

Рассмотрена упрощенная модель магнитного поля двигателя с поперечным полем позволяющая идентифицировать параметры математической модели тягового привода на основе двигателей такого типа

УДК 621.313

Б.Г. Любарский, канд. техн. наук,
Е.С. Рябов, Т.В. Глебова
Национальный технический университет
«Харьковский Политехнический
Институт»

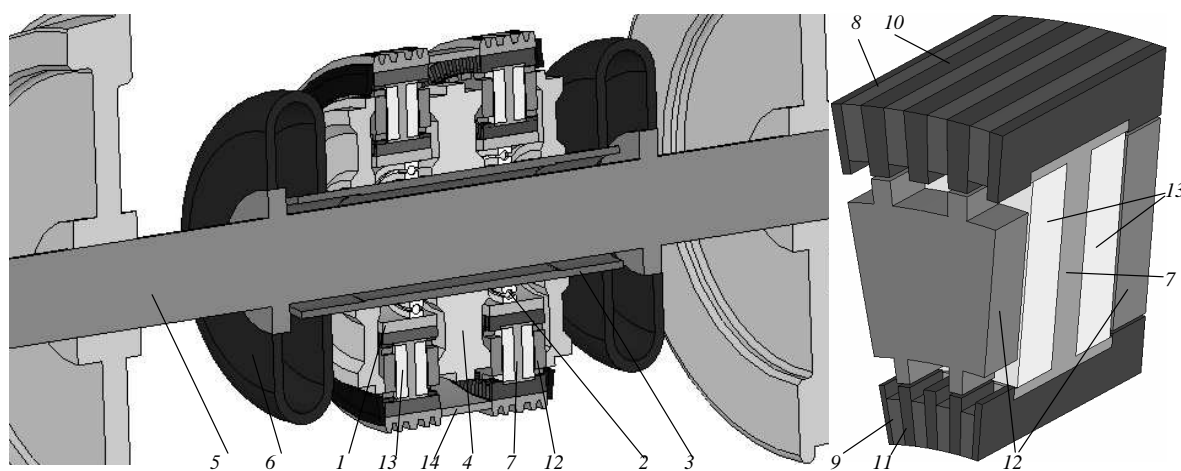
М.Л. Глебова, канд. техн. наук
Харьковская национальная академия
городского хозяйства

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДВИГАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ

На электроподвижном составе передовых в техническом отношении стран сейчас используются тяговые электроприводы на базе асинхронных двигателей [0-3]. Однако в последнее время 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. В работе [4] представлена математическая модель тягового привода. Для идентификации параметров этой модели необходимо определение зависимостей индуктивностей обмоток и электромагнитного момента.

В работе поставлена цель: создать упрощенную модель магнитного поля для идентификации параметров математической модели тягового привода на основе двигателя с поперечным полем

Для расчёта процессов электромеханического преобразования энергии в двигателе с поперечным полем, изображённом на рис. 1, предлагается схема замещения (на двойное полюсное деление статора), приведенная на рис. 2.



1 – внутренний корпус статора; 2 – подшипник; 3 – полый вал; 4 – диск ротора; 5 – ось колесной пары; 6 – муфта; 7 – сердечник статора; 8 – постоянный наружного кольца; 9 – постоянный магнит внутреннего кольца; 10 – пластина наружного кольца из ферромагнитного материала; 11 – пластина внутреннего кольца из ферромагнитного материала; 12 – ферромагнитный ротор; 13 – катушка обмотки статора; 14 – наружный корпус статора.

Рис.1. Тяговый привод блок и схема конструкции фазы двигателя с поперечным полем

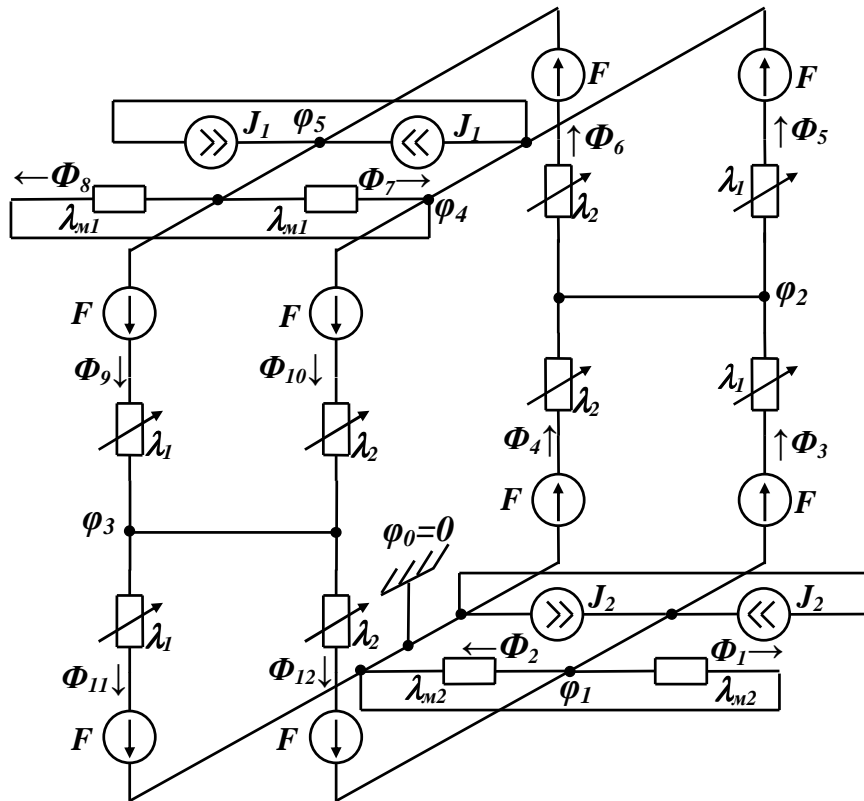


Рис. 2 Схема замещения магнитной цепи

На рис. 2 и далее приняты следующие обозначения: φ_i – магнитный потенциал i узла; Φ_i – поток i ветви; $F = \frac{I \cdot w}{4}$ – приведенная магнитодвижущая сила фазной катушки, где I – ток фазы, w – число витков фазы; λ_{m1} – проводимость постоянного магнита внешнего статора; λ_{m2} – проводимость постоянного магнита внутреннего статора; $J_1 = B_r \cdot S_{m1}$ – магнитный поток постоянного магнита внешнего статора, $J_2 = B_r \cdot S_{m2}$ – магнитный поток постоянного магнита внутреннего статора, где B_r – остаточная индукция постоянного магнита, S_{m1} , S_{m2} – площадь поперечного сечения магнита внешнего и внутреннего статора соответственно; λ_1 – проводимость воздушного зазора между зубцом статора, образующим северный полюс, и ротором; λ_2 – проводимость воздушного зазора между зубцом статора, образующим южный полюс, и ротором. В расчетах принято допущение, что магнитная проницаемость стальных участков равна бесконечности, $S_{m1}=S_{m2}=S_m$, поэтому $J_1=J_2=J$.

Проводимость постоянного магнита можно определить по формуле:

$$\lambda_m = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_m}{\delta_m}$$

где λ_m – проводимость постоянного магнита, Гн, $\mu_r = 1,014$ – относительная магнитная проницаемость материала магнита; S_m – площадь поперечного сечения постоянного магнита, м²; δ_m – толщина магнита, м.

Принято допущение, что $\delta_m = \delta_1 = \delta_2$, где δ_1 и δ_2 – толщина постоянного магнита внешнего и внутреннего статора.

Поток постоянного магнита можно определить по формуле

$$J = B_r \cdot S_m$$

Для определения проводимостей, эквивалентирующих воздушный зазор в схеме замещения (проводимости λ_1 и λ_2 на рис. 2.1), используем МКЭ. Расчёт выполнен с помощью программы FEMM для ряда положений ротора: от положения, в котором ось зубца статора совпадает с ось зубца ротора (смещение 0 эл.град) до положения, в котором ось зубца статора совпадает с осью паза ротора (смещение 180 эл.град). При этом ток в одновитковой катушке задавался равным 1А, а проводимость численно равна магнитному потоку, который определялся путём численного интегрирования. Расчётная модель показана на рис. 3. На рис. 4 показана конечно-элементная сетка в расчётной области. Размер стороны треугольника составляет около 1 мм, число слоев конечных элементов – более четырёх, что достаточно для адекватной аппроксимации кривой магнитной индукции в воздушном зазоре.

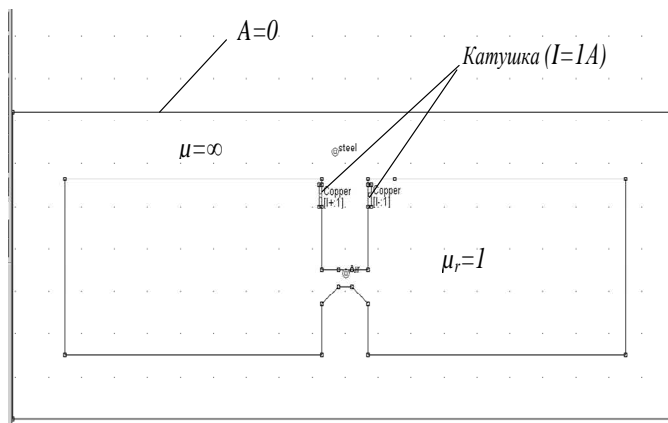


Рис. 3 Расчетная геометрия

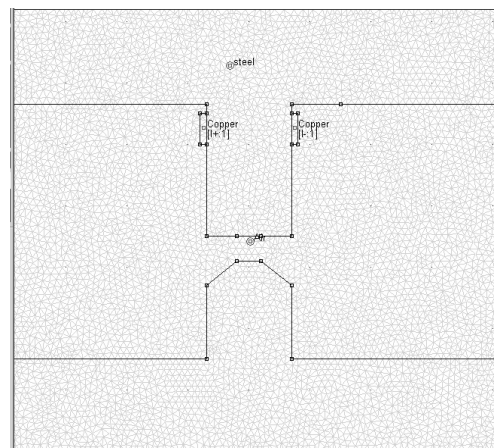


Рис.4 Конечно-элементная сетка

На рис. 5 показано распределение индукции магнитного поля при смещении 0 и 180 эл.град. Результаты расчёта при различных углах поворота приведены в табл. 1.

Для получения непрерывной функции $\lambda(\theta)$ табличная функция аппроксимирована полиномом 6 степени с использованием библиотеки CurveFittingToolbox системы Matlab:

$$\lambda(\theta) = 0,766 \cdot 10^{-20} \cdot \theta^6 - 3,688 \cdot 10^{-18} \cdot \theta^5 + 3,284 \cdot 10^{-16} \cdot \theta^4 + 0,869 \cdot 10^{-13} \cdot \theta^3 - 1,507 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^2 - 2,046 \cdot 10^{-11} \cdot \theta + 1,082 \cdot 10^{-7}$$

Для определения зависимости момента от угла поворота и тока фазы воспользуемся уравнением

$$M(\gamma, I) = \left. \frac{\partial W(\gamma, I)}{\partial \gamma} \right|_{i=const},$$

где $W(\gamma, I)$ – коэнергия магнитной системы, γ – угловая координата.

Коэнергию системы $W(\gamma, I)$ можно вычислить путём расчёта магнитной цепи для угла поворота γ от 0 до 360 эл. град. с шагом 1 эл. град. и тока фазы I от -500 до 500 А с шагом 10 А. В качестве расчётного метода выбран метод узловых потенциалов для магнитной цепи.

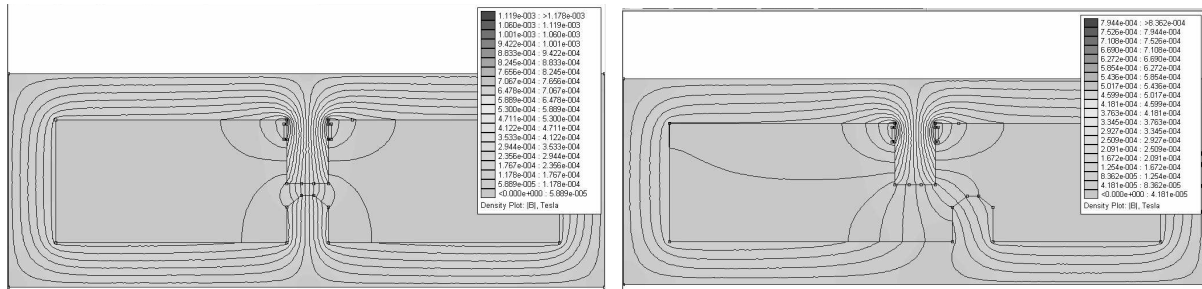


Рис. 5 Результаты расчета поля в воздушном зазоре

Таблица 1 – Результаты расчётов проводимости воздушного зазора

Смещение ротора относительно статора θ , эл.град	Проводимость воздушного зазора $\lambda \times 10^{-6}$, Гн
0	0,1082
20	0,1025
40	0,0893
60	0,0732
80	0,0580
100	0,0460
120	0,0382
140	0,0341
160	0,0324
180	0,0318

Значения магнитных потенциалов узлов находятся из решения матричного уравнения

$$|\lambda| \cdot |\phi| = |I_0| \tag{1}$$

где $|\lambda|$ – матрица проводимостей; $|I_0|$ – вектор-столбец узловых токов; $|\phi|$ – искомый вектор-столбец узловых магнитных потенциалов.

Матрица проводимостей $|\lambda|$ с учётом вышеупомянутых допущений имеет вид

$$|\lambda| = \begin{vmatrix} 2 \cdot \lambda_m + \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & 0 & 0 \\ -\lambda_1 & 2 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) & 0 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\lambda_2 & 0 & 2 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_2 & -\lambda_1 \\ 0 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & 2 \cdot \lambda_m + \lambda_1 + \lambda_2 & -2 \cdot \lambda_m \\ 0 & -\lambda_2 & -\lambda_1 & -2 \cdot \lambda_m & 2 \cdot \lambda_m + \lambda_1 + \lambda_2 \end{vmatrix}$$

Вектор-столбец узловых токов $|I_0|$ имеет вид

$$|I_0| = \begin{vmatrix} 2 \cdot J + E \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \\ 0 \\ 0 \\ -2 \cdot J + E \cdot (\lambda_1 - \lambda_2) \\ 2 \cdot J + E \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) \end{vmatrix}$$

После нахождения вектора $|\varphi|$ путем пешения матричного уравнения (1) производится вычисление потоков в ветвях магнитной цепи (индекс обозначает номер ветви) по выражениям:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \lambda_m \cdot \varphi_1 & \Phi_2 &= \lambda_m \cdot \varphi_2 & \Phi_3 &= \lambda_1 \cdot (E + \varphi_1 - \varphi_2) \\ \Phi_4 &= \lambda_2 \cdot (E - \varphi_2) & \Phi_5 &= \lambda_1 \cdot (\varphi_2 - \varphi_4 + E) & \Phi_6 &= \lambda_2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_5 + E) \\ \Phi_7 &= \lambda_m \cdot (\varphi_5 - \varphi_4) & \Phi_8 &= \lambda_m \cdot (\varphi_5 - \varphi_4) & \Phi_9 &= \lambda_1 \cdot (E + \varphi_5 - \varphi_3) \\ \Phi_{10} &= \lambda_2 \cdot (E + \varphi_4 - \varphi_3) & \Phi_{11} &= \lambda_1 \cdot (\varphi_3 + E) & \Phi_{12} &= \lambda_2 \cdot (\varphi_3 - \varphi_1 + E) \end{aligned}$$

Коэнергию системы определяем по выражению

$$W = 0,5 \cdot \sum_i \frac{\Phi_i^2}{\lambda_i}, \text{ где } i = \overline{1,12}$$

Момент определяем путём численного дифференцирования зависимости $W(\gamma, I)$ по переменной γ . На рис. 6 приведена зависимость $W(\gamma, I)$, а зависимость $M(\gamma, I)$ показана на рис. 7.

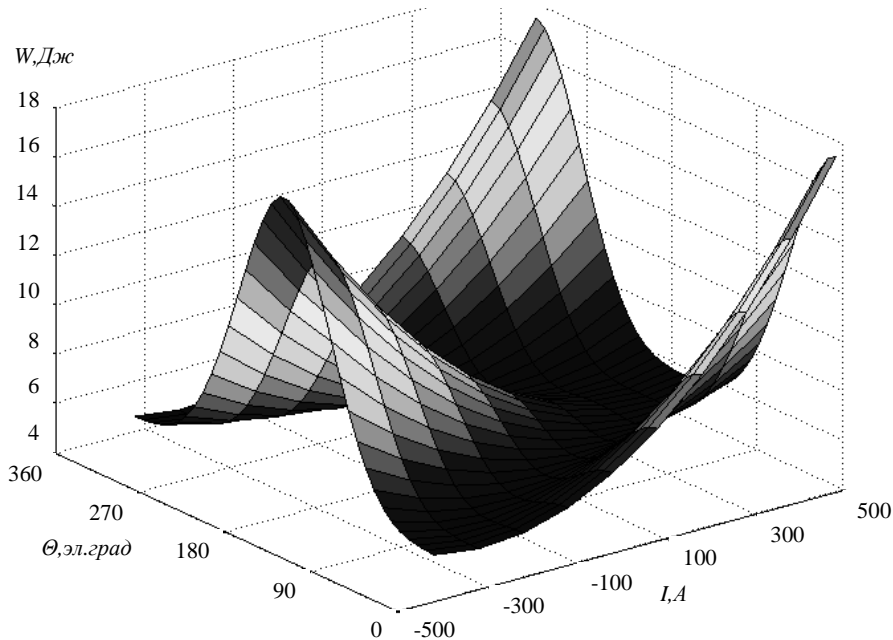


Рис. 6 Зависимость $W(\gamma, I)$

Анализ поверхности рис. 6 показывает, что наибольшие значения энергии при некотором заданном токе I достигаются в точках $\theta=0$ и $\theta=360$ эл.град при токе $I>0$ и $\theta=180$ при токе $I<0$. Это обусловлено следующим: ротор занимает положение, при котором зубцы ротора располагаются против зубцов статора, а поток от тока катушки скла-

дывается с потоком постоянных магнитов. Наименьшие значения энергии при некотором заданном токе I достигаются в точках $\theta=0$ и $\theta=360$ эл.град при токе $I<0$ А и $\theta=180$ при токе $I>0$. При этом против зубца статора располагаются зубцы ротора, но ток имеет такое направление, что вызванный им поток вычитается из потока от постоянных магнитов. Это соответствует физической картине процессов, происходящих в двигателе.

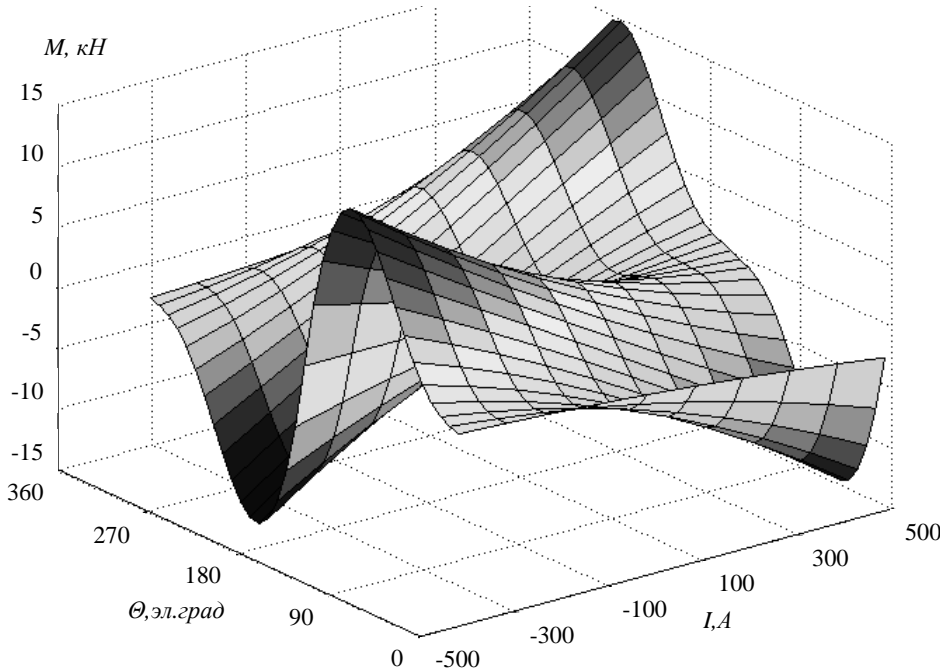


Рис. 7 Зависимость $M(\theta, I)$

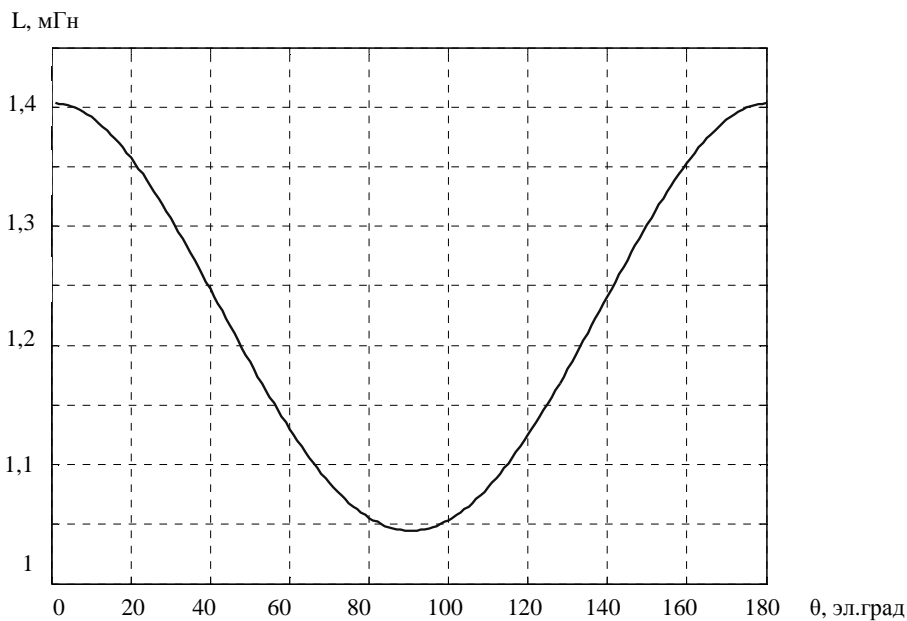


Рис. 8 Зависимость $L = f(\theta)$

Из анализа зависимости рис. 7 видно, что в точках $\theta=0, 180, 360$ эл.град. независимо от величины и направления тока момент равен нулю. Это обусловлено тем, что в этих точках равна нулю производная $\frac{\partial W(\gamma, I)}{\partial \gamma}$.

Ввиду принятого допущения о линейности системы, индуктивности фазы зависят только от угловой координаты ротора.

Формула для определения индуктивности имеет вид

$$L = w^2 \cdot \frac{2 \cdot W}{I^2}$$

где w – число витков фазной катушки, W – коэнергия системы (для линейной системы энергия и коэнергия равны), I – ток фазной катушки.

График зависимости $L = f(\theta)$ приведен на рис. 8

Выводы.

1. Предложенная модель магнитного поля тягового двигателя с поперечным полем позволяет провести идентификацию параметров математической модели тягового привода на его основе – определить зависимости электромагнитного и индуктивности обмотки.

2. При токе $I=0$ кривая момента симметрична относительно оси абсцисс и начала координат. При токе $I \neq 0$ происходит деформация кривой момента, вследствие чего при $\theta=90$ эл.град момент становится отличным от нуля. Под действием этого момента происходит вращение ротора двигателя.

3. Как видно из рис. 8, зависимость $L = f(\theta)$ имеет периодический характер. Период повторяемости составляет 180 эл.град. Максимальное значение индуктивности составляет 1,4 мГн и достигается при положении ротора, в котором ось зубца ротора совпадает с осью зубца статора. Минимальное значение индуктивности равно 1,04 мГн и достигается в положении ротора, когда против зубца статора находится паз ротора.

Литература

1. Тяговый двигатель с возбуждением постоянными магнитами. // Железные дороги мира –2004.- №9 (Т. Klockow et al. Elektrische Bahnen, 2003, № 3, S. 107 – 112.)
2. Омеляненко В.И., Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Демидов А.В., Глебова Т.В. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава // Локомотив-информ. – 2008. – №1.– С. 16–19.
3. 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.
4. Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Глебова Т.В., Глебова М.Л. Математическая модель тягового привода на основе двигателя с поперечным полем. // Комунальное хозяйство городов. – 2008. – № – С.-.

СПРОЩЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДВИГУНА З ПОПЕРЕЧНИМ ПОЛЕМ

Б.Г. Любарський, Є.С. Рябов, Т.В. Глебова, М.Л. Глебова

Розглянута спрощена модель магнітного поля двигуна з поперечним полем дозволяюча ідентифікувати параметри математичної моделі тягового приводу на основі двигунів такого типу.

SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL OF MAGNETIC FIELD ENGINE WITH TFM

B.G. Lyubarskiy, E.S. Ryabov, T.V. Glebova, M.L. Glebova

The simplified model is considered of magnetic field of engine with the transversal field allowing to identify the parameters of mathematical model of hauling drive on the basis of TFM.