

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ГИБРИДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Е.Е. Суворкова, Ю.Н. Дементьев, Л.К. Бурулько, Д.А. Кафтасьев
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск.

Введение

Совершенствование функциональных возможностей современных и конкурентоспособных электродвигателей невозможно без изменения их конструктивного исполнения. Это подтверждается тем, что в последнее время появляется большое количество различного вида, так называемых электрических двигателей нетрадиционных конструкций [1]. К числу таких двигателей можно отнести синхронный гибридный двигатель (СГД). Особенностью (СГД) является сочетание в единой конструкции положительных свойств синхронной реактивной машины (СРМ) и синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ) [2, 7].

Конструкция статора СГД разработана на основе серийных асинхронных двигателей. Ротор СГД в аксиальном направлении состоит из двух частей, а именно: синхронная реактивная часть составляет 70% общей длины, а магнитоэлектрическая часть 30%, энергия постоянных магнитов которой используется для повышения энергетических и эксплуатационных характеристик. При таком конструктивном исполнении ротора СГД основной магнитный поток формируется со стороны статора, как для синхронной реактивной части ротора, так и для магнитоэлектрической части (МЭЧ). При этом в МЭЧ за счет встроенных магнитов он усиливается и появляется возможность для формирования пускового момента [8].

Появление механического взаимодействия магнитного поля в рассматриваемом конструктивном исполнении СГД связано:

- с магнитной несимметрией ротора, характерной для обеих частей;
- с влиянием на магнитное поле двигателя смещенного в пространстве магнитного потока встроенных магнитов, расположенных на роторе.

Целью данной статьи является выявление связи интегральных характеристик и параметров СГД с его магнитным полем. В результате, используя расчеты магнитного поля, получены базовые выражения для вычисления основных параметров СГД и его интегральной характеристики.

Общая задача расчета магнитного поля

Электромагнитные процессы преобразования энергии в электрических машинах (ЭМ), вне зависимости от их конструктивного исполнения, осуществляются через магнитное поле. Поэтому непосредственное использование результатов расчета магнитного поля ЭМ является наиболее перспективным при ее проектировании.

В настоящее время проектирование любой ЭМ осуществляется с помощью компьютерной вычислительной техники, а определение параметров и процессов в ней применением численных методов расчета электромагнитных полей.

В численных методах расчета магнитных полей эффективно используются методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). Метод конечных элементов, как метод моделирования, достаточно хорошо известен, поэтому для него разработаны соответствующие прикладные программные пакеты, в частности ELCUT [3].

Для расчета магнитных полей в синхронном гибридном двигателе авторами предложены двухмерные модели в прямоугольной системе координат. Для этого отдельно рассмотрены поперечные сечения в синхронной реактивной и магнитоэлектрической частях ЭМ.

В общем случае стационарное магнитное поле в поперечном сечении ЭМ описывается дифференциальным уравнением [4]

$$\operatorname{rot}[(\nu \cdot \operatorname{rot}(\vec{k} \cdot A_z))] = \vec{k} \cdot J_z, \quad (1)$$

где A_z , J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; ν – удельное магнитное сопротивление (УМС); \vec{k} – орт.

В прямоугольной системе координат при отсутствии вихревых токов в синхронной реактивной части СГД уравнение (1) можно записать следующим образом [5]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\delta_z, \quad (2)$$

Мгновенная реальная картина плоскопараллельного магнитного поля МЭЧ описывается уравнением вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -\delta_z + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

где μ_x, μ_y – составляющие магнитной проницаемости по осям x, y ; H_{cy}, H_{cx} – составляющие коэрцитивной силы встроенного магнита H_c .

При расчете магнитных полей в СГД методом конечных элементов был использован прикладной программный пакет ELCUT. Области расчета магнитных полей как в СРЧ, так и в МЭЧ охватывали полностью поперечные сечения этих частей СГД. Полученные в результате расчета картины распределения силовых линий магнитных полей представлены на рис 1.

На рис. 1 *а*, 1 *б* соответственно представлено распределение силовых линий магнитного поля в синхронной реактивной части двигателя и в магнитоэлектрической части двигателя с радиальным расположением встроенных магнитов.

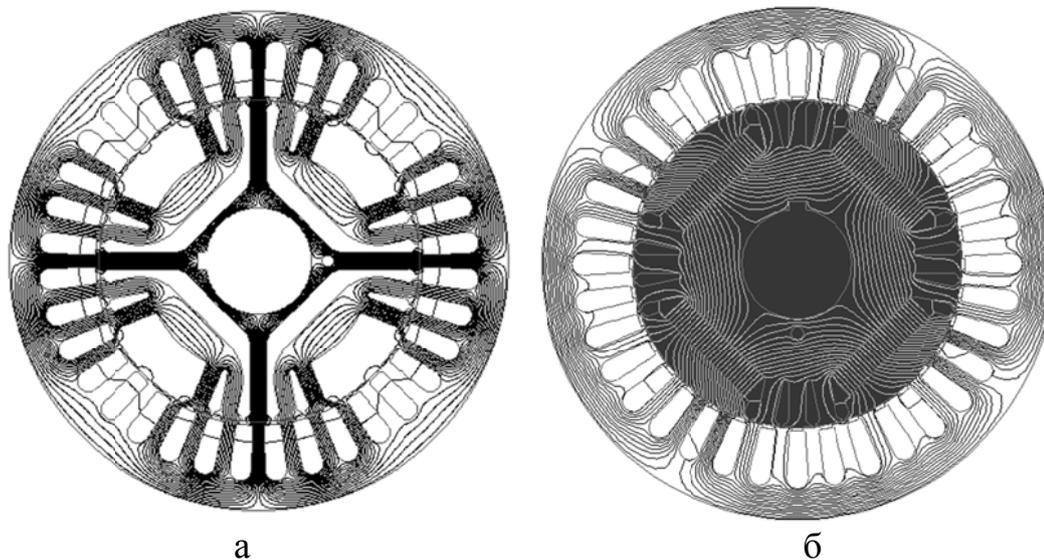


Рис. 1. Распределение силовых линий магнитного поля в четырехполюсном синхронном гибридном двигателе

Общий подход к расчету электромагнитных параметров СГД по результатам расчета магнитных полей

Одной из базовых величин, по которой принято анализировать магнитное поле, является магнитная индукция, вычисляемая по распределению векторного магнитного потенциала (ВМП) на основе общего выражения [5]

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}). \quad (4)$$

В общем случае магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром l , определяется по выражению

$$\Phi = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}. \quad (5)$$

При двухмерной структуре поля магнитный поток можно определить по выражению

$$\Phi = (A_{z1} - A_{z2}) \cdot l_a, \quad (6)$$

где A_{z1} и A_{z2} – значения ВМП в точках 1 и 2 плоскости расчета, через которые проходят боковые стороны контура, l_a – активная длина рассчитываемой части СГД.

Учитывая конструктивные особенности ротора СГД и наличие в МЭЧ встроенного магнита, ось полюсов которого сдвинута на угол λ относительно полюсов СРЧ, полный магнитный поток вдоль расточки статор имеет две составляющие [6, 7]

$$\Phi = \Phi_{\text{ср}} + \Phi_{\text{мэ}}, \quad (7)$$

где $\Phi_{\text{ср}}$ – составляющая магнитного потока в синхронной реактивной части двигателя, $\Phi_{\text{мэ}}$ – составляющая магнитного потока в магнитоэлектрической части.

При равномерно распределенной плотности тока, принимаемой при расчетах магнитных полей в электрических машинах, потокосцепления в поперечных сечениях СРЧ и МЭЧ на один усредненный виток обмотки статора определяются по следующему выражению [4]

$$\Psi_e = \left(\frac{1}{S_1} \int_{S_1} A_z ds - \frac{1}{S_2} \int_{S_2} A_z ds \right), \quad (8)$$

где S_1 и S_2 – площади поперечного сечения в выбранных точках расчета.

Полученные потокосцепления являются единичными, т.е. приходятся на один усредненный виток катушки и единицу аксиальной длины. Для всей катушки статора СГД с учетом всех ее витков и активной длины полное потокосцепление можно представить в виде:

$$\Psi = \Psi_{\text{ср}} + \Psi_{\text{мэ}} = W \Psi_e l_{\text{ср}} + W \Psi_e l_{\text{мэ}}, \quad (9)$$

где $\Psi_{\text{ср}}$ и $\Psi_{\text{мэ}}$ – составляющие потокосцеплений синхронной реактивной и магнитоэлектрической части СГД; $l_{\text{ср}}$ и $l_{\text{эм}}$ – активные длины СРЧ и МЭЧ синхронного гибридного двигателя; W – число витков обмотки статора.

Вводя допущения о линейности характеристики намагничивания магнитной цепи, величина индуктивности катушки может быть определена, как коэффициент пропорциональности между током и потокосцеплением [1,4,5,7]

$$L = \Psi / I. \quad (10)$$

Тогда индуктивное сопротивление при частоте f и угловой частоте $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ можно вычислить следующим образом:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L. \quad (11)$$

Величины Ψ, L, X_L – могут оказаться собственными или взаимными в зависимости от того, что является источником векторного магнитного потенциала A_z . В зависимости от постановки полевой задачи, по результатам расчета магнитного поля, можно определить индуктивные параметры СГД.

Определение индуктивных параметров СГД

К числу индуктивных параметров СГД, которые определяют его поведение и протекающие в нем процессы, относятся [2, 6, 7]:

- синхронные индуктивные сопротивления x_d и x_q по осям d и q для синхронной реактивной части СГД;
- синхронные индуктивные сопротивления x_{d1} и x_{q1} по осям d и q для магнитоэлектрической части СГД;
- эквивалентные индуктивные сопротивления, учитывающие электромагнитную связь между синхронной реактивной и магнитоэлектрической частями ротора синхронного гибридного двигателя.

Для упрощения анализа процессов электромагнитного преобразования энергии полное потокосцепление каждой из обмоток электрической машины представляют в виде суммы двух составляющих – главного потокосцепления и потокосцепления рассеяния:

$$\Psi_i = \Psi_{im} + \Psi_{i\sigma}. \quad (12)$$

Тогда синхронные индуктивные сопротивления по осям d и q для СРЧ и МЭЧ синхронного гибридного двигателя можно представить в виде:

$$\begin{cases} x_d = x_{ad} + x_s; \\ x_q = x_{aq} + x_s, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_{d1} = x_{ad1} + x_s; \\ x_{q1} = x_{aq1} + x_s; \end{cases} \quad (14)$$

где x_{ad} и x_{aq} – сопротивления взаимоиндукции обмотки статора по осям d и q для синхронной реактивной части СГД; x_s – сопротивление рассеяния обмотки статора; x_{ad1} и x_{aq1} – сопротивления взаимоиндукции обмотки статора по осям d и q для магнитоэлектрической части СГД.

Зная сопротивления взаимоиндукции СРЧ и МЭЧ x_d, x_q, x_{d1}, x_{q1} , эквивалентные индуктивные сопротивления СГД определяются по следующим выражениям [2]:

$$\begin{cases} x_{d\vartheta} = 1 + \frac{x_{d1}}{x_d} \cos^2 \lambda + \frac{x_{q1}}{x_d} \sin^2 \lambda; \\ x_{q\vartheta} = \frac{x_q}{x_d} + \frac{x_{q1}}{x_d} \cos^2 \lambda + \frac{x_{d1}}{x_d} \sin^2 \lambda; \\ x_\vartheta = \frac{x_{d1} - x_{q1}}{x_d} \sin \lambda \cos \lambda, \end{cases} \quad (15)$$

где $x_{d\vartheta}$ – эквивалентное синхронное индуктивное сопротивление по оси d СГД;

$x_{q\vartheta}$ – эквивалентное синхронное индуктивное сопротивление по оси q СГД;

x_ϑ – эквивалентное индуктивное сопротивление взаимоиндукции СГД;

λ – угол сдвига полюсов магнитоэлектрической части ротора относительно полюсов СРЧ.

Анализ уравнений (13-15) показывает, что для определения параметров синхронных гибридных двигателей методами теории электромагнитного поля необходимо знание индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора и сопротивления взаимоиндукции обмотки статора по осям d и q для синхронной реактивной и магнитоэлектрической части СГД.

Определение этих параметров осуществляется с помощью расчетных моделей для моделирования магнитных полей обмотки статора при удаленном

роторе из расточки статора СГД, и для моделирования полей в СРЧ и МЭЧ синхронного гибридного двигателя по осям d и q .

Индуктивность фазы обмотки статора СГД определяется через векторный магнитный потенциал при удаленном роторе из расточки статора [4]

$$L_{m,n} = \frac{W_m l_a}{I_n} \left(\frac{1}{S_{m1}} \cdot \int_{S_{m1}} A_{zn} \cdot ds - \frac{1}{S_{m2}} \cdot \int_{S_{m2}} A_{zn} \cdot ds \right) \quad (16)$$

где A_{zn} – векторный магнитный потенциал поля, возбужденного током I_n фазы n , S_{m1} и S_{m2} – площади поперечного сечения сторон фазы m , W_m – число витков фазы. Если n и m различны, то получаем коэффициент взаимной индуктивности между фазами обмотки статора СГД, если равны, то коэффициент собственной индуктивности данной фазы. Индуктивность рассеяния L_σ определяется через энергию магнитного поля фазы [6, 7]. При определении главных индуктивных сопротивлений по осям d и q были использованы результаты моделирования магнитных полей в СРЧ и МЭЧ синхронного гибридного двигателя, представленные на рис. 2 и рис 3.

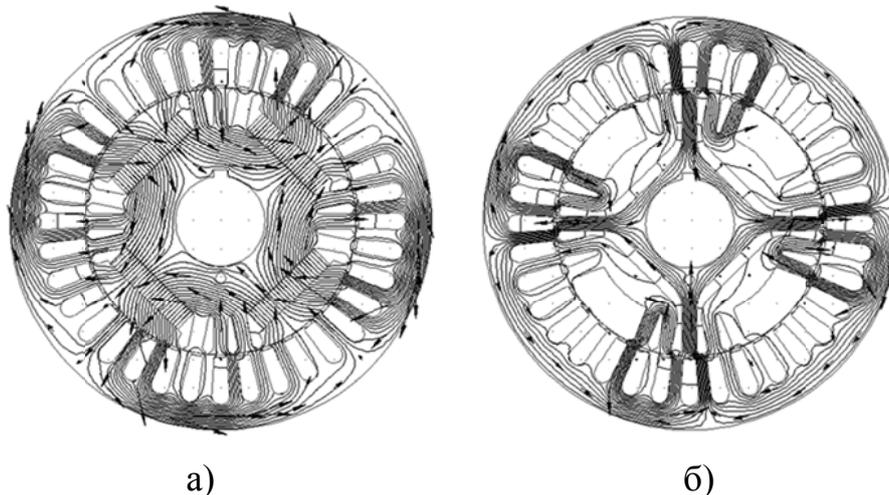


Рис. 2. Распределение силовых линий магнитного поля по продольной оси d :
а) МЭЧ СГД, б) СРЧ СГД

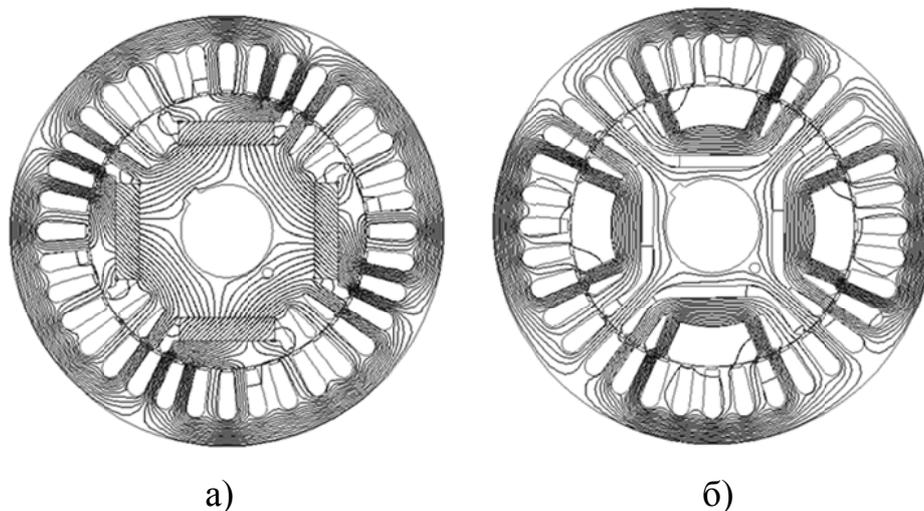


Рис. 3. Распределение силовых линий магнитного поля по поперечной оси q :
а) МЭЧ СГД, б) СРЧ СГД

Величина главной индуктивности по осям d и q для МЭЧ и СРЧ СГД определяется по выражению (10) с использованием соответствующих значений потокосцеплений, полученных из анализа картин распределения силовых линий магнитного поля, а индуктивные сопротивления по выражению (11).

Таким образом, если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора и зная индуктивные параметры синхронного гибридного двигателя его электромагнитный момент можно рассчитать по следующему выражению:

$$M = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{\omega_1 \cdot x_{d1}} \cdot \sin \theta + \frac{m \cdot U^2}{2 \cdot \omega_1} \cdot \left(\frac{1}{x_{d1}} - \frac{1}{x_{q1}} \right) \cdot \sin 2\theta + \frac{U^2}{2 \cdot x_d} \cdot \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right) \cos 2\theta, \quad (17)$$

где m – число фаз, U – напряжение сети, E_0 – ЭДС, наводимая в обмотке статора встроенным постоянным магнитом.

Исходя из вышеприведенного установлено, что использование результатов расчета магнитного поля позволяет определить основные параметры СГД и рассчитать электромагнитный момент, являющийся интегральной угловой характеристикой СГД.

Работа выполнена в рамках Госзадания «Наука», проект №3852

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суханов В.В. Расчет магнитных полей в электрических машинах нетрадиционной конструкции. Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, www.elcut.ru/articles/sukhanov/motors.pdf.

2. Големгрейн В. В. Динамические режимы работы синхронного гибридного двигателя. Автореферат кандидатской диссертации Томск 2002. – 20 с.

3. Дубицкий С., Поднос В. ELCUT – инженерная система моделирования физических полей. CADmaster 1, 2001. – 17–21 с.

4. Милых В.И., Данько В.Г., Полякова Н.В. Методология поверочного электромагнитного расчета сверхпереходного криотурбогенератора на основе решения полевых задач. // Электротехника і електромеханіка – 2002. – №2 – С. 47–52.

5. Суворкова (Пирогова) Е. Е. , Дементьев Ю. Н. , Бурулько Л. К. Характеристики гибридной синхронной машины // Известия Томского политехнического университета. – 2013 - Т. 322 – №. 4. – С. 170–172.

6. Данилевич Я.Б., Домбровский В.В., Казовский Е.Я. Параметры электрических машин переменного тока. – Издательство «Наука», Москва-Ленинград, 1965. – 329 с.

7. Suvorkova E. E. , Vayda I. A. , Dementjev Y. N. , Burulko L. K. Hybrid Synchronous Motor with Improved Starting Torque // 12th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering": proceedings, Курессааре, 11-16 Июня 2012. - Kuressaare: Elektriajam, 2012. – С. 93–95.

8. Suvorkova E. E. , Burulko L. K. Hybrid synchronous motor electromagnetic torque research (Article number 01026) // MATEC Web of Conferences . – 2014. - Vol. 19. – p. 1–3.

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

С.А. Смолярчук, А.Л. Федянин, О.П. Муравлев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, Томск

Трехфазные асинхронные двигатели (АД) являются наиболее многочисленной продукцией российского электромашиностроения. При соблюдении условий эксплуатации и обслуживания АД, можно добиться высоких показателей надежности при их использовании. В силу простоты конструкции около 95% электроприводов оснащают именно АД, которые потребляют более 60% всей производимой электроэнергии в стране и в мире.

Цель статьи – анализ отказов АД и выявление причин их возникновения в химической промышленности.

В процессе эксплуатации электродвигателей по разным причинам в них возникают неисправности, которые могут привести к простоям в работе технологического оборудования.

Для того чтобы такие перерывы как можно меньше сказывались на выполнении предприятием производственных планов, необходимо уметь быстро найти причину неисправности и устранить ее.

Необходимость в быстрейшем устранении повреждений обуславливается также и тем, что работа электродвигателя, имеющего небольшое повреждение, может привести к развитию повреждения и необходимости более сложного ремонта.

Чтобы определить объем ремонтных работ АД, необходимо выявить характер его неисправностей. Отказы АД можно условно разделить на внешние и внутренние.

К внешним отказам АД относят:

- обрыв одной или нескольких фаз, соединяющих АД с сетью, или несоблюдение схемы соединения;
- неисправности аппаратуры пуска или управления, пониженное или повышенное напряжение питающей сети;
- перегрузка АД;
- недостаточная вентиляция или ее отсутствие.

Внутренние отказы АД подразделяются на механические и электрические.

К механическим отказам АД относят:

- нарушение работы подшипников;