

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.365

В.А. Горелов¹, Б.Б. Косицын¹, А.В. Мирошниченко², А.А. Стадухин¹

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХЗВЕННОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)¹
ОКБ «Техника» (г. Москва)²

Представлен комплекс натурно-математического моделирования, позволяющий проводить имитацию движения транспортного средства в режиме «реального времени» и исследовать динамику двухзвенных гусеничных машин под управлением человека в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Рассматривается аппаратная часть разработанного комплекса, математическая модель динамики двухзвенной гусеничной машины, а также метод генерации среднестатистических трасс и дорожно-грунтовых условий. Представленная методика обработки результатов виртуальных заездов позволяет на этапе проектирования оценить зависимость средней скорости движения от максимальной мощности машины, а также определить требования к характеристикам тяговых электродвигателей, используемых в индивидуальном приводе.

Ключевые слова: двухзвенная гусеничная машина, механическая характеристика, индивидуальный привод, тяговый электродвигатель, натурно-математическое моделирование, виртуальные испытания.

Введение

Широкое распространение двухзвенных гусеничных машин обусловлено их высокими эксплуатационными характеристиками: проходимостью, быстроходностью и грузоподъемностью. Дальнейшее совершенствование подобных транспортных средств может быть достигнуто путем применения индивидуального тягового электропривода ведущих колес, что позволит упростить конструкцию узла сочленения. Помимо этого, применение трансмиссии такого типа позволит избавиться от необходимости передачи механической мощности между секциями и расширит возможности управления поворотом машины, в том числе, при использовании элементов бортового поворота. Однако создание таких машин затруднено в связи с отсутствием методов определения потребных характеристик тяговых электродвигателей, а также статистических данных об их эксплуатации.

Необходимость повышения подвижности боевых двухзвенных гусеничных машин (ДГМ) неизбежно приводит к попыткам использовать тяговый электрический привод в их трансмиссиях. Известно, что работа электрической машины характеризуется режимами, отличающимися длительностью, крутящим моментом, частотой вращения ротора, величиной токов и напряжений и т.д. В известных сферах применения (городской транспорт, привод конвейеров, лифты, тяговый привод карьерной техники и др.) режимы стандартизованы или же приводятся к стандартизованным. В случае тягового привода вездеходных транспортных машин определение длительных и кратковременных режимов работы на этапе проектирования в статистически заданных условиях движения для обеспечения требуемого уровня по-

движности не представляется возможным без использования методов математического моделирования.

Для решения данных проблем был создан комплекс натурно-математического моделирования, выполненный с использованием имитационной математической модели динамики плоского криволинейного движения двухзвенной гусеничной машины [1-7], позволяющий проводить имитацию движения в режиме «реального времени» на ЭВМ под управлением человека (водителя-оператора).

Комплекс натурно-математического моделирования

В имитационной математической модели [7] динамика секции ДГМ рассматривается как движение твёрдого тела в горизонтальной плоскости по ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного вокруг центра масс (рис. 1). Для учета в модели перераспределения нормальных реакций от действия силы сопротивления воздуха, моментов сопротивления качению, ускорения центра масс и силы тяжести применяется принцип возможных перемещений. Связь опорных катков с грунтом – не удержиживающая.

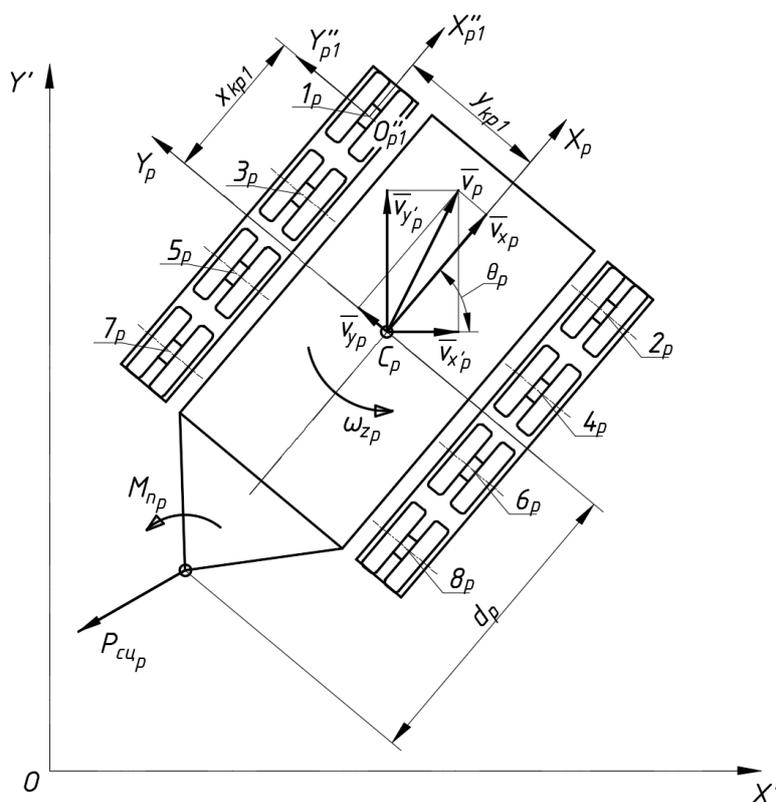


Рис.1. Расчетная схема движения секции ДГМ

В соответствии с представленной расчетной схемой (рис. 1) система уравнений, описывающая плоское движение секции ДГМ, имеет вид (1). Данная система позволяет рассчитать текущие ускорения центра масс по значениям сил и моментов, действующих на секцию ДГМ.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{x_p} = \frac{dv_{x_p}}{dt} - \omega_{z_p} v_{y_p} = \frac{1}{m_p} \left(\sum_{i=1}^{n_p} R_{x_{p,i}} - P_{w_p} + P_{c_{u_{x_p}}} \right); \\ a_{y_p} = \frac{dv_{y_p}}{dt} + \omega_{z_p} v_{x_p} = \frac{1}{m_p} \left(\sum_{i=1}^{n_p} R_{y_{p,i}} + P_{c_{u_{y_p}}} \right); \\ J_{z_p} \frac{d\omega_{z_p}}{dt} = \sum_{i=1}^{n_p} M_p (R_{y_{p,i}}) - \sum_{i=1}^{n_p} M_p (R_{x_{p,i}}) - \sum_{i=1}^{n_p} M_{c_{п_{p,i}}} + M_p (P_{c_{u_p}}) + M_{п_p}; \\ v_{x'_p} = \frac{dx'_p}{dt} = v_{x_p} \cos(\theta_p) - v_{y_p} \sin(\theta_p); \\ v_{y'_p} = \frac{dy'_p}{dt} = v_{x_p} \sin(\theta_p) + v_{y_p} \cos(\theta_p); \\ \omega_{z_p} = \frac{d\theta_p}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где: p – номер секции ДГМ; m_p – масса секции ДГМ; J_{z_p} – момент инерции секции ДГМ относительно вертикальной оси z , проходящей через центр масс секции C_p ; a_{x_p} , a_{y_p} – проекции ускорения центра масс секции ДГМ на оси координат $x_p - y_p$; v_{x_p} , v_{y_p} – проекции скорости центра масс секции ДГМ на оси координат $x_p - y_p$; $v_{x'_p}$, $v_{y'_p}$ – проекции скорости центра масс секции ДГМ на оси координат $x' - y'$; $\frac{dv_{x_p}}{dt}$, $\frac{dv_{y_p}}{dt}$ – проекции относительной производной вектора скорости центра масс секции ДГМ на оси координат $x_p - y_p$; ω_{z_p} – проекция вектора угловой скорости поворота секции ДГМ на вертикальную ось z_p ; θ_p – угол поворота секции ДГМ в неподвижной системе координат; x'_p, y'_p – координаты центра масс секции ДГМ в системе координат $x' - y'$; $R_{x_{p,i}}$ – продольная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности); $R_{y_{p,i}}$ – поперечная составляющая реакции, действующей на активный участок гусеницы под i -ым катком в плоскости основания (опорной поверхности); $P_{c_{u_{x_p}}}$ – продольная составляющая усилия, реализуемого в сцепном устройстве; $P_{c_{u_{y_p}}}$ – поперечная составляющая усилия, реализуемого в сцепном устройстве; P_{w_p} – проекция вектора силы сопротивления воздуха на ось x_p системы координат $x_p - y_p$; $M_{п_p}$ – поворачивающий момент, обеспечивающий складывание секций и реализуемый при помощи системы рулевого управления ДГМ; $M_{c_{п_{p,i}}}$ – момент сопротивления повороту активного участка гусеницы под i -ым катком вокруг вертикальной оси, проходящей через центр этого участка; n_p – число опорных катков секции ДГМ.

Известно, что распределение нормальных реакций недеформируемого опорного основания по длине опорных ветвей гусениц во многих случаях разрывно [8]. В связи с этим гусеничный движитель моделируется подобно колесному, у которого число опорных катков равно числу колес. Сила взаимодействия движителя с грунтом в плоскости опорного основания определяется при помощи подхода, основанного на представлении об «эллипсе трения», согласно которому сила взаимодействия с опорной поверхностью направлена противоположно скорости скольжения в точках контакта [9-11].

Величина силы $P_{c_{ц}}$ в сцепном устройстве ДГМ определяется согласно расчетной схеме (рис. 2) как (2):

$$P_{c_{ц}} = c_{c_{ц}} \Delta + \mu_{c_{ц}} d\Delta/dt, \quad (2)$$

где: $c_{c_{ц}}$ – коэффициент жесткости сцепного устройства; $\mu_{c_{ц}}$ – коэффициент потерь в сцепном устройстве; Δ – расстояние между центрами шарниров сцепного устройства секций ДГМ.

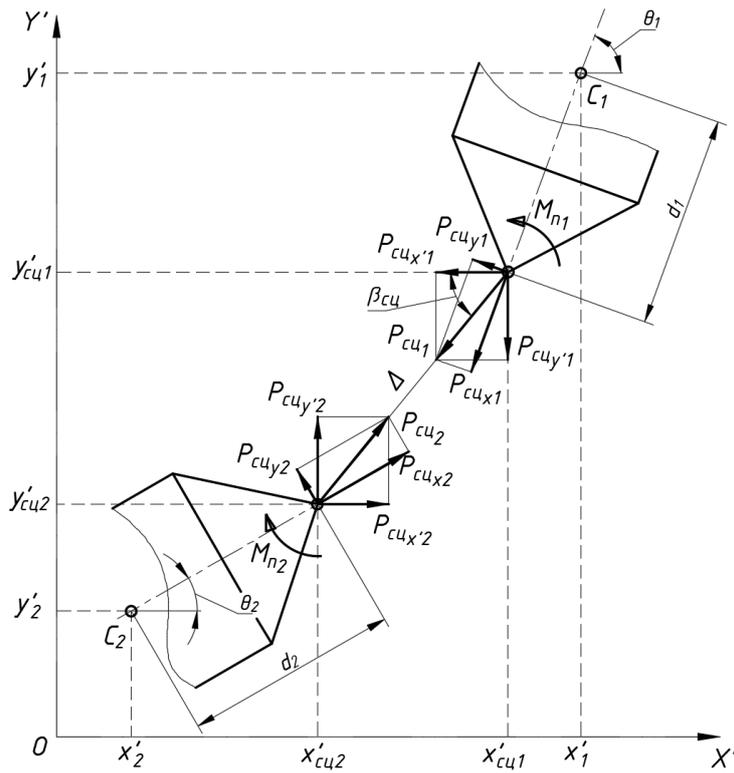


Рис. 2. Расчетная схема сцепного устройства

Поворот машины осуществляется за счет складывания звеньев. Величина поворачивающего момента M_{Π} в зависимости от задаваемой водителем кривизны траектории вычисляется как (3):

$$M_{\Pi} = c_{мп} (\theta_{сцв} - \theta_{сц}) = c_{мп} (\arcsin(d_1 k_{в}) + \arcsin(d_2 k_{в}) - \theta_1 + \theta_2), \quad (3)$$

где $c_{мп}$ – коэффициент, определяющий угол наклона регуляторной характеристики механизма поворота; $\theta_{сцв}$ – угол складывания секций, задаваемый водителем; $\theta_{сц}$ – текущий угол складывания секций; d_1, d_2 – расстояние от центра масс до шарнира сцепного устройства первой и второй секции.

Связь крутящего момента тягового электродвигателя (ТЭД) каждого борта секций ДГМ с величиной параметра управления и частотой вращения ротора описывается следующей системой уравнений (4):

$$M_d(\omega_{эд}, h) = \begin{cases} M_{эд}^{max} \cdot h, & \text{если } \omega_{эд} < N_{эд}^{max} / M_{эд}^{max} \text{ и } \omega_{эд} \geq 0 \\ \frac{N_{эд}^{max} \cdot h}{\omega_{эд}}, & \text{если } \omega_{эд} \geq N_{эд}^{max} / M_{эд}^{max} \text{ и } \omega_{эд} < \omega_{эд}^{max}, \\ 0, & \text{если } \omega_{эд} \geq \omega_{эд}^{max} \end{cases} \quad (4)$$

где $M_{эд}^{max}$ – максимальный тяговый/тормозной момент, создаваемый электромашинной; $N_{эд}^{max}$ – максимальная тяговая/тормозная мощность, развиваемая электромашинной; $\omega_{эд}^{max}$ – предельная частота вращения ротора электромашинной; $\omega_{эд}$ – текущая частота вращения ротора электромашинной; h – величина параметра управления ($h \in [-1, 1]$).

Кроме описанной выше математической модели, комплекс натурно-математического моделирования включает элементы взаимодействия с водителем-оператором: органы управления и графический интерфейс. Внешний вид рабочего места оператора представлен на рис. 3. Графический пользовательский интерфейс программы показан на рис. 4.



Рис. 3. Внешний вид рабочего места оператора комплекса натурно-математического моделирования:
1,2 – органы управления; 3 – устройство вывода графической информации

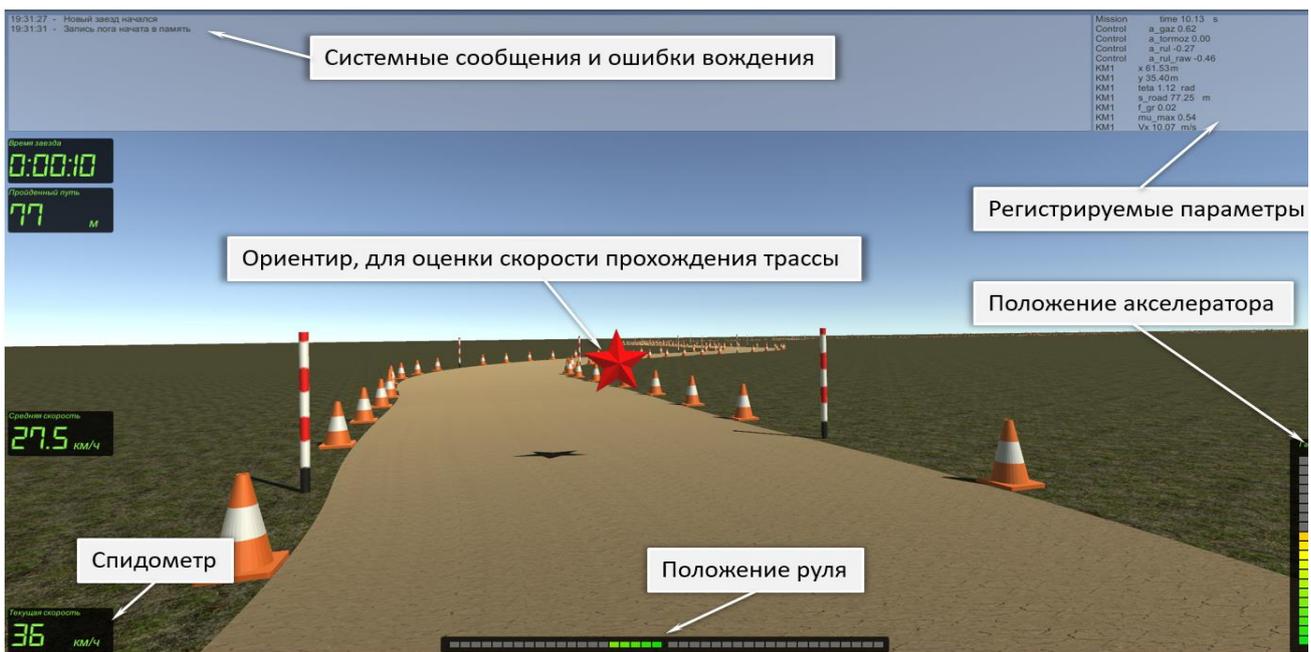


Рис. 4. Визуальная имитация обстановки и приборов в комплексе натурно-математического моделирования

Для определения вероятности работы ТЭД в различных режимах эксплуатации (кратковременный/долговременный) необходимо проводить большое количество вычислительных экспериментов с использованием разработанного комплекса, которые заключаются в выпол-

нении заездов двухзвенной гусеничной машины по статистически заданным трассам в типовых условиях движения под управлением человека (группы водителей-операторов).

При создании таких трасс был применен аппарат математической статистики и известные вероятностные характеристики (корреляционные функции) внешних воздействий, оказывающих влияние на динамику ДГМ. На основе статистических данных о дорожной кривизне k_d , максимальном коэффициенте взаимодействия с ОП μ_{smax} , суммарном коэффициенте сопротивления движению ψ проводился «розыгрыш» перечисленных параметров вдоль трассы при помощи метода неканонических представлений [12-15]. Пример трассы, полученной по реализации случайной функции дорожной кривизны $k_d(s)$, представлен на рис. 5.

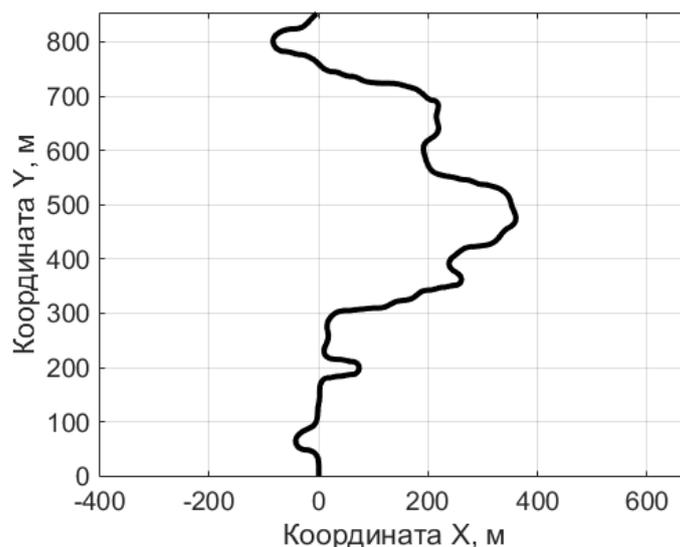


Рис. 5. Пример «разыгранной» трассы

Определение потребной механической характеристики электромашин

Разработанный комплекс натурно-математического моделирования позволяет получать статистические данные о режимах нагружения ТЭД и на их основе определять требуемые механические характеристики электромашин для вездеходных транспортных ДГМ с индивидуальным приводом ведущих колес. В качестве объекта исследования выбрана ДГМ полной массой 25 т (рис. 6) с характеристиками, представленными в табл. 1.

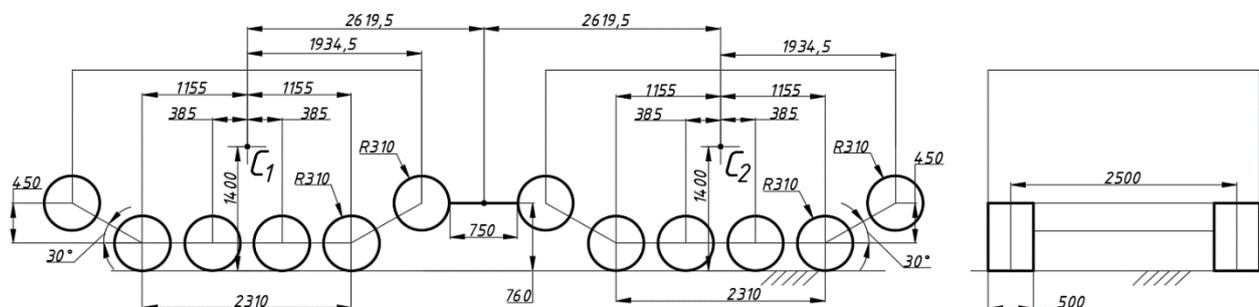


Рис.6. Геометрические параметры ДГМ

Таблица 1

Технические характеристики ДГМ (первая/вторая секция)

Полная масса, кг	12500
База, мм	2310
Колея, мм	2500
Высота центра масс, мм	1400
Момент инерции вокруг вертикальной оси, проходящей через масс, кг.м ²	24140
Радиус ведущего колеса, мм	310
Радиус опорного катка, мм	310
Ширина гусеницы, мм	500
Длина трака, мм	165
Высота расположения узла сцепки, мм	760
Тип трансмиссии	Индивидуальный электропривод ведущих колес каждой секции
Общее количество ТЭД	4
Максимальная скорость, км/ч	70
Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,7
Площадь фронтальной проекции, м ²	5,3
Высота центра парусности, мм	1700

Механическая характеристика ТЭД, обеспечивающая заданную подвижность, определяется путем последовательно совершаемых виртуальных заездов по среднестатистическим трассам. Для этого необходимо, изменяя итерационным путем максимальную мощность ТЭД (например, методом «половинного деления»), определить такую $N_{e\max}^{\text{треб}}$, которая позволит обеспечить требуемую среднюю скорость движения машины в заданных условиях. В качестве начального приближения для виртуальных заездов на основании аналитического тягового расчета была получена исходная механическая характеристика ТЭД (рис. 7), выбраны передаточные числа трансмиссии в транспортном (10,02) и технологическом (26,25) диапазонах (предполагается, что рассматриваемая ДГМ оснащена двухдиапазонной трансмиссией, при этом транспортный диапазон предназначен для достижения максимальной скорости, а технологический – для реализации максимальной тяговой силы на движителе [16]). Динамическая характеристика ДГМ с полученной исходной характеристикой ТЭД представлена на рис. 8. КПД механической части трансмиссии принят равным 0,95.

Далее, для определения потребной максимальной мощности и механической характеристики ТЭД, которая обеспечит достижение необходимого уровня подвижности при реальной эксплуатации, применяется комплекс натурно-математического моделирования.

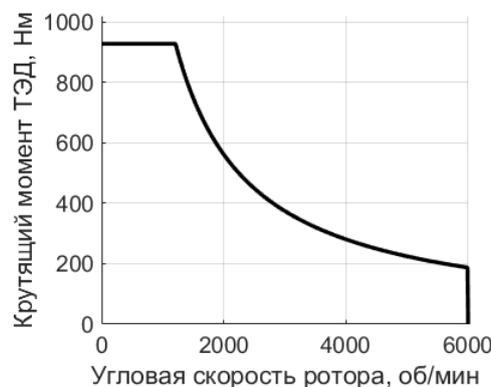


Рис. 7. Исходная механическая характеристика ТЭД ДГМ, полученная при выполнении тягового расчета

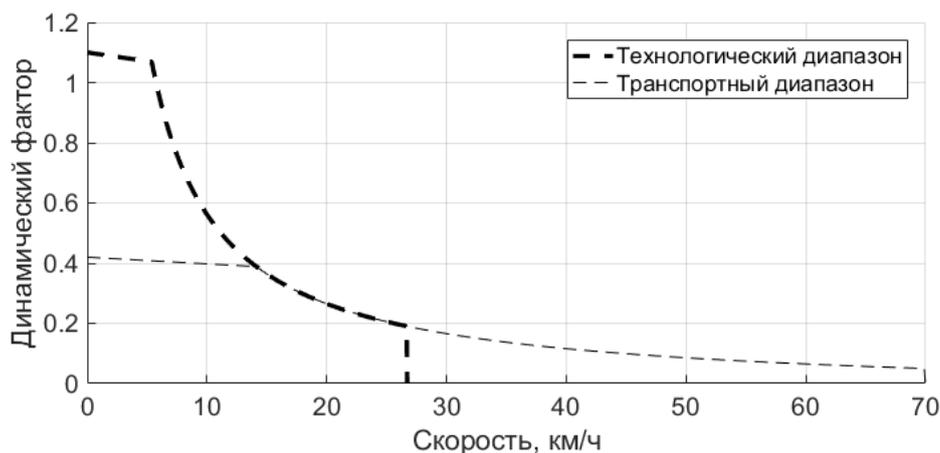


Рис. 8. Динамическая характеристика ДГМ

На первом этапе выбирается диапазон варьирования максимальной мощности электромашин, начиная от минимальной (исходной $N_{e\max}^{\text{треб}}$), которая необходима для обеспечения заданной максимальной скорости, до максимально возможной N_e^{MAX} , исходя из ограничения по максимальному крутящему моменту электродвигателя и предельной угловой скорости ротора (рис. 9).

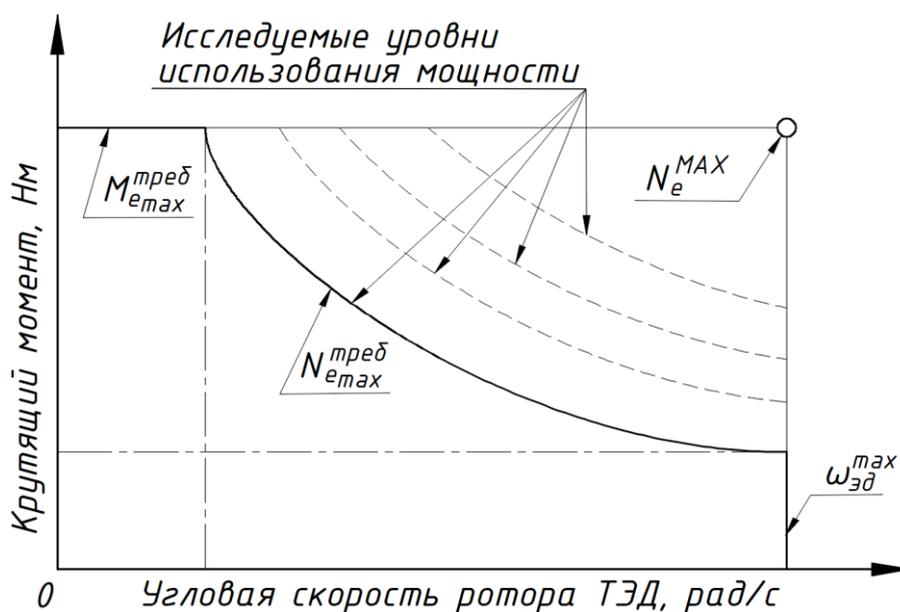


Рис. 9. Диапазон варьирования максимальной мощности ТЭД

В полученном диапазоне выбираются несколько уровней мощности, для каждого из которых проводятся виртуальные испытания в различных дорожно-грунтовых условиях (ДГУ).

Для примера рассмотрим результаты виртуальных заездов ДГМ по опорному основанию типа «разбитая грунтовая дорога». Зависимость средней скорости движения машины по данному типу опорной поверхности от используемой максимальной мощности ТЭД представлена на рис. 10.

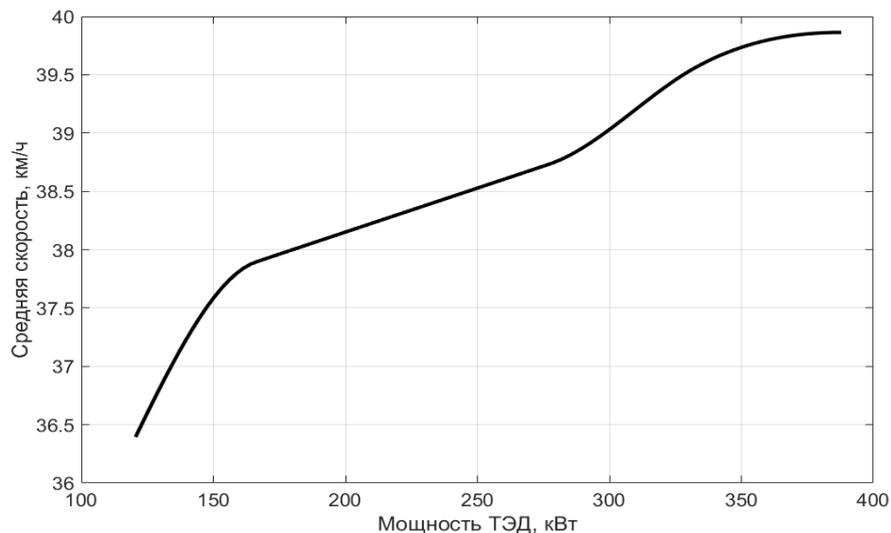


Рис. 10. Зависимость средней скорости движения ДГМ по статистически заданной трассе с опорным основанием типа «разбитая грунтовая дорога» от используемой максимальной мощности ТЭД

Распределение режимов работы ТЭД, а также функции распределения мощности, крутящего момента и угловой скорости ротора, реализованных электромашиной в тяговом режиме, для одного из выполненных виртуальных заездов, представлены на рис. 11, где:

- распределение режимов работы ТЭД (режимы движения, относительная длительность которых не превышает 5 % от времени преодоления трассы отсечены);
- функция распределения тяговой мощности ТЭД;
- функция распределения тягового крутящего момента ТЭД;
- функция распределения угловой скорости ротора ТЭД.

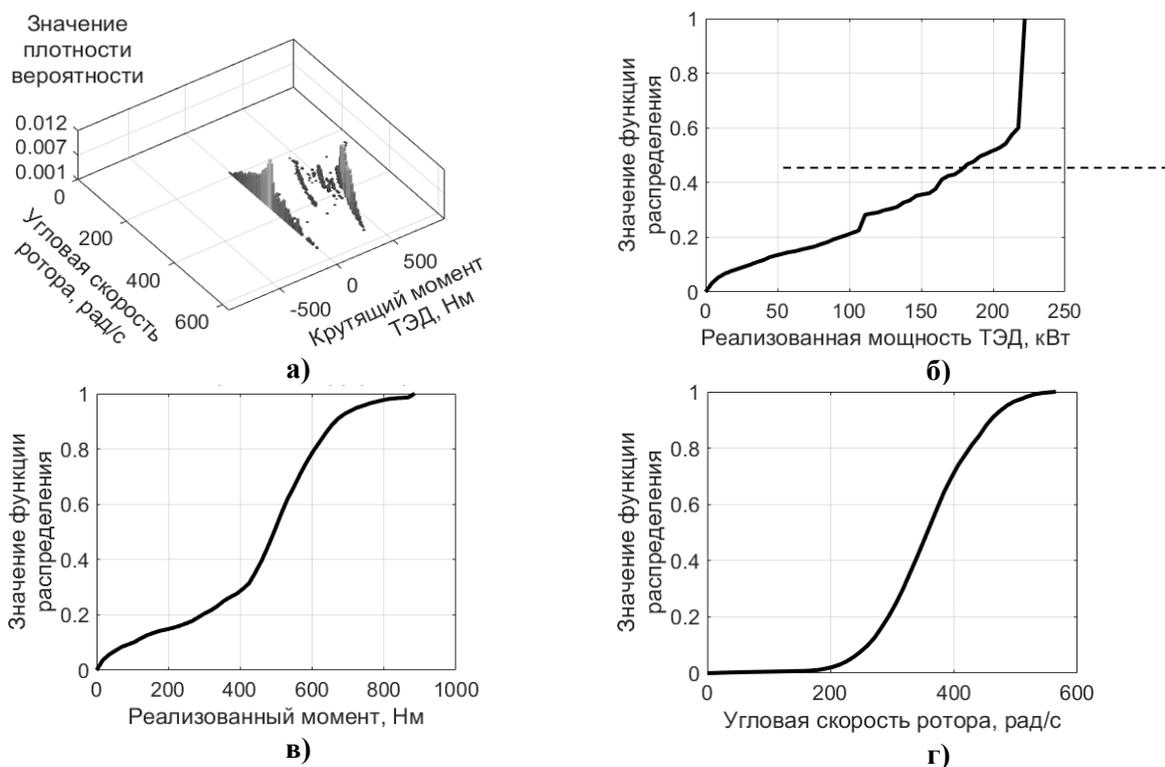


Рис. 11. Результаты виртуальных заездов ДГМ (мощность бортового ТЭД 222 кВт; средняя скорость 38,3 км/ч)

Анализ полученных данных показывает, что при росте максимальной мощности ТЭД снижается вероятность движения машины на внешней механической характеристике электродвигателя. Кроме того, после того как вероятность работы ТЭД на внешней характеристике снижается до ~50-60 % рост средней скорости становится незначительным. Таким образом, при движении ДГМ по ДГУ типа «разбитая грунтовая дорога» увеличивать мощность ТЭД более 222 кВт не рационально (удельная мощность 35,5 кВт/т). По функциям распределения крутящего момента и угловой скорости ротора для выбранного уровня максимальной мощности определяется механическая характеристика электромашины, а по распределению режимов работы ТЭД в тяговом режиме – зона высокого КПД (рис. 12).

Максимальный момент в кратковременном режиме соответствует расчетному $M_{e\max}^{\text{треб}}$ и составляет 928,8 Нм. Максимальный момент в длительном режиме эксплуатации соответствует величине крутящего момента (в данном заезде – 672 Нм), вероятность превышения которого составляет не более 10 %. Величина максимальной мощности в обоих случаях ограничена полученной величиной в 222 кВт. Максимальная длительная мощность ТЭД в режиме работы с максимальной угловой скоростью ротора $\omega_{\text{эд}}^{\text{max}}$ соответствует расчетной $N_{e\max}^{\text{треб}}$, необходимой для обеспечения максимальной скорости машины при прямолинейном движении, и составляет 117,8 кВт. Величина угловой скорости ротора, после которой допускается снижение мощности ТЭД, соответствует величине угловой скорости (в данном заезде 460 рад/с), вероятность превышения которой составляет не более 10 %.

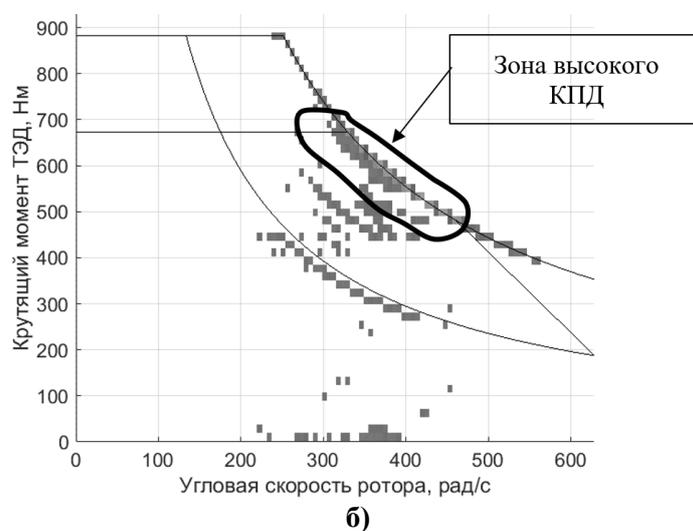
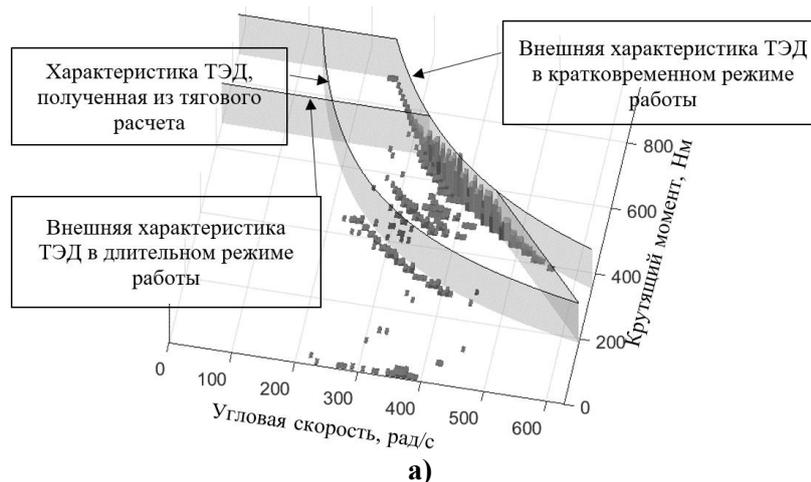


Рис. 12. а) Потребная механическая характеристика ТЭД; б) Зона высокого КПД

Зависимость средних скоростей движения машины от используемой максимальной мощности ТЭД по различным опорным поверхностям представлена на рис. 13.

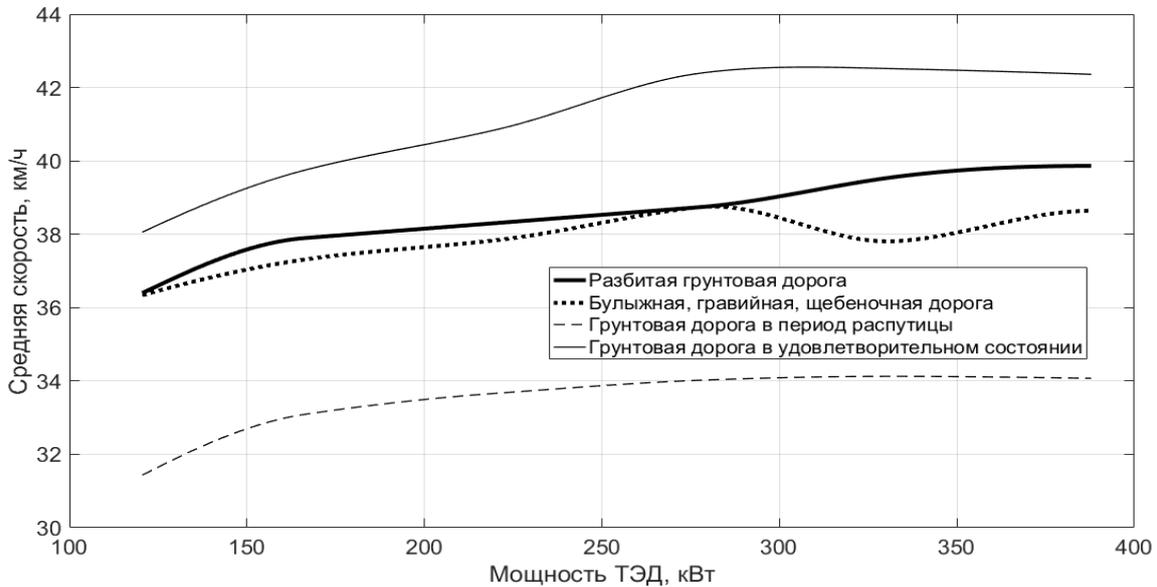


Рис. 13. Зависимость средней скорости движения ДГМ по заданной трассе от используемой максимальной мощности ТЭД

Таким образом, установлено, что при движении ДГМ по опорной поверхности (ОП) типа «булыжная, гравийная, щебеночная дорога» и «грунтовая дорога в период распутицы», увеличивать мощность ТЭД более 166 кВт нерационально. В случае движения по ОП «разбитая грунтовая дорога» мощность ТЭД не следует увеличивать свыше 222 кВт. В случае движения по ОП «грунтовая дорога в удовлетворительном состоянии» мощность ТЭД не имеет смысла повышать, более чем до 277 кВт.

По результатам натурно-математического моделирования получены потребные механические характеристики ТЭД для каждого типа ОП, которые (в силу их качественного сходства), наиболее удобно представить в виде рис. 14 и табл. 2.

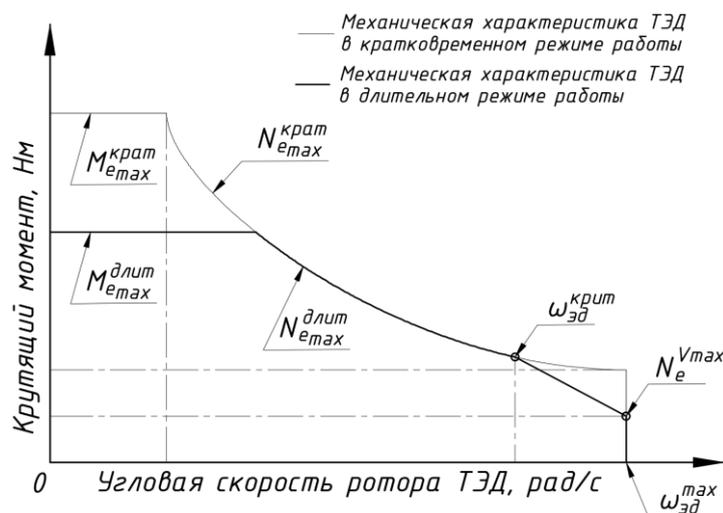


Рис. 14. Общий вид типовых механических характеристик ТЭД в длительном и кратковременном режиме работы

$N_{e_{max}}^{крат}$, $N_{e_{max}}^{длит}$ – максимальная мощность ТЭД в кратковременном и длительном режиме работы соответственно;

$M_{e_{max}}^{крат}$, $M_{e_{max}}^{длит}$ – максимальный крутящий момент ТЭД в кратковременном и длительном режиме работы соответственно;

$\omega_{эд}^{max}$ – максимальная угловая скорость ротора ТЭД;

$\omega_{эд}^{крит}$ – угловая скорость ТЭД, после которой максимальная реализуемая мощность электромашин может быть снижена;

$N_e^{v_{max}}$ – мощность ТЭД, потребная для реализации максимальной скорости на твердом опорном основании.

Таблица 2

Параметры, описывающие кратковременные и длительные характеристики ТЭД ДГМ для различных типов ОП

№ ОП	$N_{e_{max}}^{крат} = N_{e_{max}}^{длит}$ кВт	$M_{e_{max}}^{крат}$ Нм	$M_{e_{max}}^{длит}$ Нм	$\omega_{эд}^{max}$, рад/с	$\omega_{эд}^{крит}$, рад/с	$N_e^{v_{max}}$, кВт
1	166	928,8	566	628	444	117,8
2	277		761		500	
3	222		672		460	
4	166		601		378	

- 1 – булыжная, гравийная и щебеночная дорога;
- 2 – грунтовая дорога в удовлетворительном состоянии;
- 3 – разбитая грунтовая дорога;
- 4 – грунтовая дорога в период распутицы.

Таким образом, результирующая механическая характеристика ТЭД в длительном и кратковременном режиме работы для ДГМ определяется путем суммирования полученных характеристик для каждого из типов ДГУ с учетом вероятности возникновения дорожных условий [17]. Результирующая характеристика ТЭД ДГМ представлена на рис. 15 и в табл. 3 (удельная мощность 36,5 кВт/т).

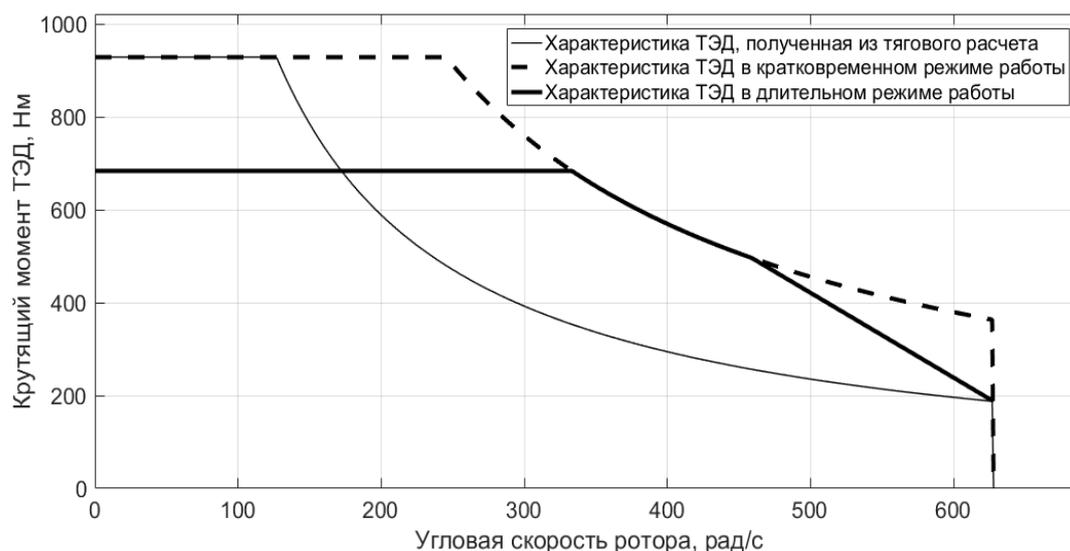


Рис. 15. Результирующая механическая характеристика ТЭД ДГМ

Таблица 3

**Параметры, описывающие результирующую характеристику ТЭД ДГМ
в кратковременном и длительном режиме работы**

$N_{e_{max}}^{крат\Sigma} = N_{e_{max}}^{длит\Sigma}$, кВт	$M_{e_{max}}^{крат\Sigma}$, Нм	$M_{e_{max}}^{длит\Sigma}$, Нм	$\omega_{эд}^{max\Sigma}$, рад/с	$\omega_{эд}^{крит\Sigma}$, рад/с	$N_e^{v_{max}}$, кВт
227,9	928,8	683,9	628	458,8	117,8

Вывод

Установлено, что зависимость средней скорости движения машины по трассе от используемой максимальной мощности ТЭД имеет насыщение (по достижению некоторого уровня максимальной мощности средняя скорость движения по трассе перестает увеличиваться или растет незначительно). Полученный результат позволяет выбрать наибольшую рациональную мощность ТЭД для рассматриваемой машины при движении в заданных дорожно-грунтовых условиях или их совокупности. По полученным в процессе виртуальных заездов статическим данным определены механические характеристики электромашины в длительном и кратковременном режиме эксплуатации. В случае длительного режима максимальная требуемая мощность электромашины может быть снижена в зоне крутящих моментов и угловых скоростей ротора, вероятность превышения которых при движении машины составляет менее 10 %. Предельная механическая мощность электромашины при этом может быть определена из условия соответствия вероятности работы ТЭД на внешней характеристике ~50-60 % при движении машины по заданным ДГУ или их совокупности под управлением водителя-оператора.

Кроме того, получено, что электродвигатель наиболее вероятно работает в области средних угловых скоростей вращения роторов (350-450 рад/с) при максимальной мощности, что требует высокого КПД ТЭД в данной зоне механической характеристики. Виртуальные заезды показали, что поворот, осуществляемый с помощью складывания звеньев, обладает значительной инерционностью (запаздыванием) независимо от мощности привода складывания звеньев, что не позволяет изменять траекторию движения ДГМ достаточно быстро и усложняет управление машиной на высоких скоростях. Указанный недостаток может быть устранен путем применения комбинированного способа поворота (за счет одновременного складывания секций и изменения скорости перематывания гусениц), что нуждается в дополнительном исследовании.

Библиографический список

1. **Котиев, Г.О.** Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 8x8 при различных способах управления поворотом / Г.О. Котиев, Н.В. Чернышев, В.А. Горелов // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – №2. – С. 34-39.
2. **Котиев Г.О.** Математическая модель движения вездеходного транспортного средства / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.А. Бекетов // Журнал автомобильных инженеров. – 2008. – №1. – С. 50-54.
3. **Котиев, Г.О.** Математическое моделирование рабочих процессов колесных и гусеничных машин с электромеханическими трансмиссиями / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Сборник статей научно-практической конференции: Разработка и исследование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники, 2016. – С. 76-86.
4. **Котиев, Г.О.** Разработка высокоподвижных бронированных колесных и гусеничных машин нового поколения / Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 3 (15). – С. 30.
5. **Котиев, Г.О.** Алгоритм управления индивидуальным приводом колесных движителей транспортных средств / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011. – № S5. – С. 39-58.

6. **Котиев, Г.О.** Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 12. – С. 11.
7. **Шмаков, А.Ю.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения сочлененных гусеничных машин: дисс. ...канд. техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 121 с.
8. **Красеньков, В.И.** Динамика криволинейного движения транспортной гусеничной машины / В.И. Красеньков, С.А. Харитонов // Труды МВТУ. – 1980. – №339. – С. 3-67.
9. **Эллис, Д.Р.** Управляемость автомобиля / Д.Р. Эллис. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
10. **Рождественский, Ю.Л.** О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию / Ю.Л. Рождественский, К.Ю. Машков // Труды МВТУ. – 1982. – № 390. – С. 56-64.
11. **Дик, А.Б.** Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом: дис. ...канд. техн. наук. – Омск: САДИ. 1988. – 224 с.
12. **Котиев, Г.О.** Комплексное подрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. – 184 с.
13. **Чернецкий, В.И.** Анализ точности нелинейных систем управления / В.И. Чернецкий. – М.: Машиностроение. 1968. – 246 с.
14. **Расшепляев, Ю.С.** Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления / Ю.С. Расшепляев, В.Н. Фандиенко. – М.: Энергия. 1981. – 144 с.
15. **Шалыгин, А.С.** Прикладные методы статистического моделирования / А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1986. – 320 с.
16. **Котиев, Г.О.** Определение скоростных диапазонов многоцелевых колесных и гусеничных машин с электромеханической трансмиссией / Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко, А.А. Стадучин // Труды НАМИ. – 2017. – № 3 (270). – С. 51-55.
17. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины / В.Ф. Платонов, Г.Р. Леиашвили. – М.: Машиностроение. 1986. – 296 с.

*Дата поступления
в редакцию: 05.06.2019*

V.A. Gorelov¹, B.B. Kositsyn¹, A.V. Miroshnichenko², A. A. Stadukhin¹

CHARACTERISTIC DETERMINATION METHOD FOR ELECTRIC DRIVE OF INDEPENDENTLY ACTUATED CATERPILLAR ARTICULATED VEHICLE

Bauman Moscow state technical university¹,
OKB «Tekhnika» (Moscow)²

Purpose: the wide distribution of articulated tracked vehicles due to their high performance, such as maneuverability, high speed and load capacity. Further improvement of such vehicles can be achieved through the use of individual traction electric drive wheels, which will simplify the design of the articulation unit. In addition, the use of this type of transmission will eliminate the need to transfer mechanical power between the sections and expand the ability to control the rotation of the machine, including the use of tank style steering. However, the creation of such machines is difficult due to the lack of methods for determining the required traction motors characteristics, as well as statistical data on their operation.

Design/methodology/approach: to solve the presented problem, a complex of natural-mathematical modeling has been developed. It allows vehicle real-time simulating and investigating the dynamics of articulated tracked vehicles under human control in conditions close to actual operation. The article discusses the hardware of the developed complex, a mathematical model of the dynamics of a articulated tracked vehicle, as well as a method for generating roads and soil conditions.

Findings: the method of results processing the of virtual runs presented in this paper allows, at the design stage, to evaluate the dependence of the average speed on the maximum power of the machine, as well as to determine the requirements for the characteristics of the traction motors used in an individual drive.

Research limitations/implications: the study is limited to considering turning only by folding sections and without using driver assistance systems, which is the direction of further research.

Originality/value: the newly developed method is useful in the development of articulated tracked vehicles.

Keywords: articulated vehicle, electric drive, traction calculation, real-time driving simulator, propulsion motor, mechanical characteristic.