследований нагруженности и прочности узлов и механизмов гусеничных и колесных машин.

K.S. Zhebelev (b. 1955) — Ph. D. (Eng.), deputy general director of open stock company "Spetsial'noe konstruktorskoe byuro mashinoctroeniya" (town Kurgan), head of center for computer technologies and engineering design. Author of 22 publications in the field of investigations of loading and strength of units and mechanisms of caterpillars and wheeled vehicles.

Сергей Александрович Харитонов родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры СМ9 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 изобретений и 45 научных работ в области динамики управляемого движения транспортных машин, синтеза кинематических схем сложных планетарных механизмов.

S.A. Kharitonov (b. 1949) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of "Multi-purpose Caterpillars and Mobile Robots" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 inventions and 45 publications in the field of controlled motion of transport vehicles, synthesis of kinematic schemes of complex planetary mechanisms.