

УДК 621.313.2

Б.Г.ЛЮБАРСКИЙ, канд. техн. наук, Е.С.РЯБОВ, Т.В.ГЛЕБОВА  
*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*  
М.Л.ГЛЕБОВА, канд. техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ**

Рассматриваются вопросы разработки математической модели тягового привода для подвижного состава на основе двигателей с поперечным полем.

Сегодня тяговый и моторвагонный подвижной состав железных дорог и городского электротранспорта нуждается в замене или, по крайней мере, в модернизации. С одной стороны, это вызвано физическим износом техники, срок эксплуатации которой в некоторых случаях достигает 40 лет, а с другой – достижения в области силовой электроники, преобразовательной и микропроцессорной техники, материаловедения, электромашиностроения позволяют создать подвижной состав с существенно улучшенными параметрами и показателями. С достаточной степенью уверенности можно сказать, что наиболее важным является снижение уровня энергопотребления. Эта задача, в первую очередь, решается путем создания энергосберегающего тягового электропривода на основе применения современных технологий.

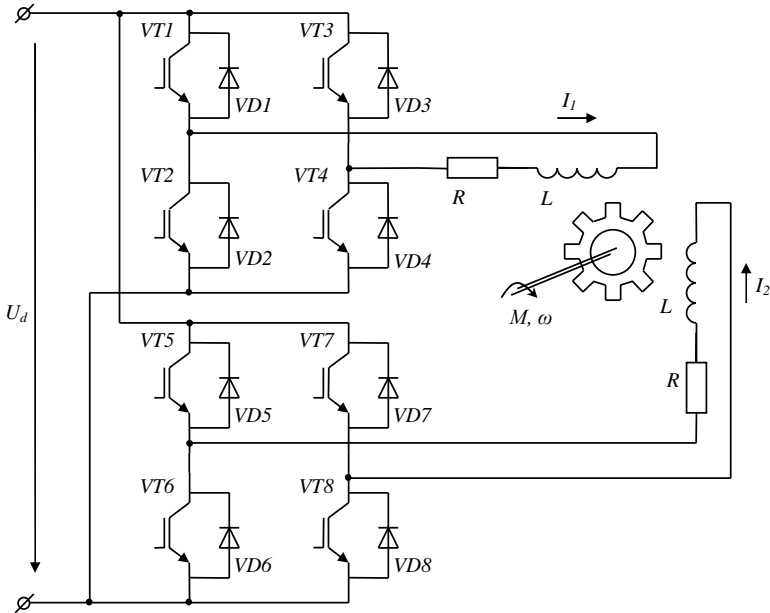
На электроподвижном составе передовых в техническом отношении стран сейчас используются тяговые электроприводы на базе асинхронных двигателей [1-4] и рассматривается вопрос о создании подвижного состава с тяговыми синхронными двигателями, одним из типов которого является двигатель с поперечным полем. Показатель удельной массы у последних на 60-70% лучше, чем у асинхронных. Основной проблемой при создании тягового привода такого типа является создание адекватной математической модели описывающей работу такого рода привода. Поэтому научные исследования, направленные на создание математической модели двигателей с поперечным полем, являются актуальными.

Цель настоящей работы – разработать математическую модель тягового привода на основе двигателя с поперечным полем.

Принципиальная схема силовых цепей тягового электропривода показана на рисунке.

Тяговый преобразователь состоит из двух однофазных автономных инверторов напряжения, соединенных параллельно по входу. Напряжение питания  $U_d$  регулируется с помощью импульсного прерывателя постоянного тока (на рисунке не показан). Тяговый двигатель

представлен в виде RL-нагрузки, параметры которой определяются по вышеизложенной методике. Система управления (на рисунке не показана) отслеживает частоту вращения ротора и величины фазных токов, и в зависимости от принятого закона управления, формирует управляющие импульсы для открытия или закрытия IGBT-транзисторов.



Принципиальная схема силовых цепей тягового электропривода

Уравнение цепи фазы ротора в мгновенных значениях имеет вид:

$$u = i \cdot R + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

где  $u$  – мгновенное значение напряжения;  $i$  – мгновенное значение тока фазы;  $\Psi$  – мгновенное значение потокосцепления фазы;  $R$  – активное сопротивление фазы статора.

Учитывая, что  $\Psi = L \cdot i$ , где  $L = f(t)$  и  $i = f(t)$ , по правилам дифференцирования сложной функции получим:

$$\frac{d\Psi}{dt} = i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

Подставим (1) в (2):

$$u = i \cdot R + i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt}.$$

Выразим дифференциал угловой координаты через дифференциал времени  $d\gamma = \omega dt$ , где  $\omega$  – угловая частота вращения ротора,  $c^{-1}$ , получим:

$$u = i \cdot R + \omega \cdot i \frac{dL}{d\gamma} + \omega \cdot L \frac{di}{d\gamma}. \quad (3)$$

Осуществляя переход к электрическим градусам, окончательно будем иметь:

$$u = i \cdot R + \frac{180}{\pi} p \cdot \omega \cdot i \frac{dL}{d\theta} + \frac{180}{\pi} p \cdot \omega \cdot L \frac{di}{d\theta}. \quad (4)$$

Переходя к конечным разностям, получим:

$$u_n = i_n \cdot R + \frac{180}{\pi} p \cdot \omega \cdot i_n \frac{L(\theta_n) - L(\theta_{n-1})}{\theta_n - \theta_{n-1}} + \frac{180}{\pi} p \cdot \omega \cdot L(\theta_n) \frac{i_n - i_{n-1}}{\theta_n - \theta_{n-1}}. \quad (5)$$

Выразим  $\theta_n - \theta_{n-1}$  через шаг интегрирования  $h$ :

$$\theta_n - \theta_{n-1} = \frac{180}{\pi} p \cdot \omega \cdot h. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим:

$$u_n = i_n \cdot R + i_n \frac{L(\theta_n) - L(\theta_{n-1})}{h} + L(\theta_n) \frac{i_n - i_{n-1}}{h}. \quad (7)$$

Решая уравнение (7) относительно  $i_n$ , получим расчетную формулу

$$i_n = \frac{u_n + \frac{L(\theta_n)}{h} i_{n-1}}{R + \frac{2L(\theta_n) - L(\theta_{n-1})}{h}}. \quad (8)$$

Полученное выражение является численным решением дифференциального уравнения (1) методом Эйлера.

Примем, что  $u_n = U_{dn} \cdot K_n$ , где  $U_{dn}$  – величина напряжения на  $n$  шаге интегрирования;  $K_n$  – коммутационная функция на  $n$  шаге интегрирования, определяющая полярность приложенного к двигателю напряжения относительно выбранного положительного направления. Коммутационная функция  $K_n$  может принимать значения  $+1, 0, -1$  в зависимости от угла поворота и величины тока фазы.

Тогда формула для вычисления значения фазного тока на  $n$  шаге интегрирования примет вид:

$$i_n = \frac{U_{dn} \cdot K_n + \frac{L(\theta_n)}{h} i_{n-1}}{R + \frac{2 \cdot L(\theta_n) - L(\theta_{n-1})}{h}} \quad (9)$$

Дополним уравнение электрической цепи дифференциальными уравнениями движения ротора:

$$\begin{cases} J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\Sigma} - M_c \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega \end{cases}, \quad (10)$$

где  $M_{\Sigma}$  – суммарный электромагнитный момент двигателя;  $M_c$  – момент сопротивления на валу;  $J_{\Sigma}$  – момент инерции привода.

Электромагнитный момент каждой фазы вычисляем после расчета тока, используя полученную ранее зависимость  $M(\gamma, I)$ , которая интерполирована средствами MATLAB. После этого вычисляем суммарный электромагнитный момент двигателя.

Выполняя аналогичные преобразования, запишем формулы определения угловой скорости и угловой координаты на  $n$  шаге интегрирования.

Частоту вращения  $\omega_n$  вычисляем по формуле

$$\omega_n = \omega_{n-1} + \frac{M_{\Sigma} - M_c}{J_{\Sigma}} h, \quad (11)$$

где  $\omega_n$  – частота вращения на  $n$  шаге интегрирования;  $\omega_{n-1}$  – частота вращения на  $n-1$  шаге интегрирования.

Приращение угла поворота, выраженное в электрических градусах, равно:

$$\Delta\theta_n = \frac{180}{\pi} p \cdot \omega_n \cdot h. \quad (12)$$

Значение угла поворота на следующем шаге интегрирования определяем из выражения

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \Delta\theta_n. \quad (13)$$

Дополнив выражения (10)-(13) начальными условиями (начальным смещением ротора  $\theta(0)$  относительно нулевого положения, на-

чальной скоростью вращения  $\omega(0)$ , начальными значениями фазных токов  $i_1(0)$  и  $i_2(0)$ ) получим систему уравнений, которая позволяет рассчитывать различные режимы работы тягового привода на базе двигателя с поперечным полем. Значения шага интегрирования  $h$ , момента инерции  $J_\Sigma$ , момента сопротивления  $M_c$  или закона его изменения, а также закон изменения  $U_d$  должны быть заданы. Условием завершения расчета может служить достижение конца временного интервала, выход на установившуюся скорость.

Таким образом, обобщенная математическая модель тягового электропривода на основе двухфазного двигателя с поперечным полем содержит уравнения электрического равновесия для цепи каждой фазы, уравнение движения ротора, зависимости момента от угла поворота ротора и тока фазы и имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = i_1 \cdot R + \omega \cdot i_1 \cdot \frac{dL_1}{d\gamma_1} + L_1(\gamma_1) \cdot \frac{di_1}{dt} \\ J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_\Sigma - M_c \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega \\ L_1 = f(\gamma_1), L_2 = f(\gamma_2), M_\Sigma = M_1(\gamma_1, i_1) + M_2(\gamma_2, i_2) \end{array} \right. , \quad (14)$$

где  $u_1, u_2$  – мгновенные напряжения первой и второй фаз двигателя соответственно;  $i_1, i_2$  – мгновенные токи первой и второй фаз двигателя соответственно;  $\gamma_1, \gamma_2$  – угол поворота ротора в системе отсчета первой и второй фаз двигателя;  $\gamma$  – угол поворота ротора;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $R$  – активное сопротивление фазы;  $L_1 = f(\gamma_1), L_2 = f(\gamma_2)$  – мгновенные индуктивности первой и второй фаз;  $M_\Sigma, M_1(\gamma_1, i_1), M_2(\gamma_2, i_2)$  – суммарный электромагнитный момент двигателя, электромагнитный момент первой и второй фаз;  $M_c$  – момент сопротивления.

Для численного решения системы (14) должны быть заданы начальные значения токов фаз  $i_1(0)$  и  $i_2(0)$ , начальная скорость вращения  $\omega(0)$ , начальное смещение ротора  $\gamma(0)$ .

Обобщенная программно-ориентированная модель имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_n = \frac{U_{dn} \cdot K_n + \frac{L(\theta_n)}{h} \cdot i_{n-1}}{R + \frac{2L(\theta_n) - L(\theta_{n-1})}{h}} \\ \omega_n = \omega_{n-1} + \frac{M_\Sigma - M_c}{J_\Sigma} \cdot h \\ \theta_{n+1} = \theta_n + \frac{180}{\pi} \cdot p \cdot \omega_n \cdot h \end{array} \right. .$$

Таким образом, разработанная математическая и программно-ориентированная модель позволяет провести моделирование тягового привода на основе двигателя с поперечным полем в различных режимах работы.

1.Омельяненко В.И., Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Демидов А.В., Глебова Т.В. Электродвигатели для перспективного подвижного состава // Локомотив-информ. – 2008. – №1. – С.16-19.

2.Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Демидов А.В. Перспективный тяговый привод на базе двигателей с поперечным полем // Залізничний транспорт України. – 2007. – №2/1. – С.46-48.

3.Wilhelm Hackmann. Systemvergleich unterschiedlicher Radnabenantriebe für den Schienennahverkehr: Asynchronmaschine, permanenterregte Synchronmaschine, Transversalflussmaschine. Doktor-Ingenieurs vorgelegte Dissertation, Technischen Universitat Darmstadt, 214p., 2003.

4.Тяговый двигатель с возбуждением постоянными магнитами // Железные дороги мира. – 2004. – №9 (Т.Кlockow et al. Elektrische Bahnen. – 2003. – №3. – S.107- 112.)

*Получено 24.03.2008*

УДК 621.824.6

Н.Л.РЯБЧИКОВ, д-р техн. наук, Т.А.ОБОЛЕНСКАЯ, канд. техн. наук  
Українська інженерно-педагогічна академія, г.Харьков

## **ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ НАУЧНЫХ ТЕОРИЙ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВАЛОВ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Проанализированы основные тенденции в развитии систем жидконаполненных вращающихся устройств. Обобщено понятие теории технических систем. Разработана система графов жидконаполненных валов. Разработанные методы позволяют прогнозировать валы с новыми свойствами и возможностями.

Современный этап развития техники характеризуется большим