

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТНОГО ПОТОКА ПО ДВИЖИТЕЛЯМ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ НА ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

В.В. Ларин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: larin.lv20946@yandex.ru

Представлена оценка влияния законов распределения мощностного потока по движителям колесной машины на ее эксплуатационные свойства при прямолинейном и криволинейном движениях, обеспечиваемых электрической трансмиссией. Большое внимание уделено оценке использования пяти различных законов распределения мощностного потока по колесам с учетом ограниченности мощности тяговых электродвигателей. Оценка проведена для КМ 8×8 со схемами рулевого управления 12-00 и 1234.

Ключевые слова: колесная машина, мощность, управление, электрическая машина, тяговый привод, трансмиссия, опорная поверхность, колесо, сопротивление движению, тяга, тягово-экономическая характеристика, рулевое управление, поворотливость.

EFFECT OF LAWS OF POWER FLOW DISTRIBUTION OVER PROPULSION UNITS OF A WHEELED VEHICLE ON ITS OPERATION PROPERTIES

V.V. Larin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: larin.lv20946@yandex.ru

The effect of laws of power flow distribution over propulsion units of a wheeled vehicle on its operation properties is estimated for the straight and curvilinear movements ensured by electrical transmission. The great attention is paid to the estimation of application of five different laws of power flow distribution over the wheels taking into account the power limitation of traction electric-drives. The estimation is performed for KM 8×8 with steering control schemes of 12-00 and 1234.

Keywords: wheeled vehicle, power, control, electrical machine, traction drive, transmission, road surface, wheel, resistance to movement, thrust, thrust-economic characteristic, steering control, agility.

Движение колесной машины (КМ) осуществляется по различным маршрутам на разных участках местности, характеризующихся профилем и планом, неровностями и барьерными препятствиями, параметрами опорной поверхности (ОП). Надежная и экономичная работа КМ на всех участках обеспечивается оптимальным взаимодействием колесного движителя с ОП, одним из основных параметров для которого является подводимая к нему мощность (момент и угловая скорость).

Исследованию эффективности законов распределения мощностного потока по колесам КМ в последние годы уделяется большое внимание, особенно при использовании автоматических электрических и гидростатических трансмиссий. Предлагаются новые, не рассмотренные ранее законы, доказываются их эффективность в различных условиях эксплуатации КМ.

В отличие от КМ с механической трансмиссией, в которой при достаточной мощности силовой установки, ограничение подвижности определяется потерями в ней, а также прочностью ее узлов, в КМ с электрической трансмиссией ограничение возникает при недостаточной мощности тягового электродвигателя (ТЭД) одного из колес. Эта особенность ТЭД является серьезным ограничением применения электрической трансмиссии на многоосных КМ, предназначенных для работы на тяжелых участках местности.

Как правило, при проектировании ТЭД учитывают возможность движения КМ по горизонтальной ОП при максимальном сопротивлении (максимальный момент) и обеспечение максимальной скорости (мощность). В других условиях выбранных параметров ТЭД может быть недостаточно и это можно компенсировать только за счет оптимального закона распределения мощностного потока по колесам. Основными этапами движения КМ являются разгон, достижение максимальной скорости, преодоление подъемов и криволинейное движение.

В отличие от КМ с механической трансмиссией, в которой старт обеспечивается буксованием сцепления, и с гидродинамической трансмиссией с буксованием гидротрансформатора, в КМ с электрической трансмиссией необходимо для предотвращения интенсивного буксования колес задавать закон нарастания момента ТЭД. Старт обеспечивается возможностью устойчивой работы ТЭД при самых высоких значениях момента, начиная с нулевой скорости движения. Можно выбрать закон старта, обеспечивающий заданные условия. Например, на рис. 1 приведены разгонные характеристики КМ 8×8 с полной массой $m_m = 55$ т и мощностью ТЭД $N_{ТЭД} = 60$ кВт, обеспечивающие ее прямолинейное движение в широком диапазоне внешних условий. На рис. 1 в зависимости от скорости КМ v_{mx} и коэффициента сопротивления движению $\Psi = f_{шм} \cos \alpha_{ОПx} + \sin \alpha_{ОПx}$ (где $f_{шм}$ — коэффициент сопротивления качению колес КМ, $\alpha_{опx}$ — угол преодолеваемого подъема) представлены зависимости изменения динамического фактора $D_{ф}$, продольного ускорения a_{mx} , времени $t_{раз}$ и пути $s_{раз}$ разгона [1].

При расчетах рассматривалось условное изменение Ψ без учета $\alpha_{ОПx}$, влияющего на перераспределение нормальных реакций R_z , и не учитывалось ограничение продольных реакций R_x по сцеплению с ОП. Исследовано движение КМ по горизонтальной ОП с полной реализацией момента $M_{КМ}$ и мощности $N_{КМ}$ на колесных движителях.

В действительности моменты и мощность на колесах ограничиваются сцеплением, характеристиками ТЭД и законами их управления. Поэтому дальнейший анализ проведем с учетом реального движения

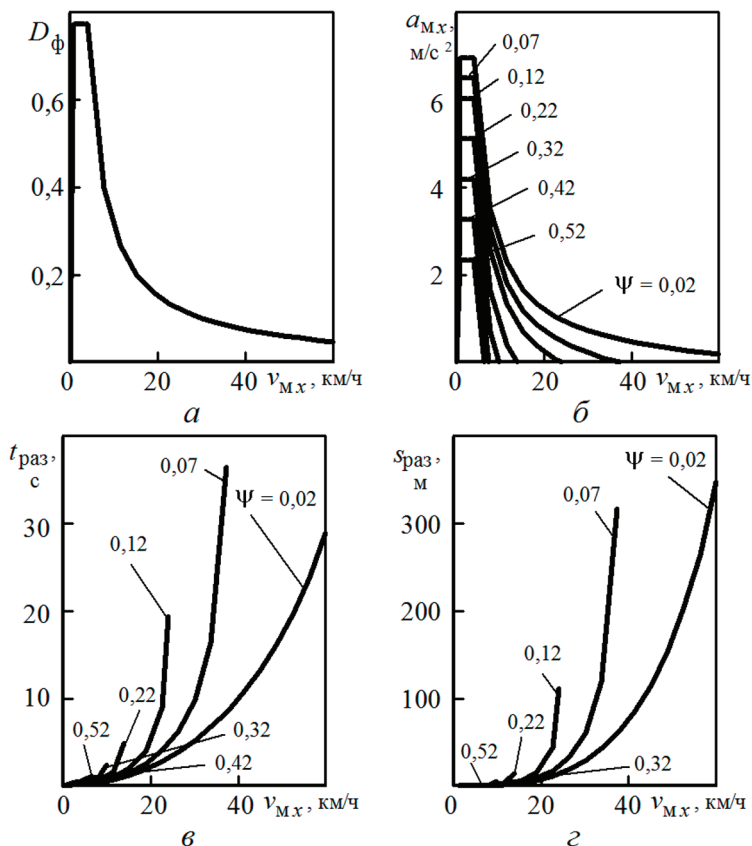


Рис. 1. Тягово-скоростные характеристики КМ 8×8 с полной массой 55 т

КМ, характеристик ТЭД и законов управления ими. Рассмотрим движение КМ с различными законами распределения мощностного потока по колесам, обеспечивающими выполнение технических требований с наибольшей вероятностью и наименьшими затратами энергии.

Опорная поверхность — песок пылеватый плотный: плотность $\rho_r = 1,69 \text{ т/м}^3$; коэффициент пористости $e = 0,568$; угол внутреннего трения $\phi_r = 32^\circ$; связанность $c_r = 0,005 \text{ МПа}$; модуль общей деформации $E_r = 12,5 \text{ МПа}$; толщина слоя $H_r = 0,5 \text{ м}$. Используется модель прямолинейного качения эластичного колеса, приведенная в работе [2]. Рассмотрим законы распределения мощностного потока по колесам: $\omega_{ki} = \text{const}$ (блокированная трансмиссия); $M_{ki} = \text{const}$ (дифференциальная трансмиссия); $N_{ki} = \text{const}$ (рис. 2).

По сцеплению возможно преодоление $\alpha_{\text{ОПх}}^{\text{max}} = 26^\circ$ при значительном перераспределении нормальных реакций R_{zi} (рис. 2, а). Причем суммарный момент на колесном движителе КМ M_{KM} незначительно зависит от закона распределения мощностного потока и скорости движения (см. рис. 2, а; для всех схем и скоростей точки лежат на одной прямой). Коэффициент мощности сопротивле-

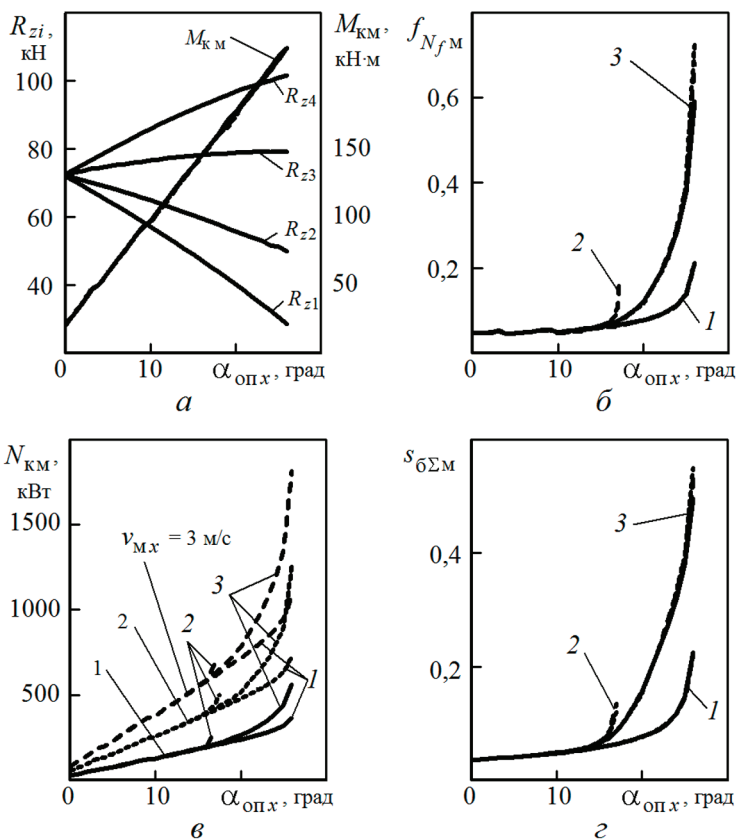


Рис. 2. Параметры прямолинейного движения КМ 8×8 с различными схемами распределения мощного потока на подъем по сухому плотному песку толщиной $0,5$ м со скоростями $1, 2$ и 3 м/с:

$1 - \omega_{ki} = \text{const}$; $2 - M_{ki} = \text{const}$; $3 - N_{ki} = \text{const}$

ний $f_{N_{fM}} = N_c / (m_m g v_{Mx})$ (рис. 2, б), мощность, подведенная к колесам N_{KM} (рис. 2, в), коэффициент общего продольного скольжения $s_{\delta\Sigma} = 1 - \bar{r}_k / r_{св}$ (рис. 2, г) минимальны в зоне $\alpha_{ОПx} = 14 \dots 26^\circ$ при $\omega_{ki} = \text{const}$. Закон $N_{ki} = \text{const}$ в этой зоне значительно уступает ему, а закон $M_{ki} = \text{const}$ не обеспечивает движение КМ. В диапазоне $\alpha_{ОПx} = 0 \dots 14^\circ$ различие выходных параметров КМ при этих законах ничтожно мало.

На рис. 3 приведено распределение мощности по колесам осей. При $\alpha_{ОПx}^{\text{max}} = 26^\circ$ движение КМ возможно по закону $\omega_{ki} = \text{const}$ (рис. 3, а) при незначительном превышении максимальной мощности ТЭД ($N_{ТЭД}^{\text{max}} = 60$ кВт) на колесах четвертой оси, что кратковременно допустимо. При $N_{ki} = \text{const}$ (рис. 3, в) необходимая мощность ТЭД превышена на колесах всех осей, а энергозатраты на движение превосходят закон $\omega_{ki} = \text{const}$ более чем в 3 раза (см. рис. 2, б).

В работе [3] для повышения подвижности КМ предлагается использовать закон распределения моментов по колесам пропорциональ-

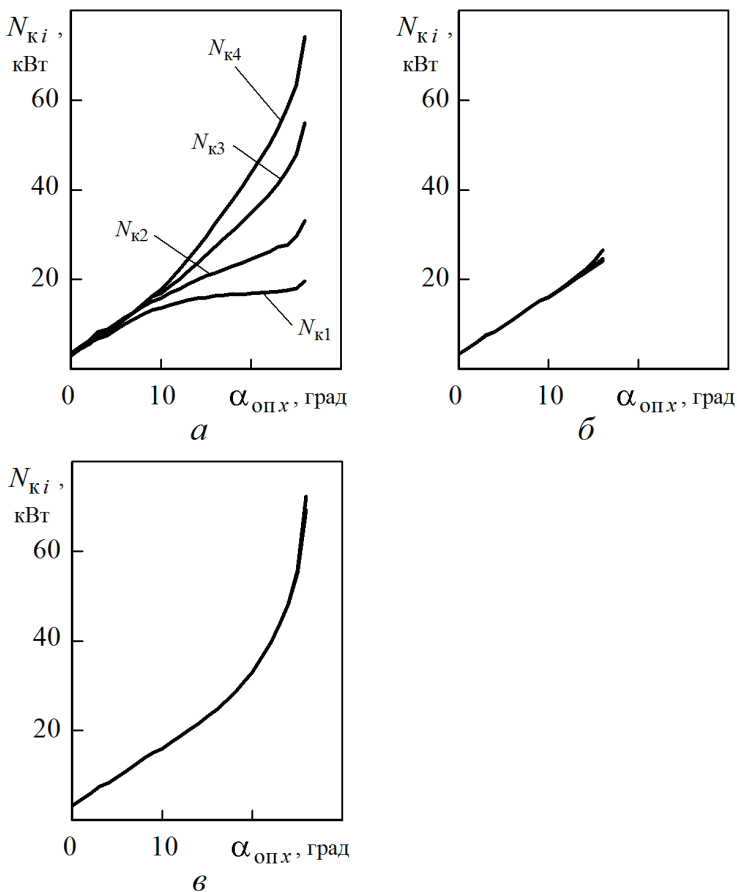


Рис. 3. Изменение мощности на колесах КМ при скорости 1 м/с и разных законах распределения мощностного потока:

a — $\omega_{ki} = \text{const}$; *б* — $M_{ki} = \text{const}$; *в* — $N_{ki} = \text{const}$

но нормальным нагрузкам (или реакциям) $\tilde{M}_{kzi} = M_{ki}/R_{zi} = \text{const}$. На рис. 4 представлено изменение \tilde{M}_{kzi} для рассмотренных законов, из которого следует, что при законе $\omega_{ki} = \text{const}$ (рис. 4, *a*) почти идеально (с незначительной погрешностью) обеспечивается предлагаемый закон $\tilde{M}_{kzi} = \text{const}$. Поэтому при прямолинейном движении по ровной ОП усложнение системы управления, учитывающей распределение нормальных реакций и моментов по колесам для обеспечения закона $\tilde{M}_{kzi} = \text{const}$, считаем неоправданным.

При оценке криволинейного движения использовалась модель криволинейного движения эластичного колесного движителя, представленная в работе [2]. Входным параметром был угол поворота задающего колеса $\theta_{1\text{вн}}$ (переднего внутреннего), являющийся максимальным по сравнению с углами поворота остальных колес. Анализируемые параметры: $N_{\text{КМ}}$ — суммарная мощность на колесных движителях; $x_{\text{п}}$ — смещение полюса поворота; $R_{\text{п}}$ — расчетный радиус поворота;

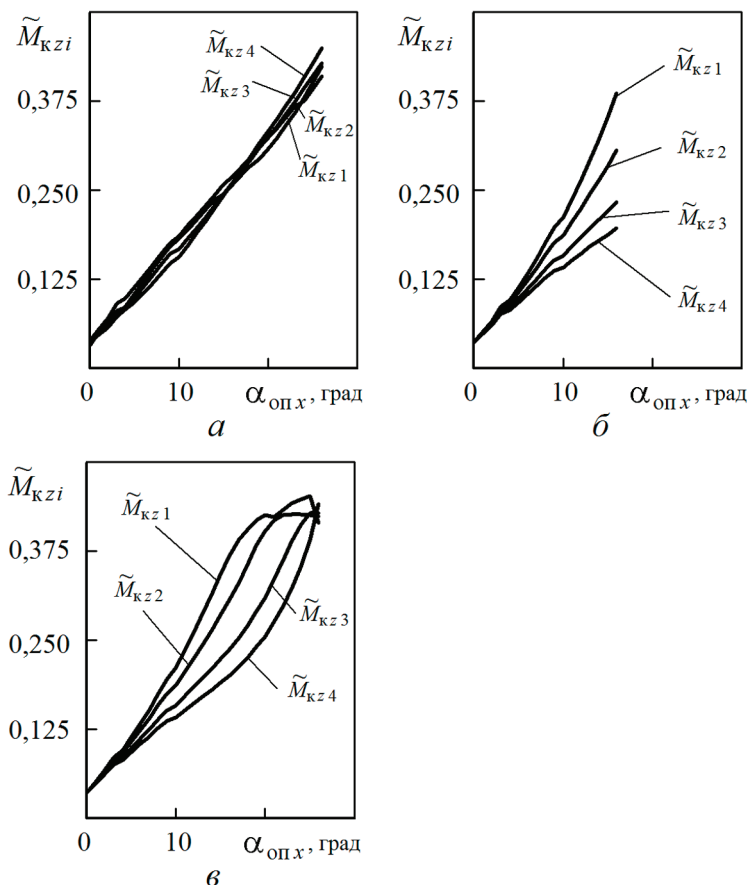


Рис. 4. Изменение относительного момента по колесам $\tilde{M}_{kzi} = M_{ki}/R_{zi}$ при скорости 1 м/с и разных законах распределения мощностного потока:
а – $\omega_{ki} = \text{const}$; *б* – $M_{ki} = \text{const}$; *в* – $N_{ki} = \text{const}$

N_{ki} , M_{ki} – мощность и крутящий момент на колесных движителях соответственно; R_{zi} , R_{yi} – реакции нормальные и боковые на колесных движителях соответственно.

Рассматривалось пять законов распределения мощностного потока: $\omega_{ki} = \text{const}$, $M_{ki} = \text{const}$, $N_{ki} = \text{const}$, $s_{\delta\Sigma ki} = \text{const}$, $\tilde{M}_{kzi} = M_{ki}/R_{zi} = \text{const}$. На рис. 5 представлены расчетные характеристики КМ 8×8 со схемой рулевого управления (РУ) 12-00 при установившемся криволинейном движении со скоростями 1, 5, 10 и 15 м/с (3,6; 18,0; 36,0 и 54,0 км/ч).

Следует отметить, что при законе $\omega_{ki} = \text{const}$ возникает циркуляция мощности, при которой мощности по колесам бортов имеют разные знаки, и суммарное значение подводимой мощности $N_{км}$ уменьшается. Однако в электрической трансмиссии при отсутствии рекуперации мощности энергозатраты возрастут почти в 2 раза. При малых скоростях (1 и 5 м/с), даже при суммировании мощностей с разными

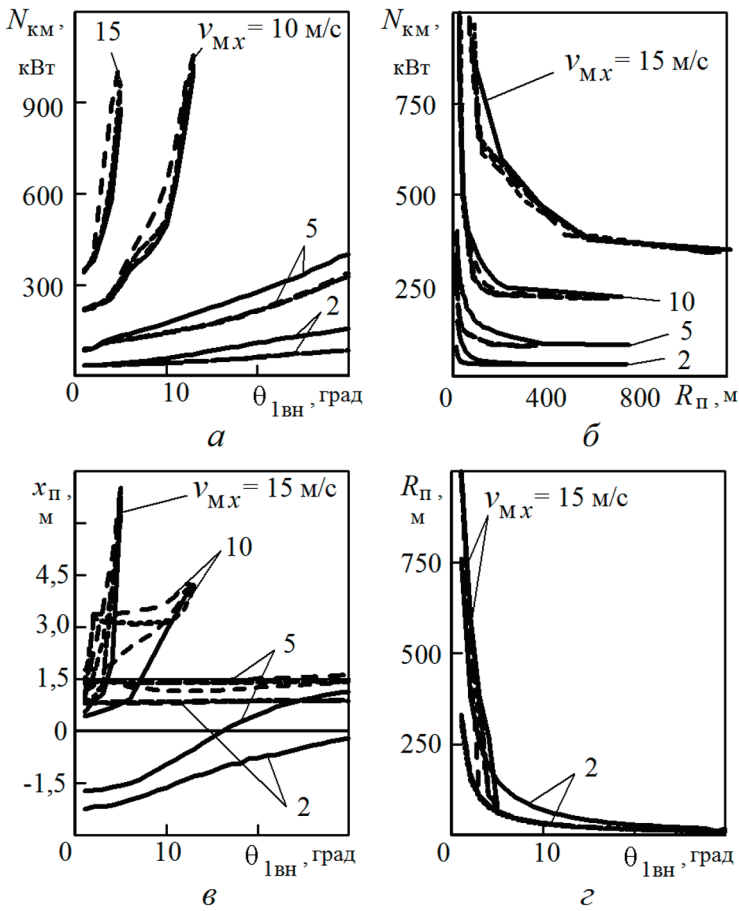


Рис. 5. Изменение параметров криволинейного движения КМ:

— — ω_{ki} ; - - - - M_{kzi} ; - - - - $s_{6\Sigma ki}$; - - - - \bar{M}_k

знаками, затраты мощности N_{KM} при $\omega_{ki} = \text{const}$ значительно больше, чем при других законах распределения мощности, при которых затраты мощности различаются незначительно. При высоких скоростях (10 и 15 м/с) затраты мощности от угла θ_{1BH} стабилизируются, причем наихудшим становится закон $M_{kzi} = \text{const}$ (рис. 5, а).

Поскольку с изменением скорости КМ и угла θ_{1BH} изменяется положение мгновенного центра поворота O_{Π} (x_{Π} и R_{Π}), то поворотливость КМ правильнее оценивать по зависимости $N_{KM}(R_{\Pi})$ (рис. 5, б), из которой следует, что на твердой ОП наихудшим является закон $\omega_{ki} = \text{const}$. При скоростях 10 и 15 м/с возникает боковое опрокидывание КМ (соответственно при $\theta_{1BH} = 14^\circ$ и 6°).

Смещение полюса поворота x_{Π} зависит от скорости существенно (рис. 5, в). При малых скоростях движения и законе $\omega_{ki} = \text{const}$ он отрицателен и с увеличением θ_{1BH} приближается к $x_{кин}$. Для остальных законов x_{Π} всегда положителен и незначительно возрастает с рос-

том $\theta_{1\text{вн}}$. При больших скоростях для всех законов характерно значительное увеличение $x_{\text{п}}$. Это явление необходимо учитывать при оценке профильной проходимости (маневренности и габаритной полосы движения) КМ [1]. На рис. 5, ε показано значительное различие $R_{\text{п}}$ при одинаковых углах $\theta_{1\text{вн}}$ и разных законах распределения мощностного потока.

Остановимся на детальной оценке влияния закона распределения мощностного потока при средней скорости движения КМ 5 м/с (рис. 6).

При законе $\omega_{ki} = \text{const}$ возникают значительные мощности на колесах движителях бортов (рис. 6, *а*), превышающие максимальные мощности ТЭД и имеющие разные знаки (положительные на колесах внутреннего борта и отрицательные — наружного). Существенно повышается момент сопротивления повороту и, как следствие, мощность, необходимая для движения. Можно заключить, что в данных условиях применение закона $\omega_{ki} = \text{const}$ неоправданно.

При использовании закона $M_{ki} = \text{const}$ (рис. 6, *б*) мощности на колесах бортов положительны, а их значения не превышают максимальных для ТЭД. Закон $N_{ki} = \text{const}$ (рис. 6, *в*) имеет преимущества над законом $M_{ki} = \text{const}$ по мощностям, необходимым для движения в этих условиях. Постоянство на колесах общего коэффициента продольного скольжения $s_{\delta\Sigma ki} = \text{const}$ (рис. 6, *г*) создает сложное изменение затрат мощности на колесах бортов, качественно близкое к закону $\omega_{ki} = \text{const}$. Однако моменты не превышают максимальных для ТЭД. Значения $s_{\delta\Sigma ki}$ не превышают 0,05.

При рассмотрении прямолинейного движения была проведена условная оценка закона $M_{kzi} = M_{kzi}/R_{zi} = \text{const}$, показавшая, что такой закон аналогичен закону $\omega_{ki} = \text{const}$. При криволинейном движении он, естественно, при наличии циркуляции мощности превосходит в данных условиях закон $\omega_{ki} = \text{const}$, однако не имеет преимуществ над другими законами по затрачиваемой мощности (рис. 6, *д*), а самое неприятное — при больших углах поворота колес и малых радиусах поворота необходимая мощность на колесах наружного борта превосходит максимальную для ТЭД.

При более высоких скоростях (см. рис. 5) движение КМ ограничено вероятностью бокового опрокидывания и недостатком мощности ТЭД. На рис. 7 приведены зависимости изменения мощности на колесах при криволинейном движении КМ со скоростью 10 м/с.

Движение КМ возможно на скоростях 10 и 15 м/с при законах $N_{ki} = \text{const}$ и $M_{ki} = \text{const}$ с радиусами поворота $R_{\text{п}} = 39$ и 306 м при углах поворота задающего колеса $\theta_{1\text{вн}} = 10^\circ$ и 3° . Некоторое преимущество имеет закон $N_{ki} = \text{const}$, позволяющий двигаться с меньшими

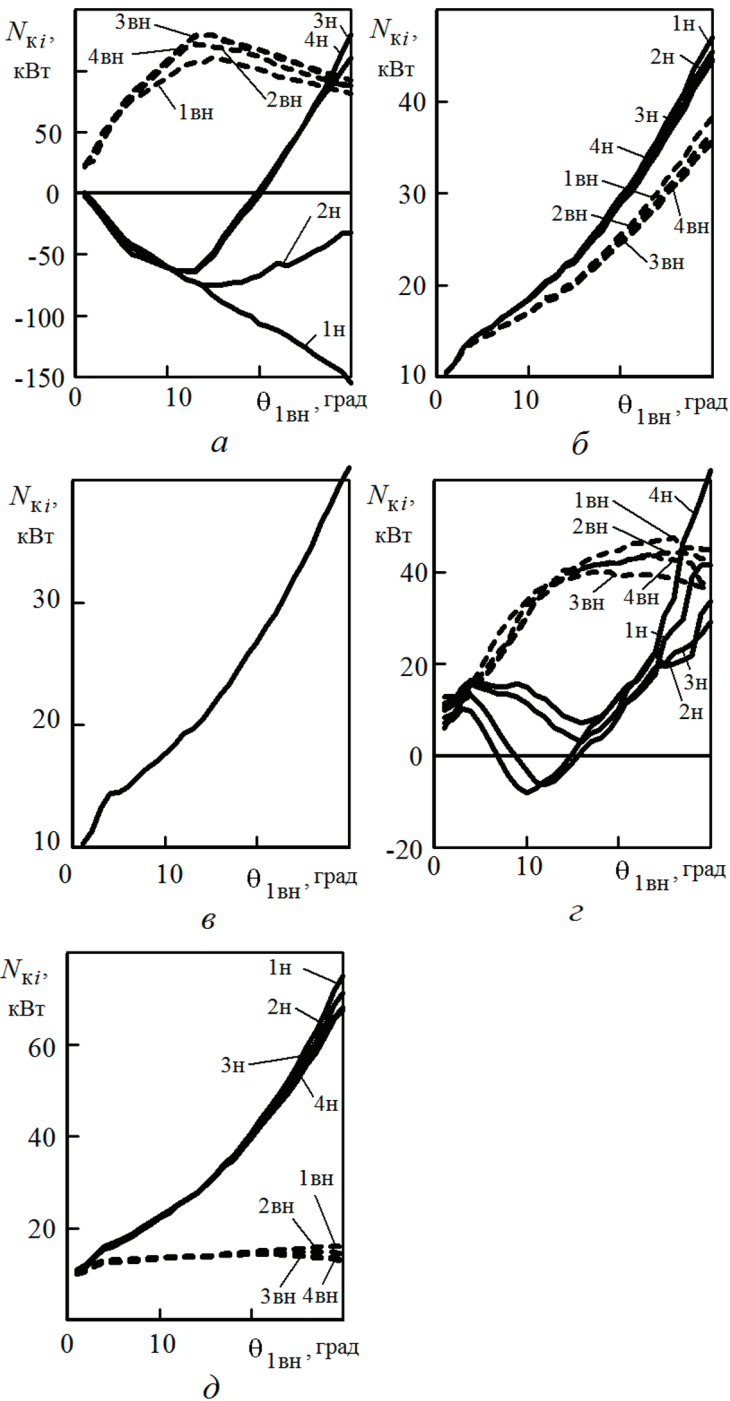


Рис.6. Изменение мощности на колесах внутреннего (вн) и наружного (н) бортов при криволинейном движении КМ со скоростью 5 м/с и разных законах распределения мощностного потока:

$a - \omega_{ki} = \text{const}$; $б - M_{ki} = \text{const}$; $в - N_{ki} = \text{const}$; $г - s_{\Sigma ki} = \text{const}$; $д - \bar{M}_{kzi} = M_{ki}/R_{zi} = \text{const}$

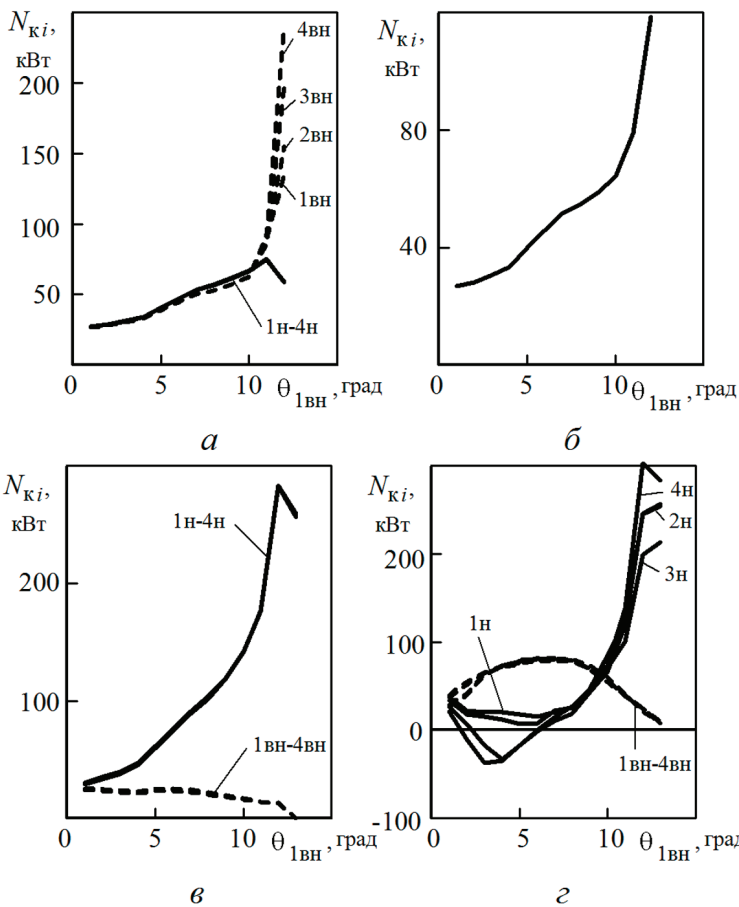


Рис. 7. Изменение мощности на колесах КМ 8×8 со схемой РУ 12-00 при скорости 10 м/с и разных законах распределения мощностного потока:

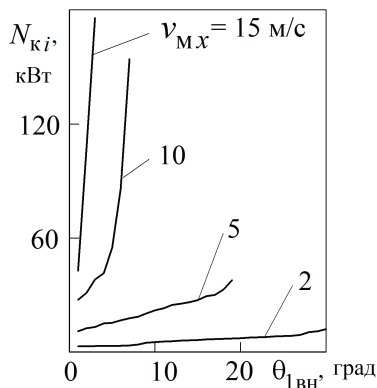
а – $M_{ki} = \text{const}$; *б* – $N_{ki} = \text{const}$; *в* – $\dot{M}_{kzi} = \text{const}$; *г* – $s_{\delta\Sigma ki} = \text{const}$

радиусами при незначительном превышении максимальной мощности ТЭД.

Для КМ 8×8 со схемой РУ 1234 справедливы аналогичные выводы. На рис. 8 представлены результаты расчета параметров его движения с законом распределения мощностного потока $N_{ki} = \text{const}$. При скорости 5 м/с и $\theta_{1ВН} = 20^\circ$ возникает буксование одного из колес и движение невозможно. На скоростях 10 и 15 м/с возникает боковое опрокидывание при $\theta_{1ВН} > 7^\circ$ и 3° соответственно с углом крена корпуса $\alpha_{кпу} = 10^\circ$.

Представленные результаты получены при движении КМ по относительно прочной ОП, когда заглупление грунтозацепов при малых боковых силах не превышало 15 мм, а при больших – 25 мм, т.е. не превосходило высоты грунтозацепа. На результаты значительно влияет большая высота центра масс исследуемой КМ. На более деформируемых ОП закон распределения мощностного потока $N_{ki} = \text{const}$ не

Рис. 8. Изменение мощности на колесах при криволинейном движении КМ 8×8 со схемой РУ 1234 при различных скоростях и законе $N_{ki} = \text{const}$



всегда предпочтителен и необходимо провести дополнительные исследования об оптимальности применяемых законов, учитывая ограничения мощности используемых ТЭТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларин В. В. Теория движения полноприводных колесных машин: Учебник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 391 с.
2. Ларин В. В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колесных машин на местности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 224 с.
3. Горелов В. А., Котиев Г. О., Мирошниченко А. В. Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2012. № 1. С. 49–59.

REFERENCES

1. Larin V. V. Teoriya dvizheniya polnoprivodnykh kolesnykh mashin [The theory of motion of all-wheel drive vehicles]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010, 391 p.
2. Larin V. V. Metody prognozirovaniya opornoj prokhodimosti mnogoosnykh kolesnykh mashin na mestnosti [Methods for predicting the bearing flotation ability of multi-axial wheeled vehicles on terrain]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007, 224 p.
3. Gorelov V. A., Kotiev G. O., Miroshnichenko A. V. The development of a control law for the individual propulsion drive of a multi-wheeled vehicle. Izvestiya Vuzov. Ser. Mashinostroenie, 2012, no. 1, pp. 49–59 (in Russian).

Статья поступила в редакцию 2.07.2012

Василий Васильевич Ларин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Колесные машины” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области проходимости колесных машин и двух монографий.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

V.V. Larin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Wheeled Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 40 publications and two monographs in the field of cross-country ability.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.