

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ '09

Сборник докладов

6 – 10 апреля 2009 г.

Санкт-Петербург
2009

УДК 629.735.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО МОМЕНТА В ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

В. В. Хрущев

д-р техн. наук, профессор

профессор кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике

И. А. Салова

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

доцент кафедры управления и информатики в технических системах

О. К. Епифанов

канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматриваемые индукторные электродвигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения и с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов имеют двухстороннюю зубчатость в воздушном зазоре, поскольку конструкции их статора и ротора являются явнополусными [1 – 3]. При отсутствии тока в обмотках управления в указанных электродвигателях имеет место остаточный момент, изменяющийся по величине в функции угла поворота ротора относительно статора.

Целью настоящей работы является исследование возникновения остаточного момента и определение зависимости изменения его величины от геометрических параметров зубцовой зоны электродвигателя.

Аксиальная магнитная эквивалентная модель рассматриваемого электродвигателя приведена на рис. 1, а схема замещения его магнитной цепи – на рис. 2 [4]. Поскольку указанные электродвигатели являются униполярными, то зубчатые магнитопроводы ротора смещены друг относительно друга на 180 электрических градусов.

На рис. 1 и 2 приняты следующие обозначения: L – длина статора; l_p – длина магнитопровода ротора; t_m – толщина постоянного магнита в направлении намагничивания; δ – величина воздушного зазора; Φ_m , Φ_j , Φ_k – магнитные потоки [4]; $F'_m = \frac{F_m}{k_\sigma}$ – эквивалентная МДС постоянного магнита и его эквивалентное сопротивление $R'_m = \frac{R_m}{k_\sigma}$, где k_σ – коэффициент рассеяния магнитного потока магнита $k_\sigma = 1 + \frac{R_m}{R_\delta}$, R_δ – сопротивление воздушного зазора;

через λ'_k и λ''_k обозначены проводимости воздушного зазора под тремя полюсами для левой и правой половины ротора.; R_j – магнитное сопротивление ярма статора; R_k – магнитное сопротивление полюса статора поперек шихтовки.

Известно, что возникновение остаточного момента в явнополусных электродвигателях с возбуждением от постоянных магнитов связано с переменной составляющей магнитной проводимости воздушного зазора [5, 6].

Функция магнитной проводимости воздушного зазора от угла поворота ротора α при ее разложении в ряд Фурье описывается рядом гармонических составляющих [1, 7, 8], поэтому ограничимся ее рассмотрением для наиболее значимых трех первых гармоник.

Представим функцию магнитной проводимости следующим образом:

– для левой половины электродвигателя (рис. 1):

$$\lambda'_k = \lambda_0 + \lambda_1 \cos \left[z_2 \alpha - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \lambda_2 \cos \left[2z_2 \alpha - (k-1) \frac{4\pi}{3} \right] + \lambda_3 \cos 3z_2 \alpha;$$

– для правой половины электродвигателя (рис.1):

$$\lambda''_k = \lambda_0 - \lambda_1 \cos \left[z_2 \alpha - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] - \lambda_2 \cos \left[2z_2 \alpha - (k-1) \frac{4\pi}{3} \right] - \lambda_3 \cos 3z_2 \alpha;$$

где z_2 – число зубцов на роторе; $k=0,1,2$; $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – постоянная составляющая, первая, вторая, третья гармоники магнитной проводимости воздушного зазора соответственно.

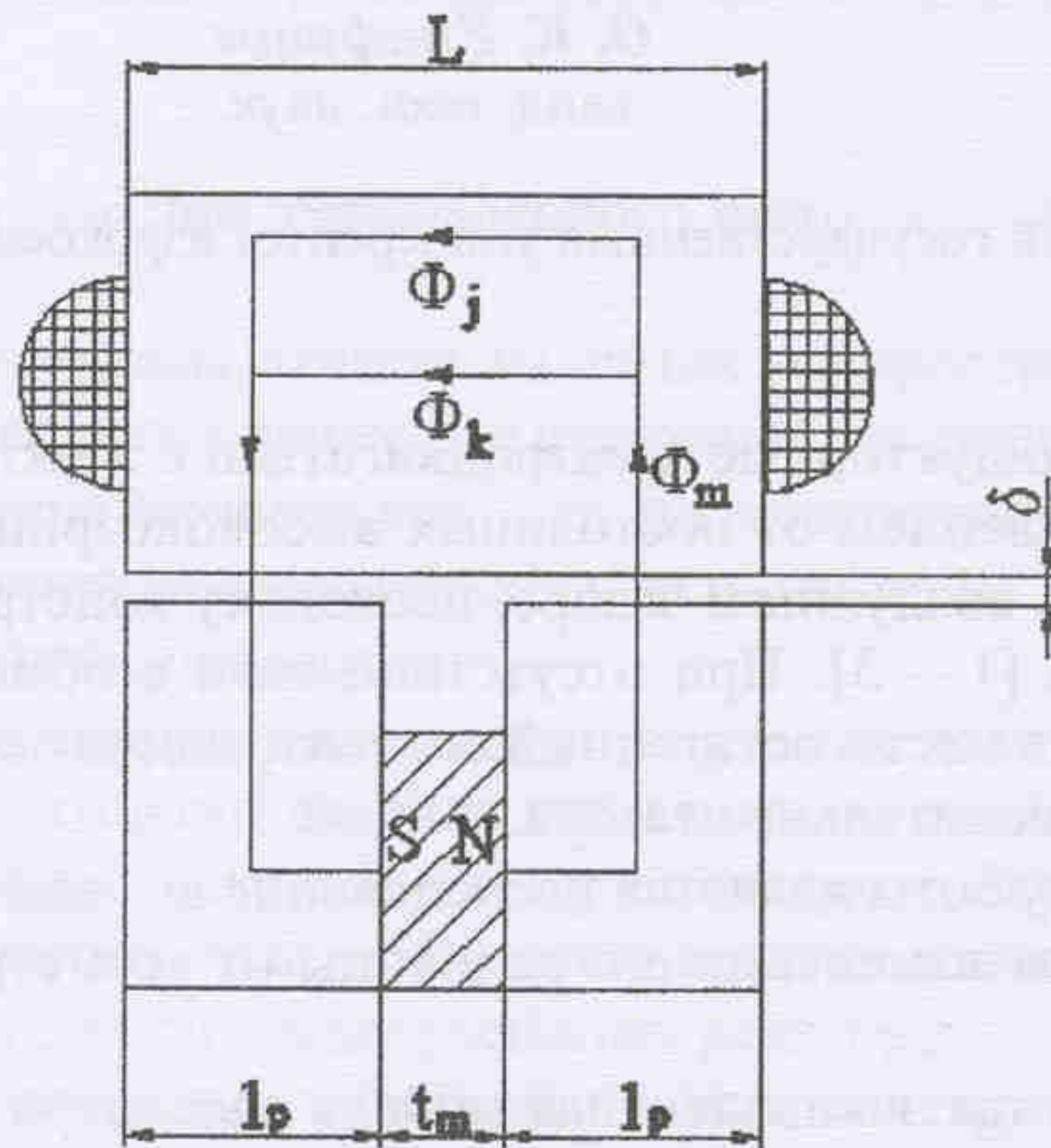


Рис. 1. Аксиальная эквивалентная модель

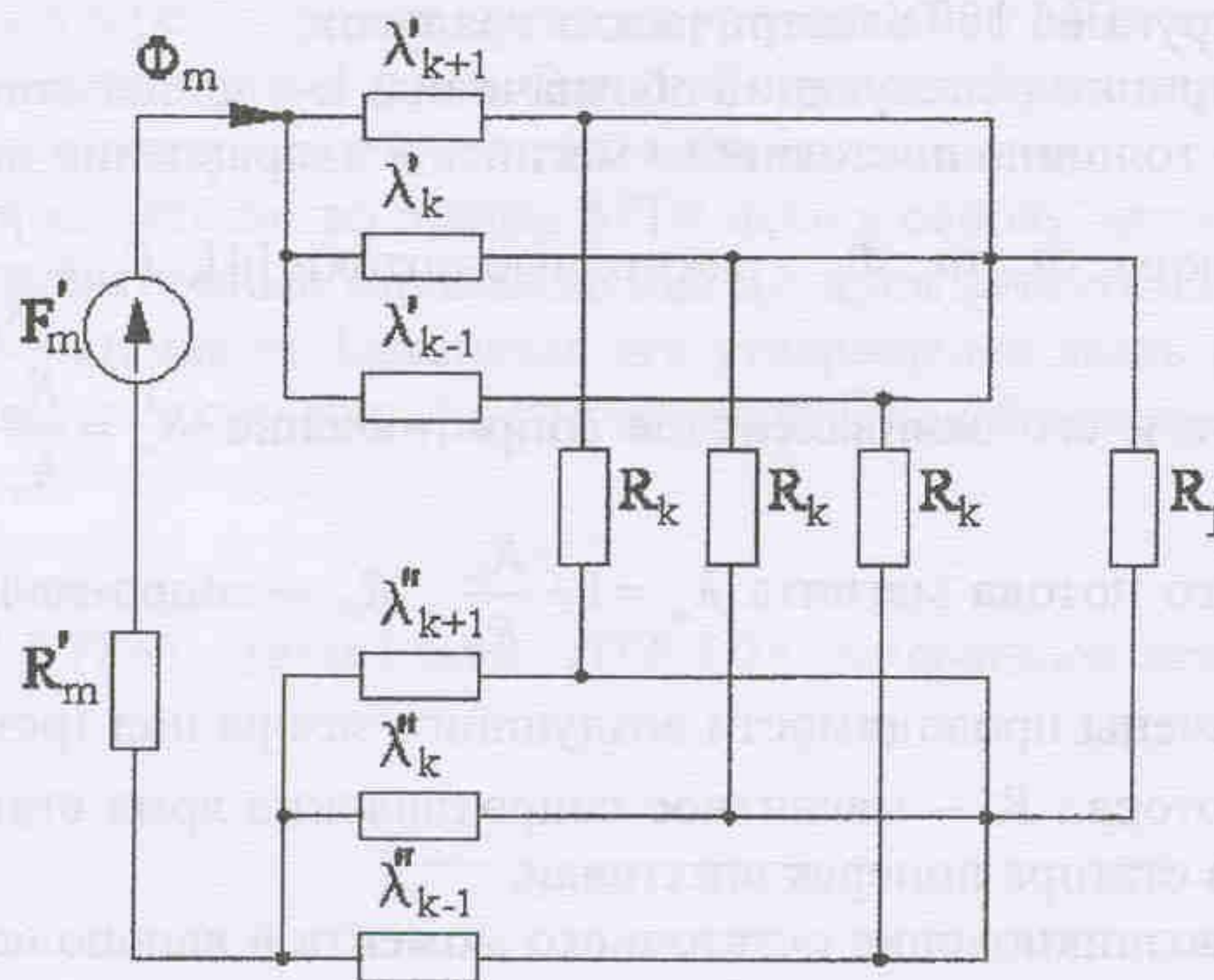


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи

Просуммировав магнитные проводимости воздушного зазора под тремя полюсами для левой и правой половины ротора, получим схему замещения магнитной цепи рассматриваемого электродвигателя, представленную на рис. 3.

Заметим, что $\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda'_k = p\lambda_0 (1 + \vartheta_3 \cos 3z_2 \alpha)$, а $\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda''_k = p\lambda_0 (1 - \vartheta_3 \cos 3z_2 \alpha)$, где $\vartheta_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_0}$.

Тогда выражение для эквивалентного сопротивления магнитной цепи имеет вид:

$$R_y = R_0 + \frac{1}{p\lambda_0} \left(\frac{1}{1 + \mathcal{G}_3 \cos 3z_2 \alpha} + \frac{1}{1 - \mathcal{G}_3 \cos 3z_2 \alpha} \right) = R_0 + \frac{2}{p\lambda_0 (1 - \mathcal{G}_3^2 \cos^2 3z_2 \alpha)};$$

где $R_0 = \frac{R_j \cdot \frac{R_k}{p}}{R_j + \frac{R_k}{p}} = \frac{R_j}{1 + \frac{R_j \cdot p}{R_k}}$.

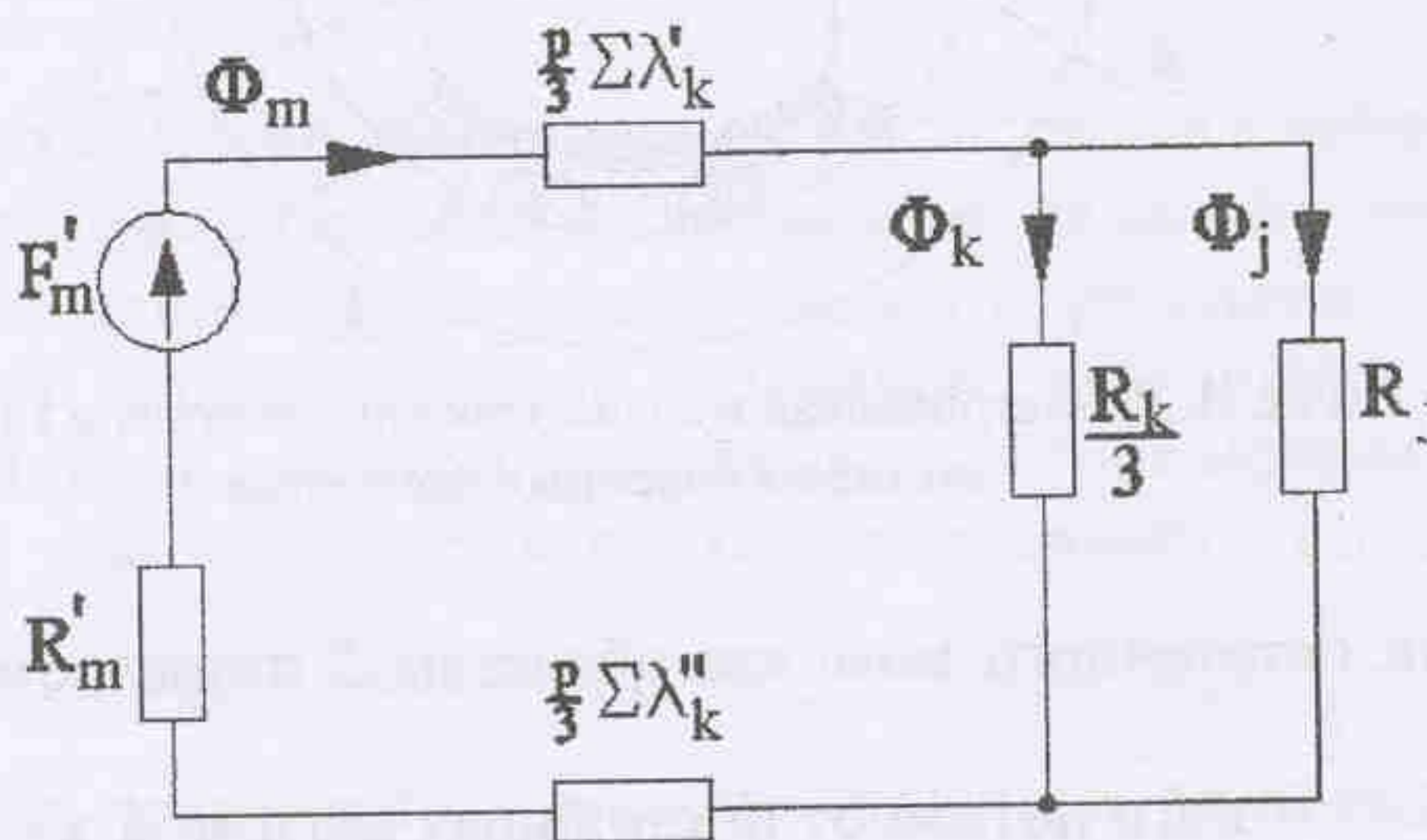


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи

Магнитный поток постоянного магнита определяется выражением $\hat{O}_m = \frac{F'_m}{R'_m + R_y}$.

Следовательно энергия магнитного поля в магнитной цепи составит:

$$W_m = \frac{1}{2} \hat{O}_m^2 R_y = \frac{1}{2} F_m'^2 \frac{R_y}{(R'_m + R_y)^2}.$$

Остаточный момент электродвигателя определим как производную магнитной энергии от угла поворота ротора α при постоянном значении МДС магнита, т.е. $M_{in\dot{o}} = \left. \frac{dW_m}{d\alpha} \right|_{F_m = const}$.

Выразим остаточный момент через параметры эквивалентной схемы (рис. 3):

$$M_{in\dot{o}} = \frac{dW_m}{dR_y} \cdot \frac{dR_y}{d\alpha} = \frac{1}{2} F_m'^2 \frac{R'_m - R_y}{(R'_m + R_y)^3} \cdot \frac{dR_y}{d\alpha}; \text{ при } \frac{dR_y}{d\alpha} = \frac{-6 \cdot \mathcal{G}_3^2 \cdot z_2 \cdot \sin 6z_2 \alpha}{p\lambda_0 (1 - \mathcal{G}_3^2 \cos^2 3z_2 \alpha)^2}.$$

Поскольку $\mathcal{G}_3 \ll 1$, выражение для остаточного момента примет вид:

$$M_{in\dot{o}} = -3 \cdot F_m'^2 \frac{R'_m - R_y}{(R'_m + R_y)^3} \cdot \frac{\mathcal{G}_3^2 \cdot z_2 \sin 6z_2 \alpha}{p \cdot \lambda_0}.$$

Следовательно, остаточный момент изменяется в функции угла поворота ротора и имеет шестикратную периодичность на его полюсном делении.

Для подтверждения полученного результата исследуем остаточный момент с помощью метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ELCUT [9]. Поскольку ELCUT поддерживает только 2D-модели, а магнитные потоки рассматриваемого типа электродвигателя замыкаются в трех измерениях, была построена эквивалентная 2D геометрическая модель электродвигателя, представленная на рис. 4. Так как электромагнитные процессы повторяются через каждые 3 полюса, модель ограничена 3 полюсами. В третьем измерении глубина модели составляет 1м.

На рис. 4 приняты следующие обозначения: 1 – магнитопровод статора; 2 – воздух; 3, 4 – левый и правый магнитопроводы ротора; 5 – проводник электрического тока (медь); 6 – постоянный магнит; 7 – область для замыкания магнитных потоков с $\mu_\infty = 10000$.

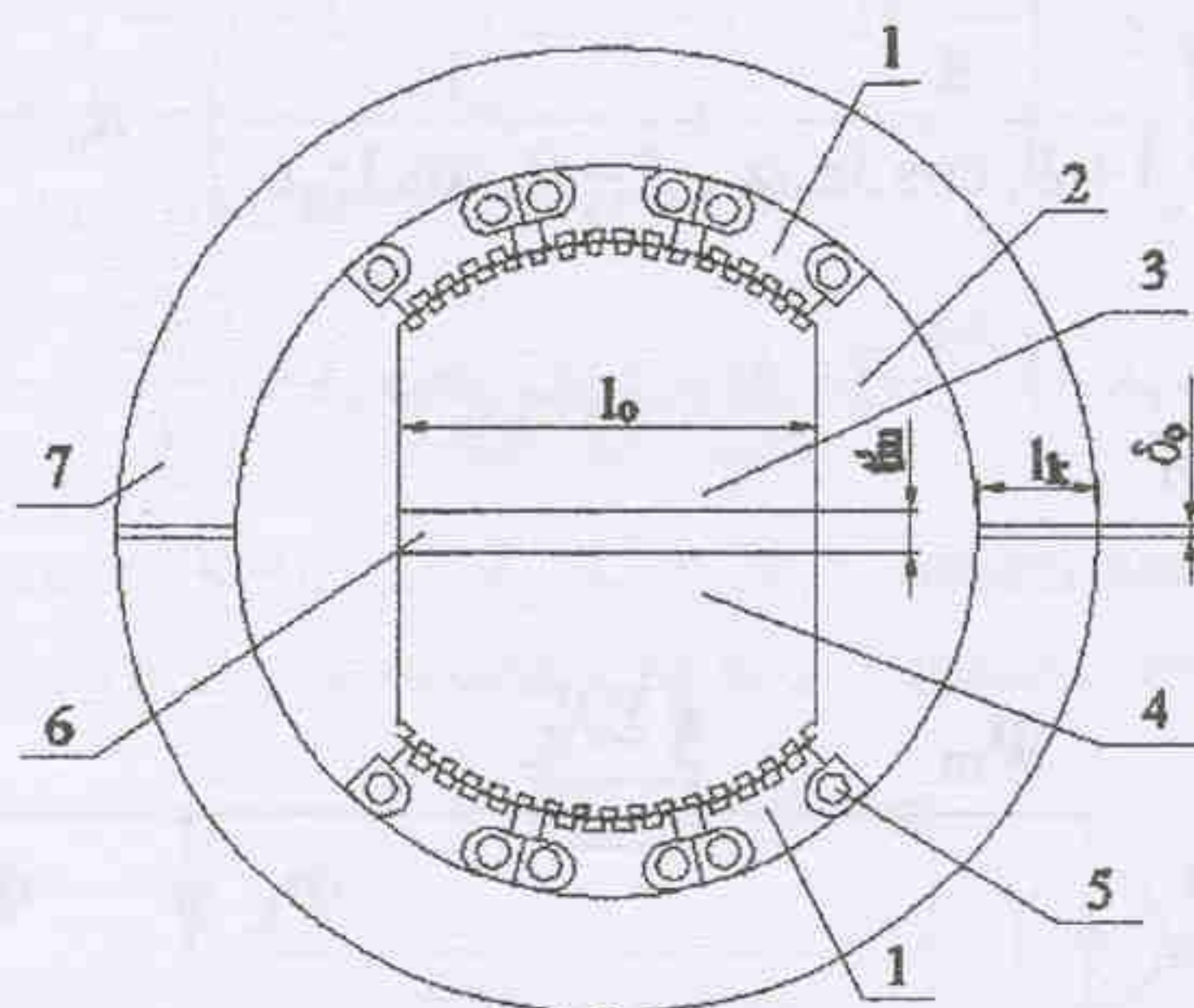


Рис. 4. Геометрическая модель электродвигателя в ELCUT методом конечных элементов

При исследовании остаточного момента областям 5 назначается магнитная проницаемость воздуха.

Выражение для магнитного потока от постоянных магнитов электродвигателя, с учетом эквивалентной схемы замещения магнитной цепи, представленной на рис. 3, имеет вид:

$$\hat{O}_m = \frac{t_m H_c}{R_m + k_\sigma \left(R_0 + \frac{1}{\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda_k'} + \frac{1}{\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda_k''} \right)} = \frac{\frac{t_m}{k_\sigma} \cdot H_c}{\frac{t_m H_c}{k_\sigma S_m Br} + R_0 + \frac{1}{\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda_k'} + \frac{1}{\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda_k''}};$$

где H_c – коэрцитивная сила магнита; Br – остаточная индукция магнита, Тл; S_m – площадь магнитного слоя, m^2 ; $p/3$ – общее число параллельных ветвей; p – число полюсов на статоре.

Выражение для магнитного потока \hat{O}_m^i в модели на единицу длины ротора получим, разделив выражение для \hat{O}_m на $\frac{p}{3} l_p$.

$$\text{Тогда } \hat{O}_m^i = \frac{\hat{O}_m}{\frac{p}{3} l_p} = \frac{\frac{t_m}{k_\sigma} \cdot H_c}{\frac{t_m \cdot H_c \cdot p \cdot l_\delta}{3 \cdot k_\sigma \cdot S_m \cdot Br} + \frac{R_0 \cdot p \cdot l_\delta}{3} + \frac{l_\delta}{\sum_{k=0}^2 \lambda_k'} + \frac{l_\delta}{\sum_{k=0}^2 \lambda_k''}}.$$

Из этого выражения следует, что в модели толщина магнита в направлении намагничивания t_m должна быть в k_σ раз меньше. Величина k_σ вычисляется аналитически [2]. Далее заменим выражение $\frac{p}{3 \cdot S_m \cdot Br}$ на $\frac{1}{l_o \cdot Br'}$, где Br' – модельное значение остаточной индук-

ции постоянного магнита. Приравняв эти выражения, получим $Br' = \frac{3 \cdot S_m \cdot Br}{p \cdot l_\delta \cdot l_o}$, которое и

будем использовать при задании свойств магнита в ELCUT. Магнитное сопротивление $\frac{R_0 \cdot p \cdot l_\delta}{3}$ учтем в модели двумя воздушными зазорами δ_0 .

электродвигателях имеет место изменение остаточного момента с двойной периодичностью относительно изменения указанной магнитной проводимости. При этом амплитуда остаточного момента зависит от соотношения геометрических параметров зубцовой зоны электродвигателя, его воздушного зазора и толщины постоянного магнита в направлении намагничивания.

Библиографический список

1. Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В. Трехфазные бесконтактные моментные индукторные двигатели подмагничиванием постоянным магнитным полем. // Электротехника. – 2005. – №1 – С. 21-32.
2. Епифанов О.К., Оськин А.Б., Салова И.А., Хрущев В.В. Разработка малогабаритных бесконтактных моментных двигателей модульного типа для современных цифровых безредукторных следящих систем навигационных приборов. // Гироскопия и навигация. – 2001. – №1(32). – С.50-62.
3. Епифанов О.К. Современный ряд высокомоментных двигателей для безредукторных следящих систем: результаты разработки и производства. // Электротехника. – 2005. – №2. – С.36-48.
4. Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В., Филиппов М.М. Потери магнитного потока возбуждения в униполярных двигателях с поперечным намагничиванием. // Электротехника. – 2007. – № 2 – С.28-36.
5. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990.
6. Микроэлектродвигатели для систем автоматики: технический справочник /Под ред. Э.А.Лодочникова и Ф.М.Юферова. – М.: Энергия, 1969. -272 с.
7. Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В. Анализ и расчет магнитной проводимости воздушного зазора в бесконтактных моментных двигателях модульного типа с электромагнитной редукцией частоты вращения. // Электрофорум. - 2003. - №6. - С.8-14.
8. Хрущев В.В. Трехфазные индукторные электрические машины с электромагнитной редукцией частоты вращения: Учебн. пособие. – СПб. ГУАП, 2005.
9. 9. ELCUT v.5.2. Комплекс программ для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Руководство пользователя СПб.: Производственный кооператив ТОР.

УДК 681.5.013

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ИМПУЛЬСНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

С. А. Цветков

ассистент кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике

Д. В. Шишлаков

аспирант кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике

В. Ф. Шишлаков

д-р техн. наук, профессор

профессор кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Для решения поставленной задачи применялись разработанные авторами алгоритмы параметрического синтеза (на основе обобщенного метода Галеркина) и математические модели импульсных модуляторов, учитывающие конечную длительность замыкания импульсного элемента, и форму импульса на выходе импульсного элемента [1, 2]. Рассматриваемая электроэнергетическая установка представляет собой сложную многосвязную систему автоматического управления.

Структурная схема рассматриваемой системы автоматического управления показана на рис.1. В качестве импульсных элементов рассматриваются разработанные модели АИМ.