

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕДВИЖЕНИЯ НАПОЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С КАБЕЛЬНЫМ ПИТАНИЕМ ОТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ

*В.И. Котенев, А.В. Котенев, С.В. Серюгин, А.Н. Татарников*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматривается математическая модель электропривода постоянного тока с электродвигателем последовательного возбуждения со связями по току и напряжению и упругой взаимосвязью между массой транспортного средства и массой транспортируемого груза.*

**Ключевые слова:** *напольное транспортное средство, кабельное питание, электродвигатель постоянного тока последовательного возбуждения, электропривод, система управления, упругая связь.*

К плавности и стабильности скорости передвижения напольных транспортных средств [1-5] предъявляются достаточно высокие требования. Особенно это актуально при работе вблизи места расположения поддонов с грузом, так как при плавных ускорениях и стабильных скоростях передвижения появляется возможность производить работу с меньшим браком и более высокой производительностью.

В данной работе рассматривается электропривод передвижения напольного транспортного средства со связями по току электродвигателя последовательного возбуждения и с учетом упругого взаимодействия между массами транспортируемого груза и транспортного средства.

Составим уравнение движения транспортного средства:

$$F_1 = F_c + F_k + F_y + F_{д1}. \quad (1)$$

Сила  $F_1$  на ободу колеса, развиваемая электродвигателем передвижения, уравновешивается силой сопротивления движению транспортного средства  $F_c$ , силой натяжения питающего кабеля  $F_k$ , упругой силой  $F_y$  взаимодействия между массой транспортного средства  $m_1$  и массой транспортируемого груза  $m_2$ , а также усилием от ускорения транспортного средства  $F_{д1}$ .

Сила упругого взаимодействия между массами

$$F_y = c'_{12} \int (V_1 - V_2) dt + \beta'_{12} (V_1 - V_2), \quad (2)$$

где  $c'_{12}$  – жесткость связи между массами;  $V_1$  и  $V_2$  – скорость движения массы  $m_1$  и  $m_2$ ;  $\beta'_{12}$  – коэффициент вязкого трения, которое возникает при деформации механизма оборудования.

*Виктор Иванович Котенев (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Александр Викторович Котенев (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Сергей Валерьевич Серюгин, аспирант.*

*Алексей Николаевич Татарников, студент.*

Сила сопротивления движению

$$F_c = \frac{\mu_1(m_1 + m_2)g}{R_k}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu_1$  – коэффициент, зависящий от рельефа дороги и трения колеса о поверхность дороги;  $R_k$  – радиус приводного колеса.

Динамическая сила

$$F_{д1} = \left( m_1 + \frac{J_d + J_p}{\rho} \right) \frac{dV_1}{dt} \quad (4)$$

определяется массой порожнего транспортного средства, моментами инерции электродвигателя и редуктора, а также его ускорением и радиусом приведения

$$\rho = \frac{V_1}{\omega_1} = \frac{R_k}{i}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – угловая скорость электродвигателя передвижения;  $i$  – передаточное число редуктора.

Сила упругого взаимодействия двух масс уравнивается второй динамической силой

$$F_y = F_{д2} = m_2 \frac{dV_2}{dt}, \quad (6)$$

которая возникает при ускорении второй массы.

Движение электропривода описывается системой уравнений, составленной с учетом уравнений (1) – (6):

$$\begin{aligned} \Delta V_1(p) &= \frac{1}{J'_1 p} (\Delta M(p) - \Delta M_c(p) - \Delta M_k(p) - \Delta M_y(p)); \\ \Delta \omega_1(p) &= \frac{1}{\rho} \Delta V_1(p); \\ \Delta F_y(p) &= \rho \left( \frac{c'_{12}}{p} + \beta'_{12} \right) (\Delta \omega_1(p) - \Delta \omega_2(p)); \\ \Delta M_y(p) &= \rho \Delta F_y(p); \\ \Delta V_2(p) &= \frac{1}{J'_2 p} \Delta M_y(p); \\ \Delta \omega_2(p) &= \frac{1}{\rho} \Delta V_2(p); \\ J'_1 &= m_1 \rho + \frac{(J_d + J_p)}{\rho}; \quad J'_2 = m_2 \rho; \\ \Delta M_k(p) &= R_k \Delta F_k(p). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнениям (7) соответствует структурная схема механической части электропривода передвижения транспортного средства (рис. 1). Эту схему можно представить и в более компактном виде (рис. 2).

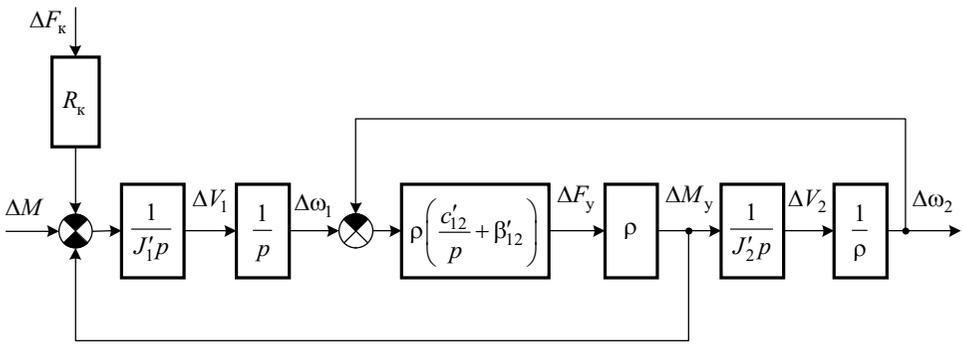


Рис. 1. Структурная схема механической части электропривода передвижения

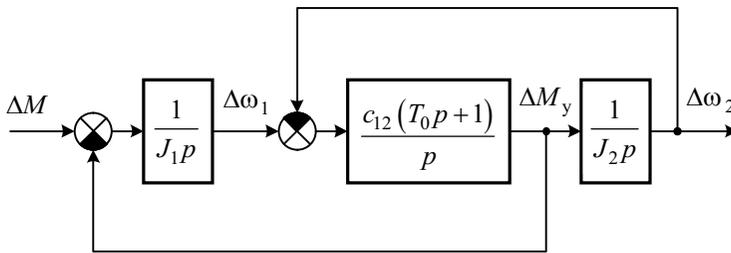


Рис. 2. Преобразованная структурная схема механической части электропривода передвижения

На этой схеме:  $c_{12} = c'_{12}\rho^2$ ;  $J_1 = m_1\rho^2 + 1,2J_d$ ;  $J_2 = m_2\rho^2$ ;  $T_0 = \frac{\beta'_{12}}{c'_{12}}$ .

Получим передаточную функцию от момента двигателя к упругому моменту

$$W_1(p) = \frac{\Delta M_y(p)}{\Delta M(p)} = \frac{\frac{1}{J_1 p} W_3(p)}{1 + \frac{1}{J_1 p} W_3(p)}.$$

Передаточная функция эквивалентного звена

$$W_3(p) = \frac{\Delta M_y(p)}{\Delta \omega_1(p)} = \frac{\frac{c_{12}(T_0 p + 1)}{p}}{1 + \frac{c_{12}(T_0 p + 1)}{p}}.$$

Тогда

$$W_1(p) = \frac{J_2}{J_1 + J_2} \frac{T_0 p + 1}{T_4^2 p + T_0 p + 1}, \quad (8)$$

где

$$T_4 = \frac{J_1 J_2}{c_{12}(J_1 + J_2)}; \quad (9)$$

$$T_0 = 2\varepsilon T_4. \quad (10)$$

Для транспортного средства ЭП-103К:  $J_1 = 1400 \cdot 0,03^2 + 1,2 \cdot 0,023 = 1,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $J_1 = 1200 \cdot 0,03^2 = 1,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $\rho = 0,03 \text{ м}$ ,  $c_{12} = c'_{12} \rho^2 = 9615 \cdot 0,03^2 = 8,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $c'_{12} = 9615 \text{ Н/м}$  (из эксперимента), постоянная времени (9)  $T_4 = 0,26 \text{ с}$ , постоянная времени (10) при  $\varepsilon \approx 0,5$  (из эксперимента) составит  $T_0 = 2 \cdot 0,5 \cdot 0,26 = 0,26 \text{ с}$ .

Математическая модель электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения представлена системой операторных уравнений [6]:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{я}}(p) &= W_1(p) [\Delta U_{\text{п}}(p) - \Delta E(p)]; \\ \Delta \Phi(p) &= k_{\text{в}} W_2(p) \Delta I_{\text{я}}(p); \\ \Delta E(p) &= \frac{E_0}{\Phi_0} \Delta \Phi(p) + \frac{E_0}{\omega_0} \Delta \omega(p); \\ \Delta M(p) &= \frac{M_0}{I_{0\text{я}}} \Delta I_{\text{я}}(p) + \frac{M_0}{\Phi_0} \Delta \Phi(p); \\ \Delta M_{\Sigma}(p) &= \Delta M(p) - R_{\text{к}} \Delta F_{\text{к}}(p) - \Delta M_{\text{с}}(p) - \Delta M_{\text{y}}(p); \\ \Delta \omega(p) &= \frac{1}{J_1 p} \Delta M_{\Sigma}(p); \\ \Delta M_{\text{y}}(p) &= \frac{c_{12}(T_0 p + 1)}{p} \left[ \Delta \omega(p) - \frac{1}{J_2 p} \Delta M_{\text{y}}(p) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

где  $U, E$  – напряжение и ЭДС электродвигателя;  $I_{\text{я}}, I_{\text{в}}$  – ток якоря и ток возбуждения, которые в установившемся режиме равны друг другу;  $\Phi, M$  – магнитный поток и момент электродвигателя;  $M_0, \Phi_0, E_0, \omega_0, I_{0\text{я}}$  – установившиеся значения соответствующих величин, относительно которых произведена линеаризация;  $k_{\text{в}}$  – коэффициент пропорциональности.

Передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{T_1 p + 1}{R_1 (a_2 p^2 + a_1 p + 1)}; \quad (12)$$

$$W_2(p) = \frac{T_{32} p + 1}{T_1 p + 1}; \quad (13)$$

$$a_1 = T_{11} + T_{21} + T_{22} + T_{32}; \quad a_2 = T_{11} T_1 + T_{21} T_{32}; \quad T_1 = T_{22} + T_{32}; \quad R_1 = R_{\text{я}} + R_{\text{в}}, \quad (14)$$

где  $T_{ij} = \frac{L_i}{R_j}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,  $j = 1, 2$ ;  $L_1, R_{\text{я}}$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки якоря;  $L_2, R_{\text{в}}$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения;  $L_3, R_2$  – индуктивность и активное сопротивление участка цепи, по которому протекают вихревые токи.

Неизвестные значения  $L_3, R_2$  получены из рассмотрения задачи идентификации

объекта управления. С этой целью выражение (12) записано в виде

$$u(p) = \frac{\Delta I_{\text{я}}(p) R_1}{\Delta U} = \frac{T_1 p + 1}{p(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}, \quad (15)$$

на основании которого составлена система уравнений с неизвестными  $L_3, R_2$ :

$$(T_1 - T_2)e^{-\frac{t_i}{T_2}} + (T_1 - T_3)e^{-\frac{t_i}{T_3}} + 1 - u(t_i) = 0, \quad i = 1, 2, \quad (16)$$

где

$$T_2 = \frac{2a_2}{a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}; \quad T_3 = \frac{2a_2}{a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2}}. \quad (17)$$

Значения  $u(t_i)$  получены из экспериментальной переходной функции. Для электродвигателя мощностью  $P = 3$  кВт,  $U_{\text{н}} = 40$  В,  $R_2 = 0,011$  Ом,  $R_{\text{в}} = 0,014$  Ом,  $R_{\text{я}} = 0,011$  Ом,  $L_1 = 1,09 \cdot 10^{-3}$  Гн,  $L_2 = 2,4 \cdot 10^{-3}$  Гн при  $I_{\text{я}} = 100$  А из эксперимента получено  $u(0,02) = 0,2$ ;  $u(0,03) = 0,36$ . Из решения уравнений (16) с учетом (14), (17) имеем  $L_3 = 8,1 \cdot 10^{-4}$  Гн;  $R_2 = 0,105$  Ом. Постоянные времени  $T_{22} = 0,023$  с;  $T_{32} = 7,7 \cdot 10^{-3}$  с;  $T_2 = 0,0136$  с;  $T_3 = 0,135$  с.

Эксперимент проводился на действующей установке при  $U = U_1 + \Delta U$ , где  $U_1 = 2,4$  В,  $\Delta U = 1,2$  В.

Дополнив систему уравнений (11) уравнениями

$$\Delta U_{\text{рн}}(p) = [\Delta U_{\text{з}} W_{\text{зи}}(p) - k_{\text{он}} \Delta U_{\text{п}}(p)] W_{\text{рн}}(p);$$

$$\Delta U_{\text{рт}}(p) = [\Delta U_{\text{рн}}(p) - k_{\text{от}} \Delta I_{\text{я}}(p)] W_{\text{рт}}(p);$$

$$\Delta U_{\text{п}}(p) = \Delta U_{\text{рт}}(p) \frac{k_{\text{п}}}{T_{\text{п}} p + 1}$$

можно построить структурную схему системы управления электроприводом передвижения (рис. 3). На этой схеме:  $k_{\text{от}}$ ,  $k_{\text{он}}$  – коэффициенты передачи цепей обратных связей по току и напряжению;  $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{в}}$  – коэффициенты передачи преобразователя напряжения и цепи возбуждения;  $T_{\text{п}}$  – постоянная времени преобразователя напряжения;  $W_{\text{зи}}(p)$ ,  $W_{\text{рн}}(p)$ ,  $W_{\text{рт}}(p)$  – передаточные функции задатчика интенсивности, регуляторов напряжения и тока.

Контур регулирования тока настраивается по условиям модульного оптимума. Передаточная функция регулятора тока совпадает с передаточной функцией реального ПИД-регулятора [7]:

$$W_{\text{пр}}(p) = k_{\text{пр}} \frac{\alpha T_{\text{и}}^2 p^2 + T_{\text{и}} p + 1}{T_{\text{и}} p (T_6 p + 1)},$$

где

$$k_{\text{пр}} = \frac{k_{\text{п}} a_1 R_1}{2k_{\text{от}} T_{\text{п}}}; \quad \alpha = \frac{a_2}{a_1^2}; \quad T_6 = T_1.$$

Электропривод передвижения с таким регулятором будет нормально функцио-



6. *Котенев А.В.* Математические модели двигателей постоянного тока при быстрых изменениях магнитного потока // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2004. – № 24. – С. 167-171.
7. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.

*Статья поступила в редакцию 20 апреля 2012 г.*

## **THE VEHICULAR MOVEMENT ELECTRIC DRIVE OF THE FLOOR VEHICLE WITH A CABLE POWER SUPPLY FROM THE INDUSTRIAL ELECTRIC SYSTEM**

***V.I. Kotenev, A.V. Kotenev, S.V. Seriugin, A.N. Tatarnikov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*In this paper the mathematical model of the DC series excitation motor drive with the motor voltage and current feedback and the elastic linkage between the vehicle mass and the mass of cargo is considered.*

***Keywords:*** *electric floor vehicle, cable power supply, DC series excitation motor, electric drive, control system, elastic linkage.*

---

*Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Alexander V. Kotenev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Sergey V. Seriugin, Postgraduate Student.  
Aleksey N. Tatarnikov, Postgraduate Student.*