

ГУРСКИЙ Н. Н., НАЖЖАРИН М.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БОЛЬШЕГРУЗНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Белорусский национальный технический университет

Рассмотрена модель прямолинейного курсового движения мобильной машины с тяговым электрическим двигателем постоянного тока. Управление движением обеспечивает контроллер по замкнутой классической схеме с обратной связью. Приведена математическая модель электрического двигателя постоянного тока с учетом диссипации энергии в подшипниках ротора. Расчетная схема мобильной машины включает задатчик скорости, контроллер, тяговый электрический двигатель, редуктор, трансмиссию и поступательно движущуюся массу на упруго-диссипативном колесе. Представлены результаты моделирования движения машины в виде временных процессов изменения управляющих сигналов, напряжения и тока в обмотках двигателя, а также тяговой мощности, развиваемой на колесе.

Введение

Наиболее реальный путь достижения высоких показателей транспортных средств, по мнению специалистов, – использование электромеханической трансмиссии вместо чисто механической. Как известно, такая замена дает целый ряд преимуществ [1]. В настоящее время применяются различные кинематические схемы, в которых электропривод является одной из основных составляющих системы управления движением.

Чтобы синтезировать множество возможных вариантов конструктивного исполнения транспортных средств и выполнить анализ работы силовых устройств электрического и механического характера, нужны имитационные компьютерные модели [2], одна из которых рассматривается в данной статье.

Математическая модель адаптивной системы управления большегрузной машиной

Рассмотрим электромеханическую систему управления движением мобильной машины (объект управления). В качестве исполнительного механизма используется электропривод с двигателем постоянного тока, ось которого соединяется с объектом управления соединительной муфтой, имеющей нелинейные упруго-диссипативные свойства. Расчетная схема системы показана на рисунке 1.

Уравнения движения электромеханической следящей системы мобильной машины с электрическим приводом постоянного тока с учетом диссипации энергии в подшипниках привода и объекта, в том числе типа сухого трения, а также нелинейных упруго-диссипатив-

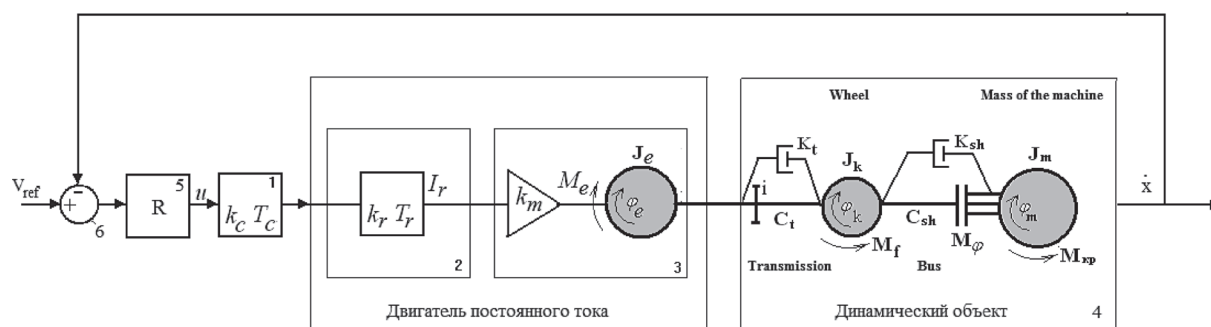


Рисунок 1. - Расчетная электромеханическая схема динамики машины

ных свойств соединительной муфты, имеют вид:

$$\begin{cases} T_c \dot{E}_c + E_c - k_c u = 0, \\ T_r \dot{I}_r + I_r - k_r E_c + k_m k_r \dot{\varphi}_e = 0, \\ J_e \ddot{\varphi}_{e1} + (B_1 \dot{\varphi}_{e1} + M_1 \operatorname{sgn} \dot{\varphi}_{e1}) + \\ + [C_t(\varphi_e - i\varphi_k) + K_t(\dot{\varphi}_{e1} - i\dot{\varphi}_k)] = M_e, \\ M_e = k_m I_r, \\ J_k \ddot{\varphi}_k - [C_t(\varphi_e - i\varphi_k) + K_t(\dot{\varphi}_{e1} - i\dot{\varphi}_k)] = M_c, \\ M_c = [C_{sh}(\varphi_k - \varphi_m \frac{x}{r_k}) + K_{sh}(\dot{\varphi}_k - \frac{\dot{x}}{r_k})], \\ J_m \ddot{\varphi}_m - M_c = -M_{kp}, \\ x = \varphi_m r_k, \\ \dot{x} = \dot{\varphi}_m r_k, \\ \dot{\varphi}_e|_{t=0} = \dot{\varphi}_{e0}, \varphi_e|_{t=0} = \varphi_{e0}; \\ \dot{\varphi}_k|_{t=0} = \dot{\varphi}_{k0}, \varphi_k|_{t=0} = \varphi_{k0}; \\ \dot{\varphi}_m|_{t=0} = \dot{\varphi}_{m0}, \varphi_m|_{t=0} = \varphi_{m0}. \end{cases} \quad (1)$$

Принятые обозначения: I – усилитель управляющего сигнала (k_c – коэффициент усиления, T_c – постоянная времени, $E_{\min} \leq E_c \leq E_{\max}$ – выходное напряжение); 2 – электрическая часть двигателя (k_r – коэффициент усиления тока, T_r – постоянная времени, $I_{\min} \leq I_r \leq I_{\max}$ – ток ротора); 3 – механическая часть двигателя (k_m – паспортный параметр, J_e – момент инерции ротора, φ_e – угол поворота ротора; B_1 – коэффициент вязкого сопротивления в опорах ротора двигателя, M_1 – сухое трение в опорах ротора двигателя в статическом положении); 4 – модель мобильной машины (см. [5]); 5 – регулятор ($u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ – управляющий сигнал); 6 – элемент сравнения; J_k – момент инерции колеса; φ_k – угол поворота колеса; r_k – радиус колеса; J_m – момент инерции маховика, эквивалентного поступательно движущейся

массе машины; φ_m – угол поворота маховика; M_f – момент сопротивления качению колеса; M_{kp} – момент, создаваемый внешней силой нагрузки; C_t – жесткость вала трансмиссии; C_{sh} – жесткость шины; i – передаточное отношение редуктора; M_φ – момента сцепления колеса с дорогой; K_t, K_{sh} – коэффициенты вязкого сопротивления соответственно вала трансмиссии и шины; x – путь, пройденный машиной; \dot{x} – текущая скорость машины; v_{ref} – желаемая скорость машины.

Имитационная модель динамики машины

В соответствие с принятой расчетной схемой и системой уравнений (1) была построена компьютерная модель в среде Matlab-Simulink, показанная на рисунке 2. Эта модель состоит из задатчика курсовой скорости машины, контроллера, электрического двигателя и блока, моделирующего механическую часть мобильной машины.

В качестве контроллера используется PID-регулятор, значение выходной величины которого, описывается выражением:

$$u(t) = k_p \Delta(t) + k_i \int_0^t \Delta(t) d\tau + k_d \frac{d\Delta(t)}{dt},$$

где k_p, k_i, k_d – соответственно коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора; $\Delta(t) = v_{ref}(t) - \dot{x}(t)$ – рассогласование заданной (желаемой) и текущей скоростей в момент времени t .

Модель электрического двигателя постоянного тока (блок Power_block_DC) в развернутом виде представлена на рисунке 3. Как видно, она состоит из двух апериодических звеньев первого порядка – усилителей напряжения и тока с соответствующими ограничителями величин, умножительного блока k_m – паспорт-

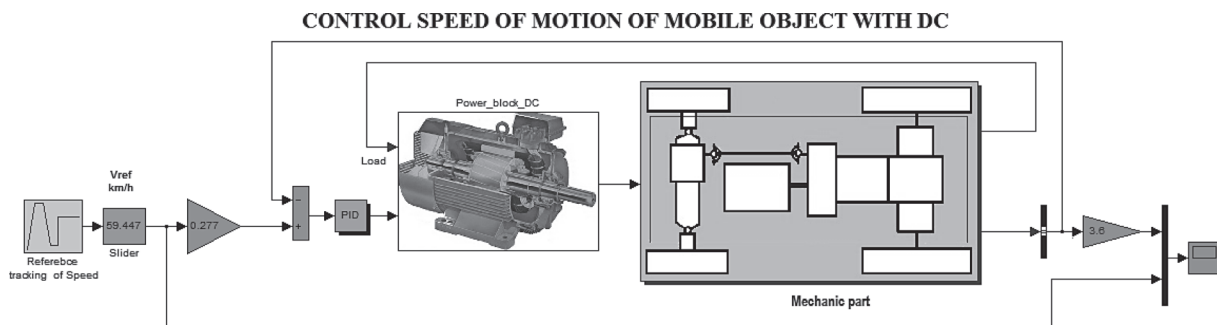


Рисунок 2. - Компьютерная модель машины с электроприводом постоянного тока

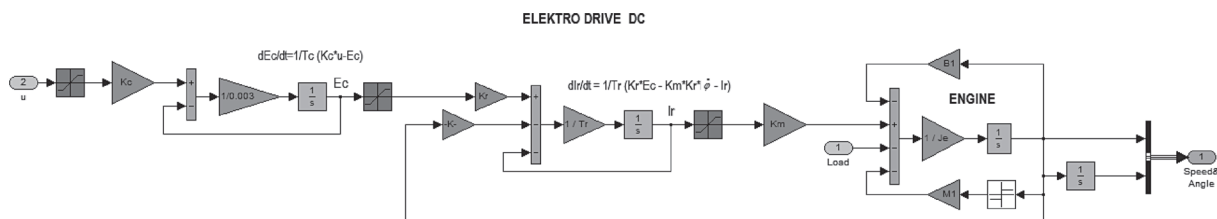


Рисунок 3. - Simulink модель двигателя постоянного тока

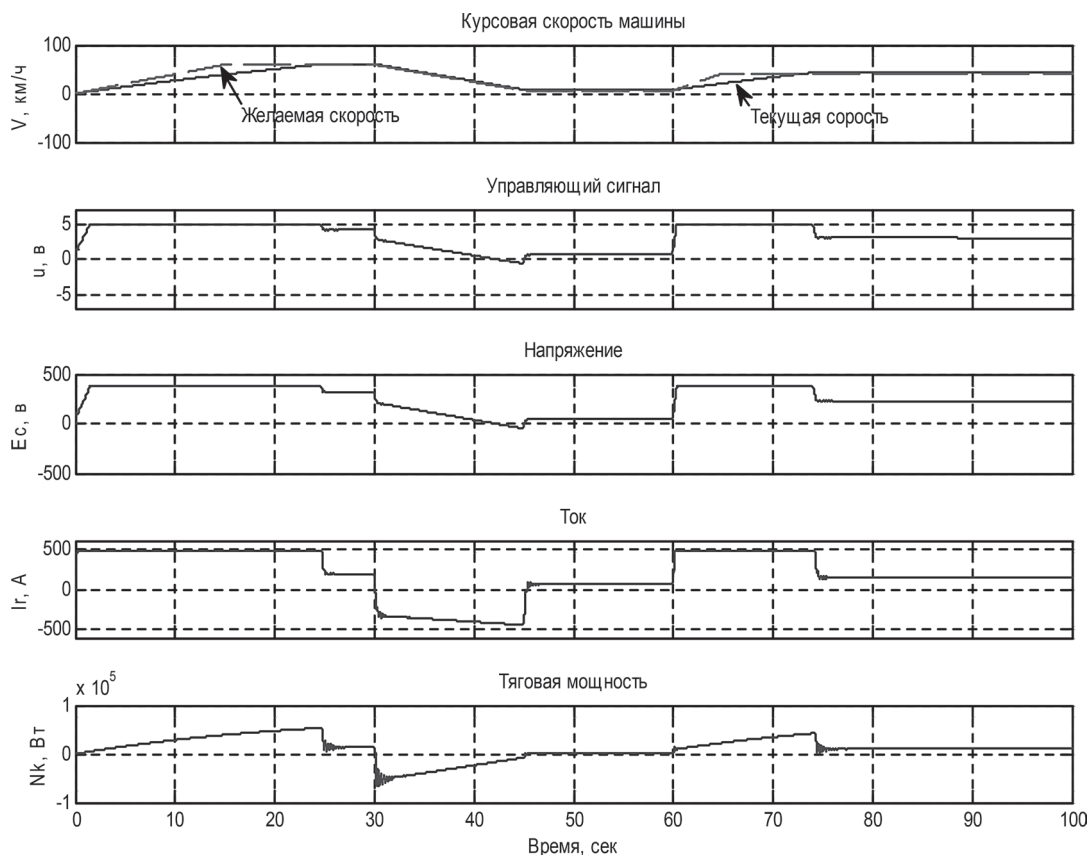


Рисунок 4. - Диаграмма временных процессов при изменении скорости машины

Исходные значения параметров электрического двигателя

Обозначение	Значение	Ед. измерения	Обозначение	Значение	Ед. измерения
k_c	76		I_{min}	-500	A
T_c	0.003	c	I_{max}	500	A
E_{min}	-380	v	k_m	0.45	
E_{max}	380	v	J_e	2.74	$кг \cdot м^2$
k_r	5		B_1	0.1	$н \cdot м \cdot с/рад$
T_r	0.037	c	M_1	0.02	$н \cdot м \cdot с/рад$
u_{min}	-5	v	u_{max}	5	v

ный параметр электродвигателя, приводящий ток к моменту, а также колебательного звена второго порядка, описывающего механическую часть электрического двигателя с трением в опорах ротора.

Параметры электрического двигателя, принятые в расчетах, приведены в таблице.

Численные значения параметров механической части машины описаны в [5].

Результаты моделирования

На рисунке 4 представлены графики переходных процессов (текущей скорости, изменения управляющего сигнала, напряжения и тока

в обмотках электродвигателя) при желаемом изменении скоростного режима большегрузной машины (см. график «Желаемая скорость»).

Временные характеристики приведенных процессов получены при управлении тяговым электрическим двигателем контроллером со следующим законом управления

$$u(t) = 2\Delta(t) + 0.11 \int_0^t \Delta(t) dt + 2 \frac{d}{dt} \Delta(t).$$

Мощность, затрачиваемая на движение (тяговая мощность машины), которая должна поступить на ведущие колеса для преодоления сопротивления движению, вычисляется по формуле

$$N_k = P_k \dot{x},$$

где P_k – окружная сила, развиваемая колесом.

Как видно из представленных графиков, используемый контроллер с выбранными параметрами на этапе разгона машины отрабатывает с небольшим запаздыванием. В тоже время этап торможения практически полно-

стью совпадает с заданной траекторией, определяемой задатчиком движения. Видно также, что управляющий сигнал, напряжение и ток в обмотках двигателя на этапе разгона выходят на заданные ограничения, чем и объясняется отставание текущей скорости машины от желаемой. Тяговая мощность, затрачиваемая на достижение курсовой скорости машины в 60 км/ч за 25 сек, достигает при принятых массовых параметрах и параметрах сопротивления 50 Квт.

Заключение

Разработанные модели электрического двигателя, мобильной машины и регулятора, с полученными параметрами, позволяют провести вычислительный эксперимент по управлению объектов с электроприводами и проанализировать как механические, так и электрические характеристики отдельных используемых блоков и элементов и, в целом, дать оценку эффективности динамики мобильной подвижной системы, в том числе, большегрузной машины, трактора и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Златин, П. А.** Электромобили и гибридные автомобили / П. А. Златин, В. А. Кеменов, И. П. Ксеневич. – Москва: Агроконсалт, 2004. – 413 с.
2. **Гурский, Н. Н.** Моделирование и оптимизация колебаний многоопорных машин: монография / Н. Н. Гурский, Р. И. Фурунжиев. – Минск: БНТУ, 2008. – 296 с.
3. **Гурский, Н. Н.** Виртуальное проектирование ходовой части мобильных машин: монография / Н. Н. Гурский, Ан. М. Захарик, Ал. М. Захарик. – Минск: БНТУ, 2010. – 174 с.
4. **Белоусов, Б. Н.** Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет. / Б. Н. Белоусов, С. Д. Попов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 728 с.
5. **Гурский, Н. Н.** Simulink-модель движения большегрузной машины с нейро-контроллером в контуре управления / Н. Н. Гурский, М. Нажжарин // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 4 – С. 32–38.
6. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007.

Поступила 10.03.15

Hurski N., Najjarin M.

SIMULATION MODELS OF HEAVY TRUCKS TRAFFIC CONTROL WITH ELECTRIC DC DRIVE

A model of the straight course of movement of the mobile machine with a traction electric motor DC. Traffic management controller provides a closed classical scheme with feedback. The mathematical model of the electric DC motor with the energy dissipation in the rotor bearings. Design scheme of mobile machines include speed dial controller, traction electric motor, gearbox, transmission and progressively moving mass on the elastic-dissipative wheel. The results of the simulation of the machine in the form of temporary processes of change control signals, voltage and current in the windings of the motor and traction power developed on the wheel.