

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

*Б.Н. Гомберг\**, *С.В. Кондаков\**, *Л.С. Носенко\*\**, *О.О. Павловская\**

*\* г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет*

*\*\* г. Челябинск, НПО «Электромашина»*

## SIMULATION MODELING OF MOTION OF A HIGH-SPEED TRACKED VEHICLE WITH ELECTRIC TRANSMISSION

*B.N. Gomberg\**, *S.V. Kondakov\**, *L.S. Nosenko\*\**, *O.O Pavlovskaya\**

*\* Chelyabinsk, South Ural State University*

*\*\* Chelyabinsk, NPO "Electromachina"*

Предложена математическая модель быстроходной гусеничной машины с электрической трансмиссией и приведены результаты имитационного моделирования криволинейного движения.

*Ключевые слова:* быстроходная гусеничная машина, математическая модель, электрическая трансмиссия, механизм поворота, управление электродвигателем.

The article describes a mathematical model of a high-speed tracked vehicle with electric transmission and the results of simulation modeling of curvilinear motion.

*Keywords:* high-speed tracked vehicle, a mathematical model, electric transmission, turning mechanism, control of electric motor.

Интерес к электрическим трансмиссиям со стороны конструкторов быстроходных гусеничных и колесных машин специального назначения растет по мере внедрения все более компактных и энергонасыщенных электромашин и силовых преобразователей.

В частности, фирма «Магнет мотор» (ФРГ) в 1986 году изготовила и провела испытания колесной машины с формулой 4х4 и дизельным двигателем внутреннего сгорания (ДВС) 240 кВт [1]. В следующем году установили электрическую трансмиссию на гусеничную боевую машину пехоты (БМП) «Мардер» с ДВС 440 кВт при мощности двух бортовых электродвигателей (ЭД) по 750 кВт каждый. В статье [1] указано, что преимущество центральной трансмиссии со вторым потоком мощности от ДВС к ведущим колесам состоит в меньшей установочной мощности каждого из ЭД, а преимущество бортовой схемы – в компоновке и в отказе от механических дифференциалов, суммирующих мощности двух потоков. В начале 90-х годов фирмой «Магнет мотор» выпущена многоколесная машина с формулой 8х8 полной длиной 7,06 м, шириной 3,01 м, массой 32 т, ДВС мощностью 600 кВт, с восьмью ЭД мощностью 70–80 кВт, установленными непосредственно в колесах [1].

В РФ также ведутся работы по внедрению электрических трансмиссий, в частности изготовлен образец и проведены испытания быстроходной

гусеничной машины (БГМ) с электрической трансмиссией, выполненной по бортовой схеме, в которой генератор соединен непосредственно с ДВС, а два исполнительных вентильных электродвигателя (ВД) через бортовой редуктор с ведущими колесами. Установочная мощность генератора – 320 кВт, ВД – по 320 кВт каждый. Получен в целом положительный результат, однако в процессе испытаний выявлен эффект, не имеющий теоретического толкования: при движении по полигону перегревался ВД только одного борта.

**Задачей данной работы является создание математической модели движения исследуемой БГМ с электротрансмиссией, объясняющей полученный эффект, что позволит в дальнейшем выработать рекомендации по модернизации системы управления электромашинами.**

*Основные исходные данные для моделирования.*

1. Расчетная схема движения БГМ на местности. Расчетная схема плоско-параллельного движения БГМ в декартовых координатах с курсовым углом  $\varphi$  приведена на рис. 1:  $X, Y$  – декартовы координаты,  $\varphi$  – курсовой угол, МЦВ – мгновенный центр вращения,  $F_1, F_2$  – силы сопротивления на отстающем и забегающем борту,  $V_c$  – линейная скорость центра тяжести,  $\chi$  – продольное смещение полюса поворота,  $L$  – продольная база машины,  $B$  – поперечная база машины,  $x_1$  – поперечное смещение полюса поворота отстающей гусеницы,

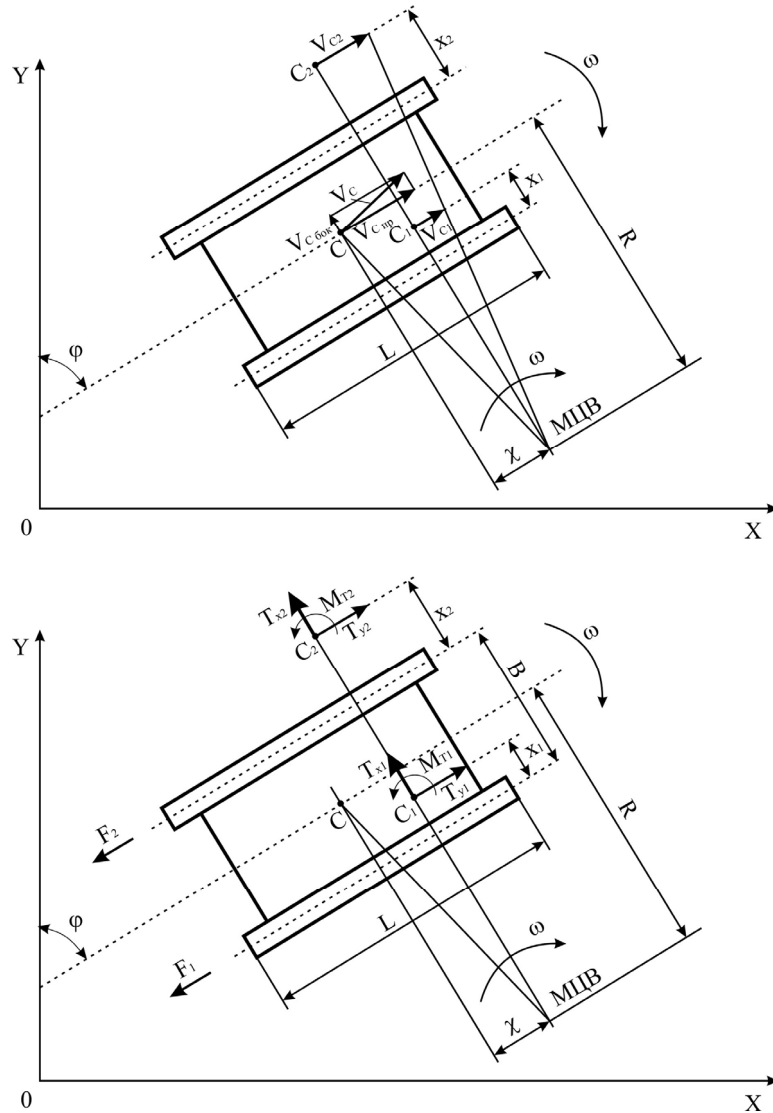


Рис. 1. Расчетная схема

$x_2$  – поперечное смещение полюса поворота забегавшей гусеницы,  $V_{C \text{ боk}}$  – составляющая  $V_C$ , направленная перпендикулярно оси корпуса машины,  $V_{C \text{ пр}}$  – составляющая  $V_C$ , направленная вдоль оси корпуса машины,  $T_{x1}$ ,  $T_{y1}$  – составляющие результирующей силы трения отстающей гусеницы о грунт,  $T_{x2}$ ,  $T_{y2}$  – составляющие результирующей силы трения забегавшей гусеницы о грунт,  $M_{T1}$ ,  $M_{T2}$  – результирующие моменты трения отстающей и забегавшей гусениц относительно полюсов поворота  $C_1$  и  $C_2$  соответственно,  $\omega = d\phi/dt$  – угловая скорость поворота корпуса,  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$  – скорости полюсов поворота отстающей и забегавшей гусениц соответственно.

Основные уравнения связей, характеризующие взаимодействие гусениц с грунтом, перераспределение веса машины при повороте по бортам, формирование тяговых усилий на гусеницах, сопротивление прямолинейному движению и повороту БГМ взяты из работ [3, 4].

2. Математическая модель движения БГМ с электрической трансмиссией получена на основе работ [2–6], где учтены основные потери в электрических машинах – механические, магнитные и электрические:

$$\frac{d^2 X_c}{dT^2} = [(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \sin \varphi + R_0 \cos \varphi] \frac{g}{G}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2 Y_c}{dT^2} = [(P_2 + P_1 - Pf_1 - Pf_2) \cos \varphi - R_0 \sin \varphi] \frac{g}{G}; \quad (2)$$

$$\frac{d^2 \phi}{dT^2} = \left[ (P_2 - P_1 + Pf_1 - Pf_2) \frac{B}{2} - \text{sign} \frac{d\phi}{dT} M_c \right] \frac{1}{J_c}; \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_{\text{эп}}}{dT} = [M_0 - M_{\text{эп}}] \frac{1}{J_1}; \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_{\text{од1}}}{dT} = \left[ M_{\text{эод1}} - \frac{P_1 R_{\text{вк}}}{i_{\text{он}}} \right] \frac{1}{J_2}; \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_{эд2}}{dT} = \left[ M_{эд2} - \frac{P_2 R_{вк}}{i_{бп}} \right] \frac{1}{J_3}. \quad (6)$$

В системе уравнений (1)–(6) использованы следующие обозначения:  $T$  – текущее время, с;  $X_c, Y_c$  – координаты центра тяжести машины, м;  $\varphi$  – курсовой угол, рад;  $\omega_{гн}, \omega_{эд1}, \omega_{эд2}$  – частоты вращения генератора и электродвигателей, рад/с;  $G$  – вес машины, Н;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $P_1, P_2$  – силы тяги на ведущих колесах, Н;  $Pf_1, Pf_2$  – сопротивление передвижению колес, Н;  $R_6$  – сила сопротивления боковому перемещению всех колес, определяемая как сумма поперечных составляющих сил трения колес о грунт;  $J_c, J_1, J_2, J_3$  – момент инерции корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести, моменты инерции двигателя и генератора, бортовых электродвигателей с присоединенными к ним массами, кг·м<sup>2</sup>;  $M_c, M_d, M_{гн}, M_{эд1}, M_{эд2}$  – моменты сопротивления повороту БГМ, двигателя внутрен-

него сгорания, генератора, электродвигателей соответственно, Н·м;  $R_{вк}$  – радиус ведущего колеса, м;  $i_{бп}$  – передаточное число бортовой передачи.

В уравнении (4) участвует момент ДВС  $M_d$ , статическая характеристика которого приведена на рис. 2.

3. Структурная схема и описание работы моторно-трансмиссионной установки [2], состоящей из дизельного ДВС мощностью 320 кВт, генератора переменного тока с номинальным напряжением 900 В, выпрямителя, двух ВД, установленных по бортовой схеме и снабженных преобразователями силовыми (ПС) (рис. 3). Статорная обмотка каждого ВД состоит из двух частей (2 витка и 4 витка в фазе), которые могут соединяться последовательно, что позволяет реализовать два режима, отличающиеся механическими характеристиками (рис. 4).

Согласно [10] ВД описывается системой нелинейных уравнений седьмого порядка и алгеб-

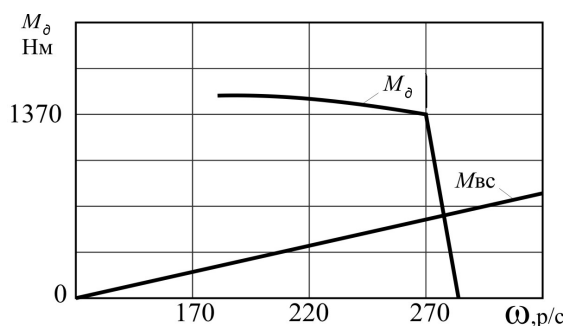


Рис. 2. Статические характеристики двигателя: зависимость момента двигателя от газовых сил  $M_d$  и момента внутреннего сопротивления  $M_{вс}$  от частоты вращения

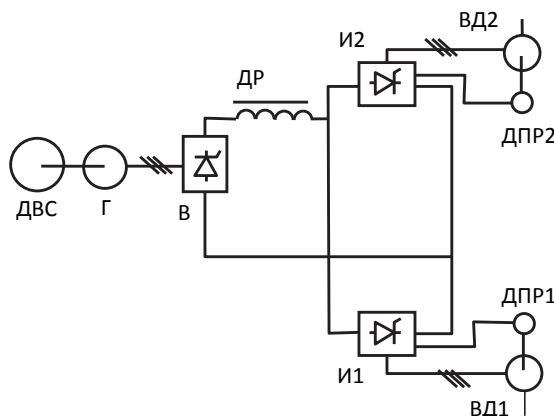


Рис. 3. Структурная схема электропривода БГМ

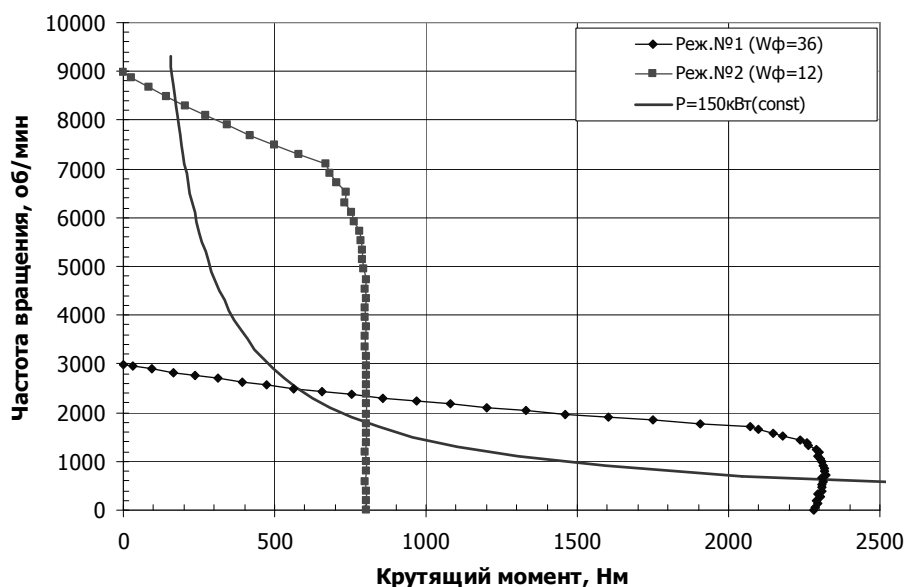


Рис. 4. Механическая характеристика ВД

раических уравнений. Для решения поставленной прикладной задачи нет необходимости в использовании полной модели, упомянутой выше. Поэтому авторы статьи при составлении математического описания ВД по примеру некоторых исследователей [6, 10, 12] приняли ряд упрощающих допущений, позволяющих построить математическую модель на базе непрерывных динамических уравнений Парка–Горева и при этом представить момент вращения, ток и напряжение их средними значениями.

Эти допущения в основном сводятся к следующему: 1) предполагается «гладкость» подводимых напряжений и отсутствие коммутационных процессов, связанных с отключением фаз, по которым проходят токи; 2) принимается, «что углы опережения, коммутации и запаса изменяются настолько быстро по сравнению с другими параметрами, что могут рассматриваться как непрерывные величины по средним значениям» [10]. При таких допущениях, в особенности при угле опережения  $\delta=0$ , механические характеристики ВД практически полностью аналогичны соответствующим характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

В связи с вышеизложенным, по мнению авторов, поставленная в исследовании задача может быть достаточно корректно решена без учета особенностей характеристик ВД, на базе известных уравнений для двигателя постоянного тока [5]:

– для генератора

$$U_{гн} = E_{гн} - r_{гн} I_{гн}, \quad (7)$$

где  $r_{гн}$  – сопротивление силовой цепи генератора, Ом;  $U_{гн}$  – напряжение, выдаваемое генератором в сеть, В;  $E_{гн}$  – ЭДС генератора, В;

$$M_{гн} = C_e \Phi_{гн} I_{гн}, \quad (8)$$

где  $M_{гн}$  – момент на валу генератора, Н·м;  $C_e$  – постоянная для данной машины величина;  $\Phi_{гн}$  – магнитный поток, Вб;  $I_{гн}$  – ток, А;

$$E_{гн} = \Phi_{гн} C_e \omega_{гн}, \quad (9)$$

где  $\omega_{гн}$  – угловая скорость вращения вала генератора;

– для электродвигателей, работающих в двух режимах:

$$M_{эд} = I_{эд} 2,95, \quad \omega_{эд} = E_{эд} / 2,95 \quad \text{при } r_{36} = 0,054 \text{ Ом,}$$

$$M_{эд} = I_{эд} 0,98, \quad \omega_{эд} = E_{эд} / 0,98 \quad \text{при } r_{12} = 0,018 \text{ Ом,}$$

где  $I_{эд}$ ,  $E_{эд}$ ,  $M_{эд}$ ,  $\omega_{эд}$  – ток, ЭДС, момент и угловая скорость ВД, коэффициенты 2,95 и 0,98 являются произведением  $C_e \Phi_{эд}$  для ВД.

В модели учтены [2] мощность магнитных потерь в ВД  $P_m = (0,0001146n^2 + 1/016n)/1000$ ,

кВт и мощность электрических потерь в ВД  $P_{эл} = 2r_{36}I_{эдф}^2 / 1000$ , кВт, где  $n=2\pi\omega/60$ .

В соответствии со структурной схемой электропривода трансмиссии БГМ, рис. 3, и с учетом допущений, обоснованных в работах [10,12] в расчете статического равновесия токов и напряжений применена схема замещения, представленная на рис. 5. Одним из главных допущений является неучет индуктивностей в структуре электропривода с ВД, что считается допустимым при их малых значениях.

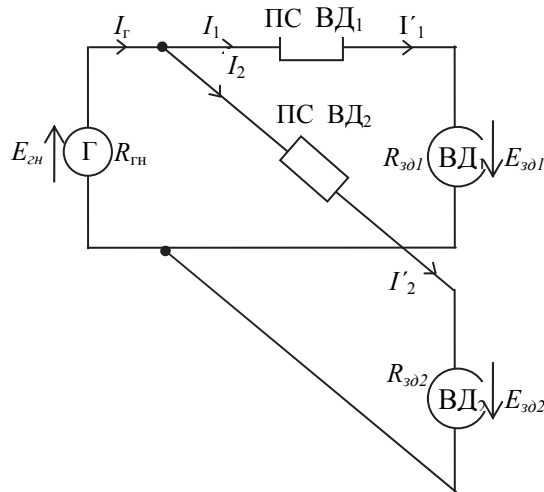


Рис. 5. Схема замещения электропривода БГМ

Основные соотношения между токами в ветвях определены на основании законов Кирхгофа:

$$I_{г} = I_1' + I_2'', \quad (10)$$

$$U_{г} = \frac{E_{гн} R_{эд1} R_{эд2} + E_{эд1} R_{гн} R_{эд2} + E_{эд2} R_{гн} R_{эд1}}{R_{эд1} R_{эд2} + R_{гн} R_{эд2} + R_{гн} R_{эд1}}, \quad (11)$$

где  $R_{гн}$ ,  $R_{эд1}$ ,  $R_{эд2}$  – сопротивления статорных обмоток генератора и двух ВД.

Использование схемы замещения позволило установить параметры статического равновесия внутри электрической системы Г–2ВД (генератор – два параллельно соединенных ВД) и использовать эти параметры при моделировании движения БГМ с электрической трансмиссией в среде VISSIM.

*Результаты имитационного моделирования* «почти прямолинейного» движения по грунту с различными параметрами по бортам ( $\psi_1=0,08$ ,  $\psi_2=0,1$  – коэффициенты сопротивления по бортам;  $\varphi_1=0,325$ ,  $\varphi_2=0,21$  – коэффициенты сцепления по бортам;  $P_1=5\sigma_1$ ,  $P_2=2\sigma_2$  – зависимости силы тяги от буксования по бортам) приведены на рис. 6. Скорость установившегося движения БГМ равна 8,4 м/с (30 км/ч).

Из рис. 6 видно, что на одном борту  $I_1=411$  А, а на другом  $-I_2=340$  А при  $U_{г}=407$  В,  $E_{г}=448$  В,  $E_{эд1}=385$  В,  $E_{эд2}=389$  В, следовательно, различия в нагрузке ВД появляются даже при незначительном различии тягово-сцепных свойств грунта.

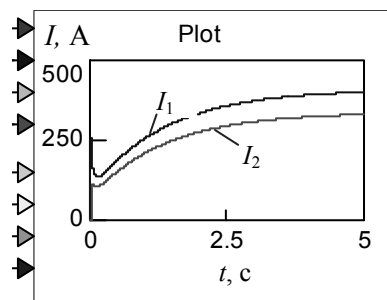


Рис. 6. Токи в бортовых ВД при различных сопротивлениях передвижения гусениц БГМ

Известно [2], что эффект перегрузки одного борта получен при движении БГМ по трассе, имеющей повороты одного направления. В рассматриваемом конкретном случае поворот БГМ осуществлялся за счет перевода электродвигателя отстающего борта в режим динамического торможения, то есть отключением ВД отстающего борта от сети и замыкание его на активное сопротивление.

В программе реализован алгоритм перевода ВД отстающего борта в режим динамического торможения в момент времени  $t=5$  с и последующий за ним вход машины в поворот радиусом 9 м. Условия дороги:  $\psi_{\min}=0,12$  одинаковый по бортам, в сумме 0,24; коэффициент сцепления суммарный  $\phi_{\max}=0,65$ ; коэффициент сопротивления повороту  $\mu_{\max}=0,7$ . Траектория и скорость движения машины приведена на рис. 7.

По моменту ДВС (см. рис. 7, в) видны четыре

периода: разгон, установившееся движение, вход в поворот, установившийся поворот. Скорость движения ЦТ БГМ до поворота 5,3 м/с, а в установившемся повороте 4,3 м/с.

Изменение токов и ЭДС генератора и двух ВД при движении прямо и последующем входе в поворот приведены на рис. 8 (а, б соответственно).

Из рис. 8 видно, что установившееся значение тока на забегавшем борту  $I_2=690$  А и на отстающем  $I_1=-90$  А,  $E_r=453$  В,  $U_r=423$  В, ЭДС ВД забегавшего борта  $E_{эд2}=386$  В, отстающего  $E_{эд1}=269$  В.

Надо сказать, что при несколько других параметрах поворота ВД отстающего борта полностью разгружен по току, а забегавший ВД перегружен по току очень сильно: вместо предназначенных ему 375 А имеем почти 700 А, что естественно приводит к перегреву.

В дальнейшем возможно введение в модель расчета температурного режима ВД, а также рекуперативное торможение, при котором мощность торможения на отстающем борту может быть израсходована не в тепло, а передана на забегавшую гусеницу. Такое мероприятие возможно при модернизации силовых преобразователей.

Тот факт, что БГМ на полигоне находилась в повороте не все время испытаний, а только периодически, не ставит под сомнение достоверность сделанного вывода о причине перегрева, так как температура охлаждающей жидкости накапливается и не успевает рассеяться в окружающей среде.

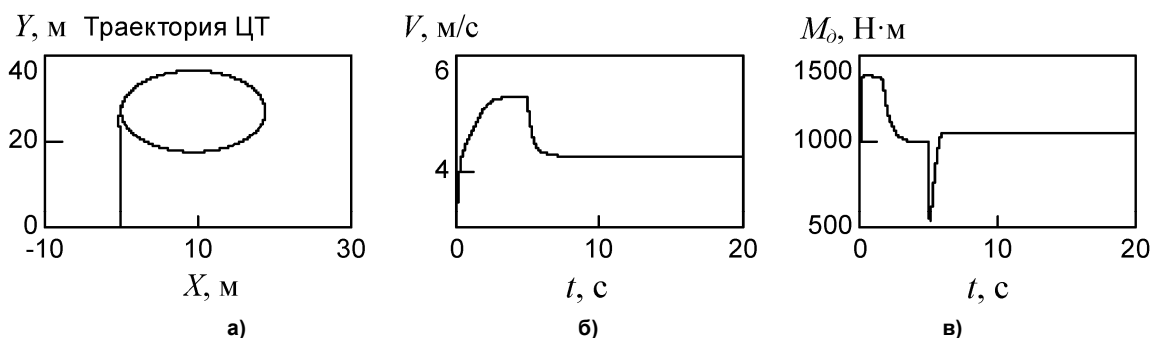


Рис. 7. Траектория (а) и скорость (б) движения БГМ, крутящий момент ДВС (в)

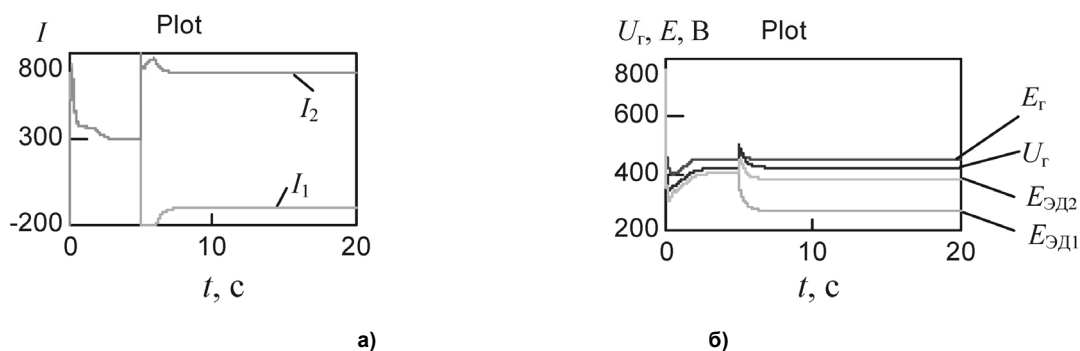


Рис. 8. Изменение токов и ЭДС генератора

Из приведенного примера имитационного моделирования движения БГМ в повороте причиной перегрева ВД следует считать перераспределение мощности генератора (ДВС) при повороте гусеничной машины, которая приводит в определенных режимах поворота к загрузке забегающего борта всей мощностью ДВС. Явление перераспределения энергии между электродвигателями при параллельной работе и отклонении параметров одного из них известно в теории электропривода [11], интерес представляет количественная оценка такого явления в данной прикладной задаче. В связи с этим проведены статические расчеты, иллюстрирующие данное положение теории движения гусеничных машин и теории электропривода. Исследование динамической модели движения БГМ позволило дополнить этот анализ описанием свойств БГМ в переходном периоде входа в поворот, в том числе и по электрической трансмиссии: например, поведение токов во время входа в поворот (рис. 8).

**Установившийся режим поворота.** Уравнения для сил тяги на забегающей ( $P_2$ ) и отстающей ( $P_1$ ) гусеницах, характеризующие поворот с полным использованием мощности ДВС [7–9] имеют вид:

$$P_2 = 0,5 \left( 1 + \frac{LV\omega^3}{2g^2\mu_{\max}\Psi_{\min}} \right) \Psi_{\min} G + \frac{\mu GL}{4B} \left[ 1 - \left( \frac{V\omega}{\mu_{\max}g} \right)^2 \right], \quad (12)$$

$$P_1 = 0,5 \left( 1 + \frac{LV\omega^3}{2g^2\mu_{\max}\Psi_{\min}} \right) \Psi_{\min} G - \frac{\mu GL}{4B} \left[ 1 - \left( \frac{V\omega}{\mu_{\max}g} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления повороту, остальные обозначения соответствуют рис. 1 и уравнениям (1)–(6).

Выражения (12) и (13) справедливы для любых режимов установившегося движения по скорости  $V$  и угловой скорости  $\omega$ , но только при определенном их соотношении будет достигнут баланс мощности двигателя и сопротивлений и минимальный радиус поворота на каждой скорости.

Графики, изображающие зависимость тяги на отстающем  $P_1$  и забегающем  $P_2$  бортах от скорости движения при балансе мощности, приведены на рис. 9. Для исследуемой электротрансмиссии  $P_1$  и  $P_2$  загружают ВД<sub>1</sub> и ВД<sub>2</sub>.

Информация о том, что  $P_1$  и  $P_2$  при увеличении скорости движения БГМ снижаются (а следовательно, снижаются нагрузки и на ВД по току), справедлива только для установившегося движения. В реальных условиях постоянного и достаточно резкого маневрирования эти представления существенно корректируются.

**Переходные режимы поворота.** В реальных условиях эксплуатации БГМ имеет место постоянная необходимость маневрировать, ускорять или замедлять движение, что заставляет все агрегаты БГМ работать в переходных режимах. В переходном режиме поворота существенно изменяются

представления о минимальных радиусах поворота и силах тяг. Так, при резком изменении положения органа управления механизма поворота при тех же скоростях линейного  $V$  и углового  $\omega$  перемещения машины можно достичь практически любого мгновенного радиуса поворота вплоть до нуля, все зависит от интенсивности включения механизма управления поворотом – торможения ВД отстающего борта.

На основании ранее проведенных исследований [8, 9] определены силы тяги, потоки мощности и боковые ускорения при неустановившемся повороте (рис. 10). При входе в поворот тяга на забегающей гусенице задана постоянной и максимальной по сцепным свойствам грунта, что обеспечивает максимальную интенсивность входа в поворот.

Совместный анализ графиков по силам тяг в установившемся (рис. 9) и неустановившемся (рис. 10) поворотах показывает, насколько изменяется представление о необходимой силе тяги на забегающем борту при статическом нагружении и при наиболее интенсивном маневрировании, ограниченном только грунтом. ВД забегающего борта должен быть готов к созданию силы тяги, равной  $0,325G$ . Для исследуемой БГМ эта величина равна 60 кН, а в пересчете на крутящий момент на ведущем колесе 20 кН·м. Передаточное число бортового редуктора должно составлять 8.

Объективное представление о нагрузках по бортам при интенсивном маневрировании с помощью модели (1)–(6) позволяет более обоснованно подойти к выбору параметров ВД.

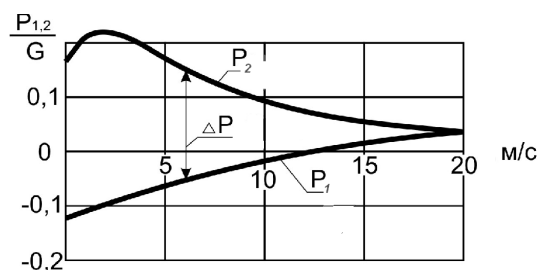


Рис. 9. Зависимость тяги в условия движения по сухому лугу,  $\Psi_{\min} = 0,06$

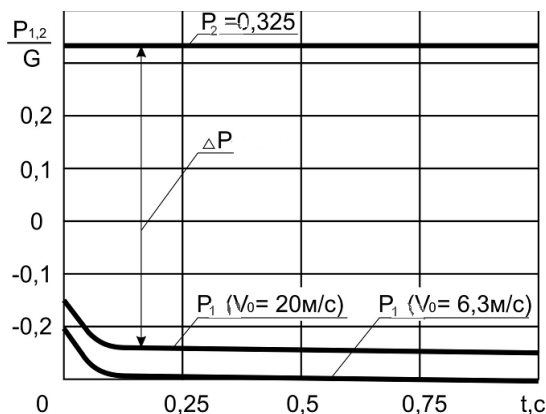


Рис. 10. Зависимость силы тяги на бортах

Учитывая вышесказанное, интерес представляет исследование изменения величин токов во всех точках электрической схемы при маневрировании БГМ 1) на малой скорости при небольших радиусах и 2) на большой скорости при больших радиусах.

1) Проведено имитационное моделирование движения БГМ при работе ВД в первом режиме (малых скоростей) (при  $k=2,95$ ;  $r=0,054$  Ом), вход в поворот на малой скорости 4 м/с. Торможение ВД отстающего борта осуществлено уменьшением напряжения соответствующим ПС через его коэффициент трансформации  $i_{тр}$ , характеризующий кратность уменьшения напряжения после ПС отстающего борта, поступающего на вход ВД.

Моделирование изменения  $i_{тр}$  (рис. 11) во времени (рис. 12, а) привело к изменению величин токов во всех точках электрической схемы.

Величины пиковых токов составили 700А на забегавшем борту и – 200А на отстающем, что представляет интерес для электропривода, поскольку именно пики нагрузки по току приводят к срабатыванию предохранителей, выводящих всю трансмиссию из работы, что совершенно недопустимо для БГМ. Результаты исследования переходного процесса входа в поворот с точки зрения протекающих токов в дальнейшем могут быть использованы при разработке системы управления поворотом БГМ.

2) Далее проведено исследование движения БГМ при работе ВД во втором режиме (больших скоростей) (при  $k=0,98$ ;  $r=0,018$  Ом). Поворот руля

(изменение  $i_{тр}$ ) в пределах управляемого движения без заноса ограничен величиной 1,06 от 1, которой соответствует прямолинейное движение. При этом достигается минимальный радиус 104 м при скоростях в прямолинейном участке 18 м/с и в повороте 17,4 м/с (рис. 13,а).

В переходном процессе токи определяются скоростью поворота руля (изменением  $i_{тр}$ ), в данном случае при повороте руля за 1 с максимальный ток на забегавшем борту составляет 600 А, а на отстающем – 300 А (в генераторном режиме). Установившиеся же значения токов: 464 А – на забегавшем борту и 12 А – на отстающем. Различие, как и показано на обзорных решениях рис. 9 и 10, весьма существенное, что связано с формированием тяговых усилий при входе в поворот (рис. 13, в).

Графики изменения мощности и момента ДВС в повороте БГМ показаны на рис. 14, а и рис. 14, б. Если сопоставить графики мощности ДВС и бортовых ВД (рис. 14, в), то становится очевидным факт того, что вход в поворот осуществляется не за счет дополнительной загрузки ДВС, а за счет перераспределения мощности между ВД забегавшего и отстающего бортов. Забегавший борт нагружается всей мощностью ДВС, а отстающий полностью разгружается.

Мощность, передаваемая ВД забегавшего борта при скорости БГМ  $v=17,4$  м/с и радиусе поворота  $R=104$  м, составляет 206 кВт. Напомним, что рассмотренный режим движения не самый энергонапряженный, мощность ДВС составляет всего 220 кВт, а максимум достигается при большем сопро-

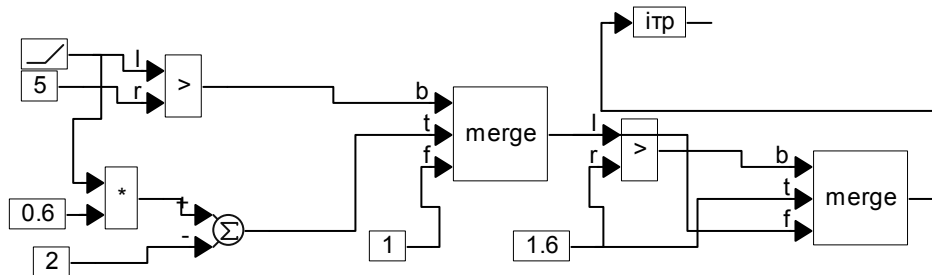


Рис. 11. Блок-схема изменения коэффициента трансформации

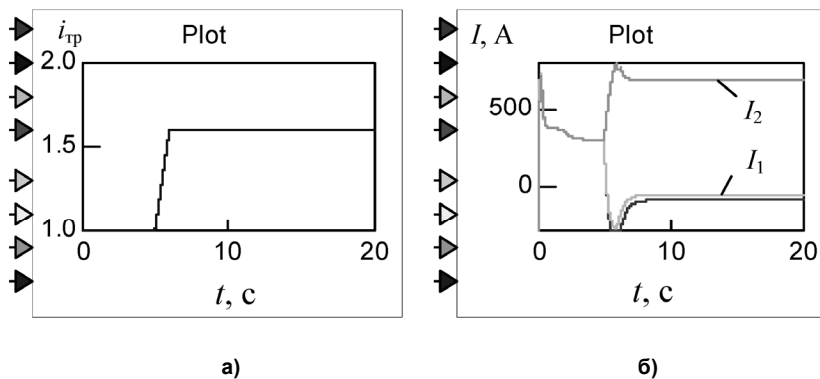


Рис. 12. Изменение коэффициента трансформации (а) и токов (б) во времени

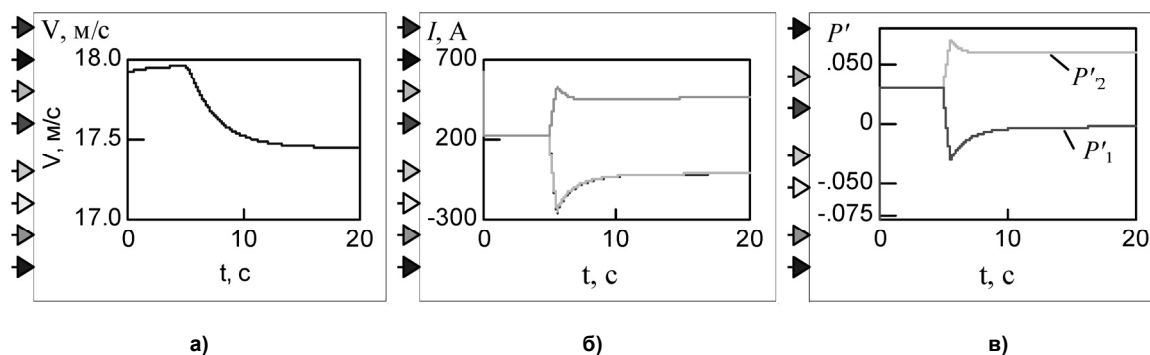


Рис. 13. Изменение во времени скорости движения БГМ (а), токов ЭД забегавшего и отстающего борта (б), относительных тяговых усилий на гусеницах (в)

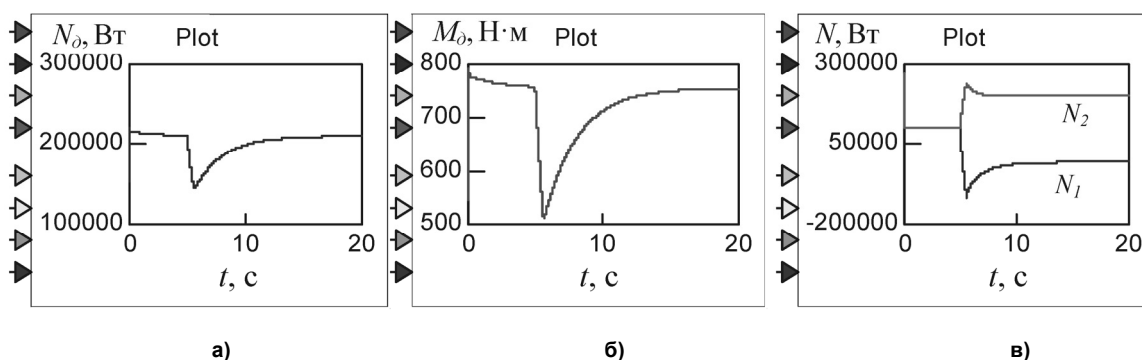


Рис. 14. Мощность ДВС Nd (а), крутящий момент ДВС (б) и мощность ВД забегавшего  $N_2$  и отстающего  $N_1$  бортов (в)

тивлении под гусеницами. В последнем случае скорость БГМ в повороте становится равной 17 м/с, радиус  $R=106$  м, а мощность ВД забегавшего борта составляет уже 250 кВт при токе 580 А.

Кроме того, криволинейное движение с радиусом 104 м – это почти прямолинейное движение. Ввести машину в поворот большей кривизны (меньшего радиуса) оказалось возможным только при динамическом торможении, то есть при отключении ВД отстающего борта от генератора и замыкании его на активное сопротивление, что приводит к излишним потерям энергии.

Таким образом, расчетным методом показано, что перегрузка ВД забегавшего борта неизбежна как на малых скоростях движения, так и на больших, и особенно в переходный период входа-выхода из поворота, что соответствует результатам физического эксперимента. Цель данного исследования достигнута.

В дальнейшем система управления поворотом исследуемого объекта должна быть модернизирована с целью реализации рекуперативного торможения.

## Выводы

1. Разработана математическая модель движения БГМ, имеющая вид системы дифференциальных уравнений, описывающих движение машины в декартовых координатах, а также уравнений статического равновесия электротрансмис-

сионной установки, полученных с использованием схемы замещения электропривода.

2. Проведено имитационное моделирование движения БГМ в характерных режимах поворота с помощью перевода ВД отстающего борта в режим динамического торможения на малой скорости (4 м/с) с радиусом 8 м. Продемонстрирована перегрузка ВД забегавшего борта по току до 700 А, при расчетной нагрузке в 375 А, что и является причиной выхода одного ВД из строя в физическом эксперименте.

3. Проведено имитационное моделирование движения БГМ в повороте с помощью понижения напряжения ВД отстающего борта силовым преобразователем на большой скорости (18 м/с) с радиусом 100 м. Показано, что несмотря на сохранение машиной почти прямолинейного движения, ВД забегавшего борта перегружен током вдвое от нормы.

4. Определены направления дальнейших исследований, связанных с изучением рекуперативного торможения и разработкой элементной базы для его осуществления.

## Литература

1. Огоркевич, Р.М. *Electric transmission progress in Germany (Разработка электрической трансмиссии в Германии)* / Р.М. Огоркевич. – *International defense review*. – 1992. – № 2. – P. 153–154. –



[http://www.bvtv.narod.ru/4/electric\\_transmission\\_fritz.htm](http://www.bvtv.narod.ru/4/electric_transmission_fritz.htm)

2. Разработка макета шасси с электрической трансмиссией и цифровой системой управления шасси для перспективной гусеничной машины легкой весовой категории: отчет о НИР / ОАО НПО «Электромашина»; исп. С.А. Харин, Л.С. Носенко, С.А. Абрамов, С.А. Благов. – Челябинск, 2010. – 56 с.

3. Кондаков, С.В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путем автоматизации системы управления криволинейным движением: монография / С.В. Кондаков. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 108 с.

4. Кондаков, С.В. Моделирование взаимодействия гусениц с грунтом при неустановившемся повороте быстроходной гусеничной машины / С.В. Кондаков, С.И. Черепанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – Вып. 12. – № 23 (123). – С. 26–31.

5. Исаков, П.П. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов / П.П. Исаков, П.Н. Иванченко, А.Д. Егоров. – Л.: Машиностроение, 1981. – 302 с.

6. Овчинников, И.Е. Вентильные электриче-

ские двигатели и приводы на их основе: курс лекций / И.Е. Овчинников. – СПб.: Корона-век, 2006. – 336 с.

7. Сергеев, Л.В. Теория танка / Л.В. Сергеев. – М.: Изд-во Академии бронетанковых войск, 1973. – 493 с.

8. Болдырев, Р.Н. Боковые нагрузки на опорные катки военной гусеничной машины в повороте / Р.Н. Болдырев, С.В. Кондаков // Вестник бронетанковой техники. – 1990. – № 12. – С. 29–32.

9. Болдырев, Р.Н. Спецглавы теории поворота быстроходных гусеничных машин: учебное пособие / Р.Н. Болдырев, С.В. Кондаков. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1998. – 95 с.

10. Закладной, А.Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями: монография / А.Н. Закладной, О.А. Закладной. – Киев: Изд-во «Либра», 2012. – 190 с.

11. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода: учебник для вузов / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

12. Воронин, С.Г. Электропривод летательных аппаратов: учебно-методический комплекс / С.Г. Воронин. – Offline версия 1.0. – Челябинск, 1995–2011. – файлов 516, ил.

Поступила в редакцию 08.06.2012 г.

**Гомберг Борис Наумович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Gomberg Boris Naumovich** – Candidate of Engineering Science, associate professor of Electromechanics and Electromechanical Systems Department of South Ural State University, Chelyabinsk.

**Кондаков Сергей Владимирович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Колёсные и гусеничные машины», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. E-mail: tanksv@mail.ru

**Kondakov Sergey Vladimirovich** – Doctor of Engineering Science, professor of Wheel and Caterpillar Machine Department of South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: tanksv@mail.ru

**Носенко Лев Сергеевич** – заместитель главного конструктора по НИОКР НПО «Электромашина», соискатель, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. E-mail: nls\_chel@mail.ru

**Nosenko Leo Sergeevich** – deputy chief constructor of research department of NPO “Electromachina”, a degree-seeking student of South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: nls\_chel@mail.ru.

**Павловская Ольга Олеговна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления» Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. E-mail: olyapav@rambler.ru

**Pavlovskaya Olga Olegovna** – Candidate of Engineering Science, associate professor of Control Systems Department of South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: olyapav@rambler.ru