

5.Аракелов В.Е., Кремер А.И. Методические вопросы экономии энергоресурсов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.

6.Будниченко В.Б. Критерии оценки потерь электроэнергии в конструкции подвижного состава // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.23. – К.: Техніка, 2003. – С.193-197.

7.Далека В.Ф., Минеева Ю.В., Хворост Н.В. Требования к устройствам уменьшения неравномерности распределения мощностей между тяговыми электродвигателями // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.9. – К.: Техніка, 1997. – С.89-92.

8.Далека В.Ф., Храповицкий И.С., Минеева Ю.В., Хворост Н.В. Статистический анализ диаметров бандажей колесных пар вагонов метрополитена // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.12. – К.: Техніка, 1997. – С.94-95.

*Отримано 05.09.2008*

УДК 621.313.2

Б.Г.ЛЮБАРСКИЙ, канд. техн. наук, Е.С.РЯБОВ, Т.В.ГЛЕБОВА

*Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков*

М.Л.ГЛЕБОВА, канд. техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ**

Рассматриваются вопросы математического моделирования тягового привода для подвижного состава на основе двигателей с поперечным полем.

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 которых 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. В работах [5, 6] рассмотрена математическая модель тягового привода на основе двигателей с поперечным полем и модель магнитного поля такого двигателя позволяющая идентифицировать математическую модель.

Цель данной работы – провести математическое моделирование тягового привода на основе двигателя с поперечным полем .

На рис.1 представлена конструктивная схема тягового привода на основе двигателя с поперечным полем, а на рис.2 – принципиальная схема силовых цепей тягового электропривода.

Тяговый преобразователь состоит из двух однофазных автономных инверторов напряжения, соединенных параллельно по входу. Напряжение питания  $U_d$  регулируется с помощью импульсного прерыва-

теля постоянного тока.

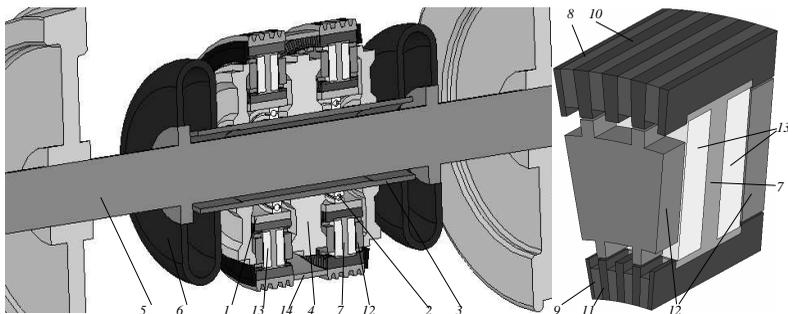


Рис.1 – Тяговый привод и схема конструкции фазы двигателя с поперечным полем: 1 – внутренний корпус статора; 2 – подшипник; 3 – полый вал; 4 – диск ротора; 5 – ось колесной пары; 6 – муфта; 7 – сердечник статора; 8 – постоянный магнит наружного кольца; 9 – постоянный магнит внутреннего кольца; 10 – пластина внешнего кольца из ферромагнитного материала; 11 – пластина внутреннего кольца из ферромагнитного материала; 12 – ферромагнитный ротор; 13 – катушка обмотки статора; 14 – наружный корпус статора.

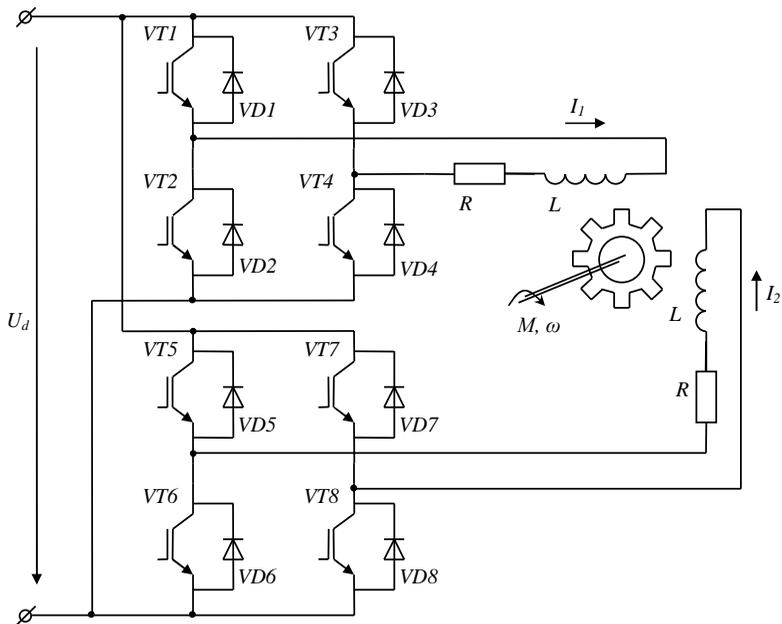


Рис. 2 – Принципиальная схема силовых цепей тягового электропривода

Тяговый двигатель представлен в виде RL-нагрузки, параметры которой определяются по методике [5, 6]. Система управления (на рис. 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.

Обобщённая 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = i_1 \cdot R + \omega \cdot i_1 \cdot \frac{dL_1}{d\gamma_1} + L_1(\gamma_1) \cdot \frac{di_1}{dt} \\ u_2 = i_2 \cdot R + \omega \cdot i_2 \cdot \frac{dL_2}{d\gamma_2} + L_2(\gamma_2) \cdot \frac{di_2}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_\Sigma - M_c \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega \\ L_1 = f(\gamma_1) \\ L_2 = f(\gamma_2) \\ M_\Sigma = M_1(\gamma_1, i_1) + M_2(\gamma_2, i_2) \end{array} \right. , \quad (1)$$

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 отсчёта 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 (1) 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:

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

Блок-схема моделирования режимов работы тягового привода приведена на рис.3.

При моделировании тягового привода рассмотрен процесс пуска тягового привода – разгон электропоезда. Принят закон управления при ограничении фазного тока, т.е. если фазный ток превышает уставку тока  $I_{уст}$ , то фаза двигателя отключается от источника путём подачи запирающего импульса на проводящие транзисторы. Полярность напряжения фазы зависит от угловой координаты ротора. В математической модели полярность задаётся с помощью коммутационной функции. Напряжения звена постоянного тока  $U_d$  постоянно и равно 750 В.

Для своевременного уменьшения тока до нуля и смене его направления вводится угол опережения подачи управляющего импульса на транзисторы, который вычисляется по формуле

$$\theta_1 = \frac{180}{\pi} \cdot p \cdot \omega \cdot \frac{L_{\max}}{R} \cdot \ln\left(1 + \frac{I_\phi}{U_d}\right), \tag{3}$$

где  $\theta_1$  – угол опережения подачи управляющего импульса, эл.град;  $p$  – число пар полюсов;  $\omega$  – угловая частота вращения,  $c^{-1}$ ;  $L_{\max}$  – максимальное значение индуктивности фазы, Гн;  $R$  – сопротивление фазы, Ом;  $I_\phi$  – текущее значение тока фазы, А;  $U_d$  – напряжение звена постоянного тока, В.

Величина шага интегрирования принята равной 0,0001с исходя из того, чтобы при максимальной скорости вращения приращение угла за один шаг интегрирования составляло 15-20 эл.град.

На рис.4 приведена зависимость среднего суммарного момента двигателя от тока уставки.

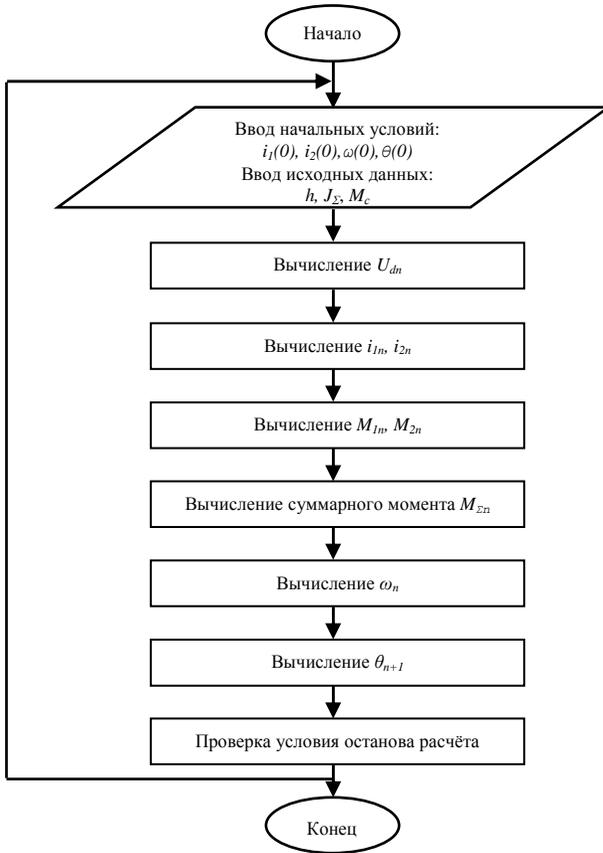


Рис.3 – Блок-схема расчётов режимов работы привода

На рис.5-9 приведены результаты моделирования режима разгона двигателя. При моделировании принято: напряжения звена постоянного тока равным 200 В, ток уставки 350 А, момент инерции ротора 20 кг·м<sup>2</sup>, момент сопротивления равен нулю.

Из рис.5 видно, что электромагнитный момент на интервале времени 0-0,5 с пульсирует вокруг среднего значения 10000 Нм. Далее величина момента уменьшается по гиперболическому закону. Это объясняется следующим. На рис.6, 7 приведена осциллограмма напряжения и тока в начале пуска. Здесь видно, что ток под действием прило-

женного напряжения нарастает до значения тока уставки, после чего система управления снимает напряжение и ток протекает под действием ЭДС самоиндукции. При снижении тока до 350 А фаза снова подключается к источнику напряжения и процесс повторяется. При повороте на угол  $(180-\theta_1)$  эл.град ( $\theta_1$  – угол опережения подачи управляющего импульса) к фазной катушке прикладывается напряжение обратной полярности и ток изменяет своё направление. Далее процесс повторяется.

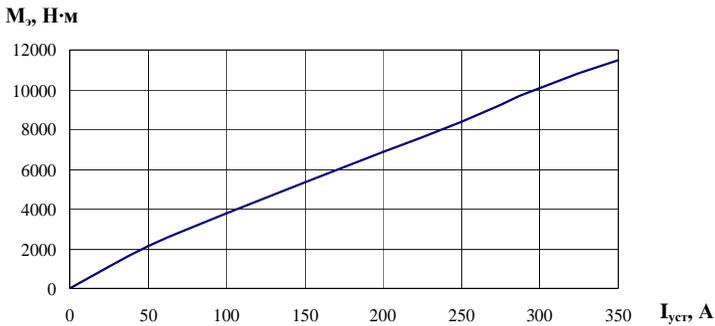


Рис.4 – Зависимость электромагнитного момента от тока уставки двигателя

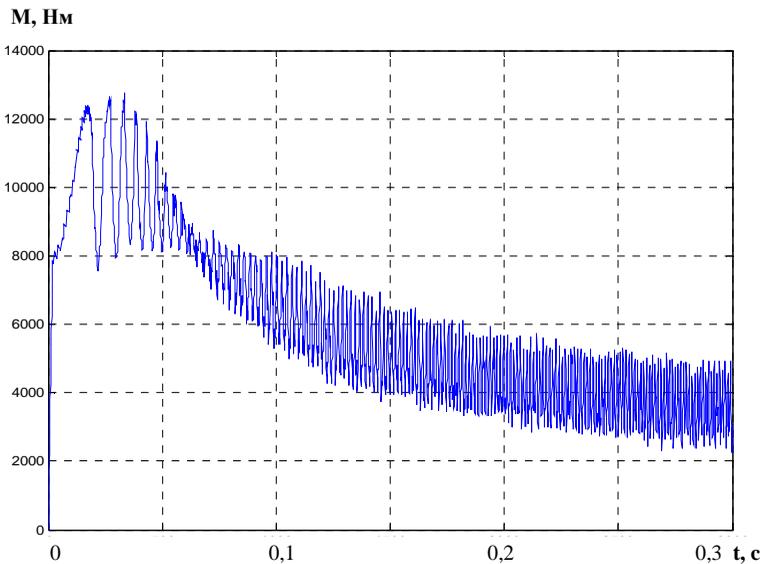


Рис.5 – Осциллограмма электромагнитного момента

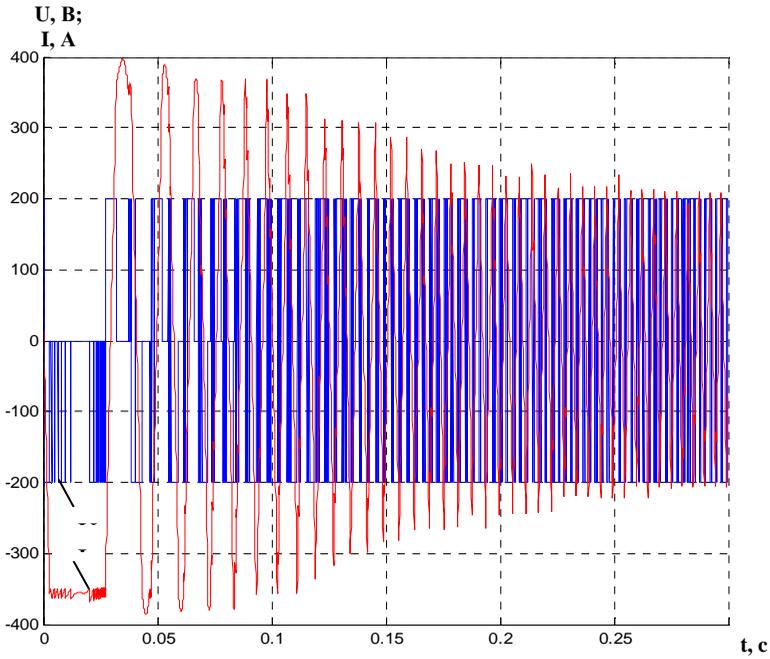


Рис.6 – Осциллограммы тока и напряжения фазы двигателя

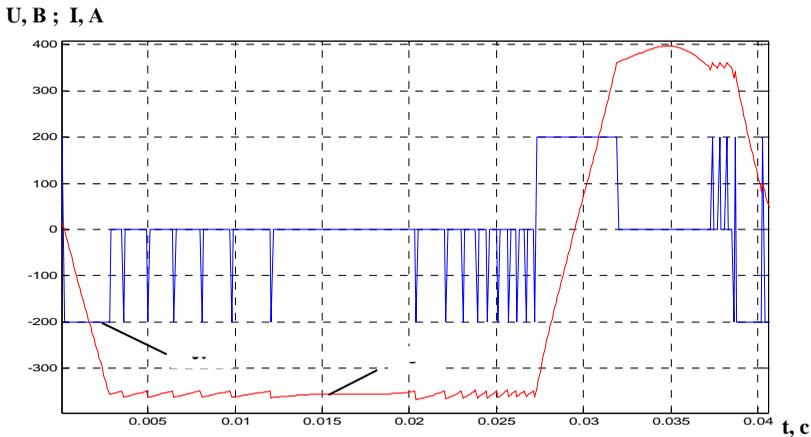


Рис.7 – Осциллограммы тока и напряжения фазы

По-другому происходят процессы при больших частотах вращения (рис.8).

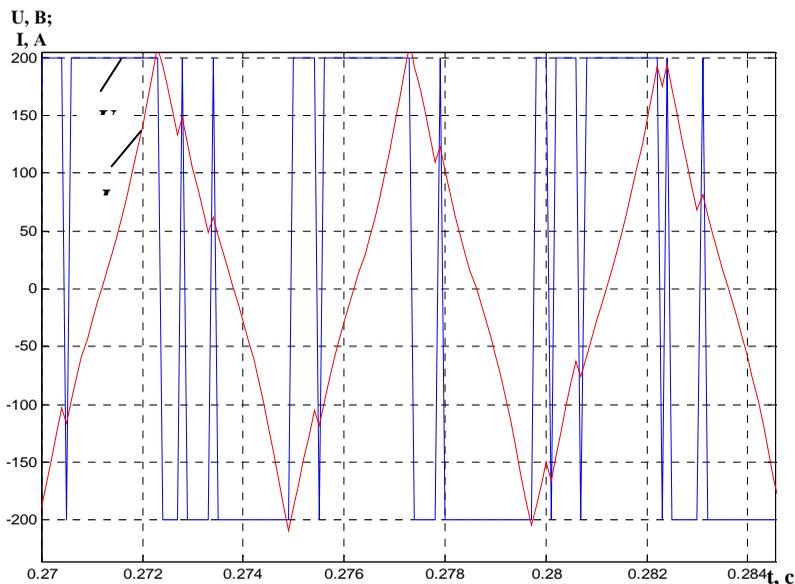


Рис.8 – Осциллограммы тока и напряжения фазы

На рис.8 видно, что за время поворота на одно полюсное деление статора ток не успевает нарасти до значения тока уставки. При этом кривая тока имеет вид, который не позволяет поддерживать момент на одном уровне на протяжении поворота на 180 эл.град. Вследствие этого происходит снижение суммарного электромагнитного момента двигателя.

На рис.9 приведена осциллограмма угловой скорости вращения, из которой видно, что в конце процесса скорость нарастания кривой уменьшается, что вызвано уменьшением момента на валу двигателя.

С помощью разработанной нами математической модели проведено цифровое моделирование режимов пуска тягового привода на основе двигателя с поперечным полем. Полученные расчетные осциллограммы токов, напряжений угловой скорости и электромагнитного момента имеют четкое физическое объяснение.

По результатам расчетов построена зависимость момента двигателя от тока уставки.

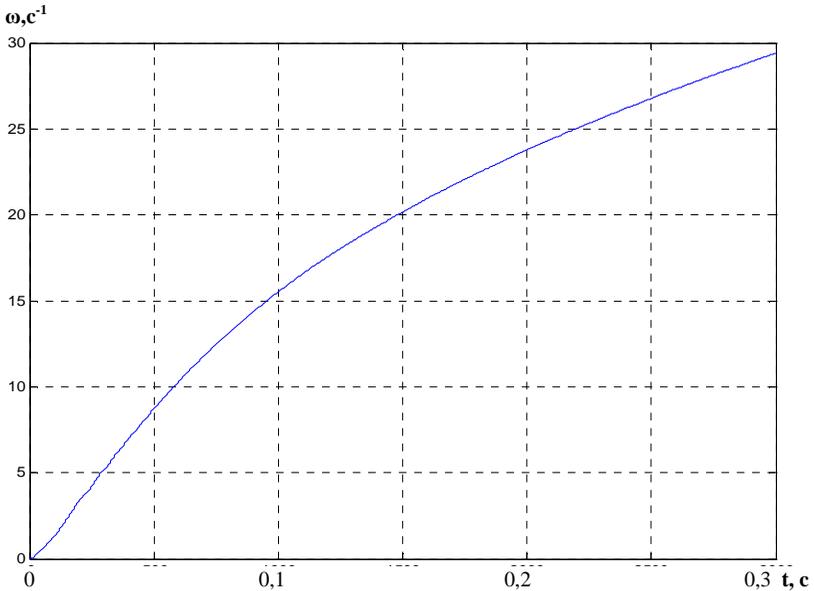


Рис.9 – Оциллограмма угловой скорости

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, 2003. – 214 p.

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

5.Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Глебова Т.В., Глебова М.Л. Математическая модель тягового привода на основе двигателя с поперечным полем. // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.81. – К.: Техніка, 2008. – С.283-288.

6.Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Глебова Т.В., Глебова М.Л. Упрощенная математическая модель магнитного поля двигателя с поперечным полем // Світлотехніка та енергетика. – 2008. – №2. – С.72-78.

Получено 09.09.2008