

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

И.П.Стадник, докт.техн.наук, В.В.Чабанов

ООО «Фирма «Оптимаг»,

ул. Коммунальная 39-а, Симферополь, 95000, АР Крым, Украина.

E-mail: optimag.org@gmail.com

Для многополюсного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов и гладким статором разработана методика расчёта магнитного поля и вращающего момента с использованием микротоковой модели. Предложен алгоритм оптимизации геометрических параметров двигателя по максимуму вращающего момента при заданных внешнем диаметре и длине пакета, диаметре провода, величине воздушного зазора, мощности тепловых потерь, максимальном значении индукции в пакете статора, магнитной проницаемости стальных элементов. Библ. 3, рис. 5.

Ключевые слова: постоянный магнит, электродвигатель, вращающий момент, микроток, магнитная проницаемость, индукция магнитного поля.

Постановка задачи. В статье рассматривается синхронный электродвигатель с гладким статором, который обеспечивает минимум пульсаций вращающего момента. Анализ литературы показал, что научные работы в области синхронных машин с постоянными магнитами в основном касаются систем управления питанием, а также анализа машин со статором, содержащим пазы, как, например, [1]. Целью данной работы является оптимизация геометрических размеров синхронного электродвигателя с

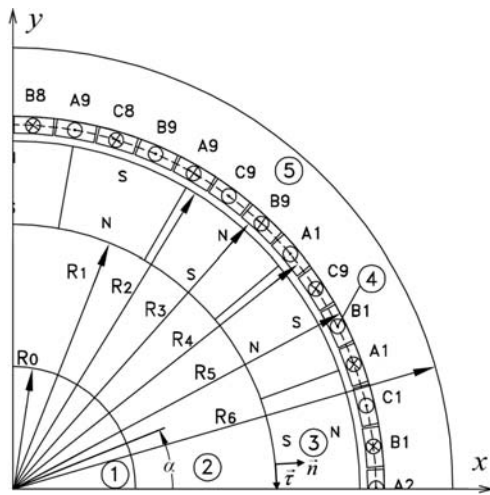


Рис. 1

постоянными магнитами и с гладким статором при заданных габаритных размерах (внешнем диаметре пакета статора и длине этого пакета) и мощности тепловых потерь в обмотке. Находятся такие геометрические размеры (внутреннего и внешнего диаметров магнитов, а также внешнего диаметра обмотки), при которых вращающий момент принимает максимально возможное значение.

На рис. 1 показана четвертая часть сечения электродвигателя с постоянными магнитами с числом полюсов, равным 18. Вал 1 и втулка 2 изготовлены из магнитомягкой стали. Постоянные магниты 3 намагничены вдоль оси полюса. Как правило, применяются магниты NdFeB. Трёхфазная обмотка двигателя набирается из 27 катушек 4 (по 9 катушек в каждой фазе). Каждая катушка содержит w витков медного провода. Обмотка статора, как и магнитная система ротора, в каждой фазе имеет 18 полюсов. Пакет статора 5 шихтованный. Катушки питаются трёхфазным синусоидальным напряжением. В каждой фазе они соединяются последователь-

но. Будем считать заданными токи в фазах

$$i_A(t) = I_m \sin \omega t, \quad i_B(t) = I_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad i_C(t) = I_m \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (1)$$

где ω – круговая частота.

Примем следующие допущения: магнитное поле – плоскопараллельное; магнитная проницаемость материала вала и втулки – постоянная и равна μ_1 ; магнитная проницаемость материала пакета статора – постоянна и равна μ_2 ; магниты намагничены однородно.

Заданными при оптимизации являются число полюсов $2p$; число фаз (берётся равным 3); внешний радиус пакета статора R_6 ; величина воздушного зазора $\Delta = R_3 - R_2$; диаметр провода с изоляцией d ; диаметр провода без изоляции d_0 ; мощность тепловых потерь в трёхфазной обмотке статора P ; допустимое значение индукции в стали статора $B_{\text{доп}}$; магнитная проницаемость стали ротора и статора $\mu = \mu_1 = \mu_2$; величина намагниченности магнитов J ; длина пакета статора L .

Варьируемые величины R_1 , R_2 и R_5 .

Функцией цели является вращающий момент $M_P(R_1, R_2, R_5)$, действующий на ротор со стороны статора. Ставится задача найти такие значения радиусов R_1 , R_2 и R_5 , при которых вращающий

момент будет максимальным. При этом максимальное значение индукции в стали статора B_{\max} не должно превышать $B_{\text{доп}}$ ($B_{\max} \leq B_{\text{доп}}$).

Расчёт распределения плотности микротоков на поверхности втулки и на боковых поверхностях пакета статора. Заданными источниками магнитного поля двигателя являются токи статора (1) и микротоки, которые возникают на поверхности магнитов. Получим выражения для линейной плотности микротоков на поверхности магнитов.

Как известно (например, [2]), если граничат два магнита и направление нормали выбрано из первого магнита во второй, то поверхностная (линейная) плотность микротока на границе будет равна

$$\vec{j} = [(\vec{J}_1 - \vec{J}_2) \vec{n}] . \quad (2)$$

Из этой формулы следует, что если участок границы первого магнита не соприкасается со вторым магнитом, а, например, с воздухом, то плотность микротока на этом участке равна

$$\vec{j} = [\vec{J}_1 \vec{n}] . \quad (3)$$

На рис. 2 показано сечение части магнитной системы, состоящей из двух имеющих общую плоскость магнитов. На участке 1 в соответствии с (3) (ось z направлена “к нам”)

$$\vec{j} = -J_1 \sin(10^\circ - \alpha) \vec{e}_z = -J \sin(10^\circ - \alpha) \vec{e}_z . \quad (4)$$

На участке 2 в соответствии с (2)

$$\vec{j} = J_1 \sin 100^\circ \vec{e}_z + J_2 \sin 80^\circ \vec{e}_z = 2J \sin 80^\circ \vec{e}_z . \quad (5)$$

На участке 3 \vec{j} , обусловленная намагниченностью магнитов, войдёт в состав результирующей \vec{j} , в которой кроме \vec{j} , обусловленной намагниченностью магнитов, будет \vec{j} , обусловленная намагниченностью стали втулки, и которая (результирующая \vec{j}) является неизвестной. Наличие \vec{j} , обусловленной намагниченностью магнитов, на этом участке будет отражено в граничных условиях.

Первоначально расчёт плотности микротоков будем проводить в рабочем режиме синхронного электродвигателя, причём для случая, когда двигатель создаёт максимальный вращающий момент, т.е. когда между магнитным полем токов статора и магнитным полем постоянных магнитов существует пространственный сдвиг, равный 90 электрических градусов. Этот момент времени обозначим $t = 0$. На рис. 1 и рис. 3 показано именно такое взаимное расположение магнитов и обмотки статора. На рис. 3 изображено также распределение радиальной компоненты магнитного поля постоянных магнитов и токов обмотки статора в момент времени $t=0$, т.е. когда

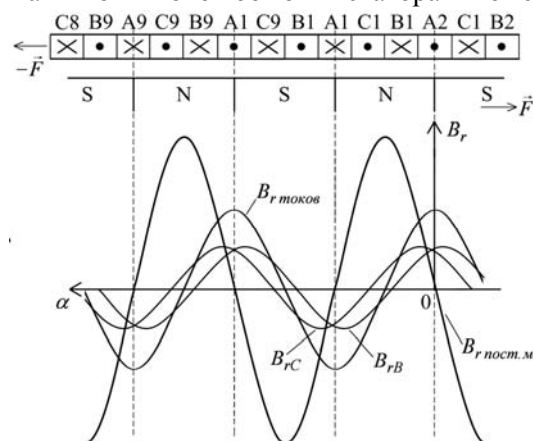


Рис. 2

$$i_A(0) = 0, \quad i_B(0) = I_m \sin(-120^\circ) = -I_m \sqrt{3}/2,$$

$$i_C(0) = I_m \sin 120^\circ = I_m \sqrt{3}/2 . \quad (6)$$

В дальнейшем с увеличением времени t ротор будет вращаться в направлении силы \vec{F} , указанной на рис. 3, с синхронной угловой скоростью

$$\omega_p = \omega/9 . \quad (7)$$

При частоте приложенного напряжения $f=50$ Гц угловая скорость ротора равна $\omega_p=333,3$ об/мин. Магнитное поле токов статора также будет вращаться в этом направлении с той же скоростью.

Обозначим через l_1 проекцию боковой поверхности втулки на плоскость xOy (окружность радиуса R_1), а через l_2 суммарную проекцию внутренней и внешней боковых поверхностей статора также на плоскость xOy (окружность радиуса R_5 и окружность радиуса R_6).

Граничные условия, которые будут использованы при выводе интегрального уравнения на этих линиях, будут иметь разный вид.

Граничные условия, которые будут использованы при выводе интегрального уравнения на этих линиях, будут иметь разный вид.

На линии l_2
$$H_{\tau}^{+} = H_{\tau}^{-} \text{ или } B_{\tau}^{+} / \mu_2 = B_{\tau}^{-} / \mu_0. \quad (8)$$

Направление $\vec{\tau}$ выбрано так, чтобы векторы $\vec{\tau}$, \vec{n} , \vec{e}_z (“к нам”) составляли правую тройку векторов. Нормаль \vec{n} направлена из магнитомягкой стали (обозначено +) в окружающую среду (обозначено -).

На линии l_1
$$H_{\tau}^{+} = H_{\tau}^{-} \text{ или } B_{\tau}^{+} / \mu_1 = B_{\tau}^{-} / \mu_0 - J_{\tau}. \quad (9)$$

J_{τ} на первом участке (всего участков 18) линии l_1 , для которого $0 \leq \alpha \leq 20^\circ$ равно

$$J_{\tau}^{(1)}(\alpha) = -J \sin(10^\circ - \alpha). \quad (10)$$

На k -ом участке симметрично, т.е. $J_{\tau}^{(k)}(20^\circ(k-1) + \alpha) = -(-1)^{k-1} J \sin(10^\circ - \alpha)$, $k = 2, 3, \dots, 18$, $0 \leq \alpha \leq 20^\circ$.

Приведём краткий вывод интегрального уравнения для проекции линейной плотности тока на ось z , т.е. для j . Это интегральное уравнение отличается от подобных уравнений в [3] тем, что на поверхности втулки (окружность радиуса R_1) искомая плотность тока j складывается из плотности тока, обусловленной сталью втулки, и плотности токов магнитов.

В соответствии с законом полного тока в интегральной форме индукция в точке Q , обусловленная микротоками элемента dl_p , равна (рис. 4)

$$d\vec{B}(Q, t) = \mu_0 (2\pi)^{-1} [\vec{j}(P, t) dl_p \vec{r}_{PQ}] r_{PQ}^{-2}. \quad (11)$$

Предельные значения касательной компоненты индукции магнитного поля при стремлении к точке Q изнутри B_{τ}^{+} и извне ферромагнетика B_{τ}^{-} соответственно равны ($l=l_1+l_2$, $Q \in l$) (рис. 4)

$$B_{\tau}^{+}(Q, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \oint_l \frac{j(P, t) r_{PQ} (-\cos \alpha)}{r_{PQ}^2} dl + \frac{\mu_0 j(Q, t)}{2} + B_{0\tau}(Q, t), \quad (12)$$

$$B_{\tau}^{-}(Q, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \oint_l \frac{j(P, t) r_{PQ} (-\cos \alpha)}{r_{PQ}^2} dl - \frac{\mu_0 j(Q, t)}{2} + B_{0\tau}(Q, t). \quad (13)$$

Подставим в граничные условия (8) и (9) выражения (12) и (13); после несложных преобразований получим

$$j(Q, t) + \frac{\mu(Q) - \mu_0}{\mu(Q) + \mu_0} \frac{1}{\pi} \oint_l \frac{j(P, t) (\vec{r}_{PQ} \vec{n}_Q)}{r_{PQ}^2} dl_p = f(Q, t), \quad Q \in l, \quad (14)$$

где $f(Q, t) = \frac{2(\mu_1 - \mu_0)}{\mu_0(\mu_1 + \mu_0)} B_{0\tau}(Q, t) - \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_0} J_{\tau}(Q, t)$, $Q \in l_1$; $f(Q, t) = \frac{2(\mu_2 - \mu_0)}{\mu_0(\mu_2 + \mu_0)} B_{0\tau}(Q, t)$, $Q \in l_2$.

Касательная компонента первичного поля $\vec{B}_0(Q, t)$ определяется макротоками обмотки и микротоками постоянных магнитов за исключением микротоков постоянных магнитов, расположенных на линии l_1 .

Будем считать ток одной стороны катушки сосредоточенным в центре сечения этой стороны. Обозначим этот ток через $i_k(t)$. Точку сосредоточения этого тока обозначим через N_k . Очевидно, величина этого тока равна произведению входного тока фазы на количество витков катушки.

Обозначим через l_3 линию границы постоянных магнитов (окружность радиуса R_2 и все границы между магнитами), т.е. это границы магнитов, за исключением линии l_1 . Общая линия между соседними магнитами считается одной линией.

Тогда для $B_{0\tau}(Q, t)$ можно записать выражение

$$B_{0\tau}(Q, t) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^{54} \frac{i_k(t) (\vec{r}_{N_k Q} \vec{n}_Q)}{r_{N_k Q}^2} - \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{l_3} \frac{j(N, t) (\vec{r}_{N Q} \vec{n}_Q)}{r_{N Q}^2} dl_N. \quad (15)$$

Здесь $j(N, t)$ определяется формулами (4) и (5). Ток $i_k(t)$ берётся противоположного знака на сторонах катушек, на которых направление вычисления тока “от нас”. При $t = 0$ суммирование в первом слагаемом формулы (15) производится только по сторонам катушек фаз B и C , так как при $t = 0$ ток в фазе A равен нулю.

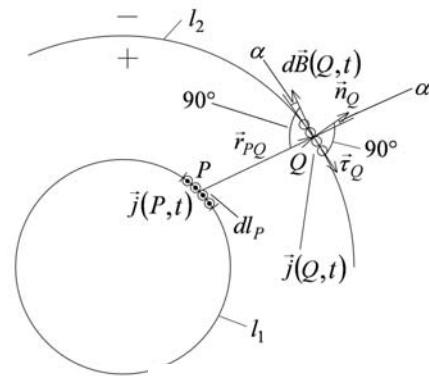


Рис. 4

При решении интегрального уравнения $j(Q, t)$ отыскивается в пределах двух соседних полюсных делений, например, ограниченных двумя радиальными линиями при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 40^\circ$. Учитывая симметрию, можно найти j в любой другой точке. Симметрия имеет вид

$$j(\alpha) = j(\alpha + 40^\circ) = j(\alpha + 80^\circ) = \dots = j(\alpha + 320^\circ), \quad \text{где } 0 \leq \alpha \leq 40^\circ. \quad (16)$$

Расчёт вращающего момента электродвигателя. Первый способ расчёта вращающего момента электродвигателя заключается в расчёте силового действия макро- и микротоков статора на микротоки ротора.

Как известно, два бесконечно длинных параллельных проводника с токами i_1 и i_2 , находящихся на расстоянии r_{12} , взаимодействуют с силой на единицу длины (r_{12} – расстояние между осями проводников)

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} = -\frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi r_{12}^2} \vec{r}_{12}, \quad (17)$$

где \vec{r}_{12} – вектор, направленный от оси первого проводника к оси второго и равный по величине расстоянию r_{12} . Направления вычисления токов в проводниках i_1 и i_2 выбраны одинаково (для электродвигателя, как было указано, мы выбираем “к нам”). \vec{F}_{12} – сила, действующая на единицу длины второго проводника со стороны первого, \vec{F}_{21} – сила, действующая на единицу длины первого проводника со стороны второго.

В соответствии с (17) сила, действующая на элемент dl_Q с током $j(Q, t)dl_Q$ со стороны элемента dl_P с током $j(P, t)dl_P$, при условии, что dl_Q имеет длину L (вдоль оси z), равна

$$d\vec{F}_{PQ}(t) = -\frac{\mu_0 L j(P, t) dl_P j(Q, t) dl_Q}{2\pi r_{PQ}^2} \vec{r}_{PQ}. \quad (18)$$

Вращающий момент, действующий на ротор, обусловленный этой силой и вычисляемый по часовой стрелке, равен

$$dM_{PQ}(t) = -\frac{\mu_0 L r_Q j(P, t) dl_P j(Q, t) dl_Q}{2\pi r_{PQ}^2} (\vec{r}_{PQ} \vec{\tau}_Q), \quad (19)$$

где r_Q – длина радиус-вектора точки Q , $\vec{\tau}_Q$ – единичный вектор, перпендикулярный радиус-вектору \vec{r}_Q и направленный по часовой стрелке.

В результате получим следующее выражение для вращающего момента действующего на ротор по часовой стрелке

$$M_P(t) = -\frac{\mu_0 L}{2\pi} \int_{l_1+l_3} r_Q j(Q, t) dl_Q \int_{l_2} \frac{j(P, t) (\vec{r}_{PQ} \vec{\tau}_Q) dl_P}{r_{PQ}^2} - \frac{\mu_0 L}{2\pi} \int_{l_1+l_3} r_Q j(Q, t) dl_Q \sum_{k=1}^{54} \frac{i_k(t) (\vec{r}_{N_k Q} \vec{\tau}_Q)}{r_{N_k Q}^2}, \quad (20)$$

где, как и в (15), l_3 – граница постоянных магнитов, N_k – центр сечения k -ой стороны катушки, $i_k(t)$ берётся противоположного знака на сторонах катушек, на которых направление вычисления тока “от нас”.

Вращающий момент, действующий на макро- и микротоки статора со стороны микротоков ротора и вычисленный против часовой стрелки M_C , равен вращающему моменту, действующему на микротоки ротора со стороны макро- и микротоков статора и вычисленный по часовой стрелке M_P .

Поэтому можно записать формулу вычисления вращающего момента, действующего на макро- и микротоки статора со стороны микротоков ротора и вычисленного против часовой стрелки

$$M_C(t) = \frac{\mu_0 L}{2\pi} \int_{l_2} r_P j(P, t) dl_P \int_{l_1+l_3} \frac{j(Q, t) (\vec{r}_{PQ} \vec{\tau}_P) dl_Q}{r_{PQ}^2} - \frac{\mu_0 L R_4}{2\pi} \sum_{k=1}^{54} i_k(t) \int_{l_1+l_3} \frac{j(Q, t) (\vec{r}_{N_k Q} \vec{\tau}_k)}{r_{N_k Q}} dl_Q, \quad (21)$$

где r_P – длина радиус-вектора точки P , $\vec{\tau}_P$ – единичный касательный к линии l_2 в точке P вектор, направленный против часовой стрелки, $\vec{\tau}_k$ – единичный касательный к средней линии обмотки в точке N_k вектор, направленный против часовой стрелки. Эта формула использовалась для проверки расчёта M_P .

Результаты расчёта вращающего момента при $t = 0$ и исходных данных $\mu_1 = \mu_2 = 1000 \mu_0$, $R_1 = 38,65$ мм, $R_2 = 50,8$ мм, $R_3 = 52,35$ мм, $R_5 = 54,75$ мм, $R_4 = (R_3 + R_5)/2$, $R_6 = 64,465$ мм, $I_m = 1,4$ А, $w = 84$, $J = 888880$ А/м, $L = 105$ мм (длина пакета статора в аксиальном направлении) таковы: $M_P = M_C = 11,79$ Н·м, т.е они не отличаются.

Была рассчитана зависимость $M_p(t)$ для $0 \leq t \leq 0,02$ с. Максимальное отклонение вращающего момента от среднего значения составляет 0,03%.

Расчёт магнитного поля. После расчёта распределения микротоков магнитное поле \vec{B} может быть найдено по формуле

$$\vec{B}(M, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^{54} \frac{i_k(t) [\vec{e}_z \vec{r}_{N_k M}]}{r_{N_k M}^2} + \frac{\mu_0}{2\pi} \oint_{l_1+l_2+l_3} \frac{j(P, t) [\vec{e}_z \vec{r}_{PM}]}{r_{PM}^2} dl_P. \quad (22)$$

Здесь, как и в (15), ток $i_k(t)$ берётся противоположного знака на сторонах катушек, на которых направление вычисления тока от “нас”, $j(P, t)$ определяется формулами (4) и (5) (на l_3) и является решением интегрального уравнения (14) (на l_1 и l_2).

Из (22) легко находятся $B_x(M, t)$, $B_y(M, t)$, $B_r(M, t)$, $B_\alpha(M, t)$ и $B(M, t)$, после чего по формуле (22) можно найти $\vec{H}(M, t)$

$$\vec{H}(M, t) = \vec{B}(M, t) / \mu_0 \text{ – в воздухе, } \vec{H}(M, t) = \vec{B}(M, t) / \mu \text{ – в магнитомягких деталях,}$$

$$\vec{H}(M, t) = \vec{B}(M, t) / \mu_0 - \vec{J}(M, t) \text{ – внутри постоянных магнитов.}$$

Расчёты показывают, что поле первичных токов с учётом ферромагнетиков $B'(r, \alpha, t)$ существенно меньше поля постоянных магнитов с учётом ферромагнетиков $B''(r, \alpha, t)$. Отношение максимального значения B_m'' к максимальному значению B_m' при $r = (R_5 + R_6) / 2$, $t = 0$ равно 70.

Оптимизация геометрических параметров электродвигателя. Заданными при оптимизации являются: $2p = 18$ – число полюсов, $R_6 = 64,456$ мм – внешний радиус пакета статора, $P_{\text{дон}} = 119,044$ Вт – максимально допустимая мощность тепловых потерь в трёхфазной обмотке статора, $B_{\text{дон}} = 1$ Тл – максимально допустимое значение магнитной индукции в стали статора, $\Delta = R_3 - R_2 = 1,55$ мм – величина воздушного зазора, $d = 0,4$ мм – диаметр провода с изоляцией, $d_0 = 0,36$ мм – диаметр провода без изоляции, $\mu_1 = \mu_2 = 1000 \mu_0$ – магнитная проницаемость стали магнитомягких деталей, $L = 105$ мм – длина пакета статора, $J = 888880$ А/м – величина вектора намагниченности постоянных магнитов. Варьируемые величины – радиусы R_1, R_2, R_5 .

Соотношение между R_1 и R_2 найдём один раз и будем считать его постоянным. Для этого рассчитаем зависимость вращающего момента M_p от R_1 при фиксированных $R_2, R_3, R_5, I_m, w, \mu_1, \mu_2$ и L , которые были записаны выше. Из этой зависимости находим, что если взять $R_1 = 0,86 \cdot R_2$, то вращающий момент будет составлять 95% от максимального (при $R_1 = 0$). После определения соотношения между R_1 и R_2 варьируемых параметров будет только два – R_2 и R_5 .

Алгоритм оптимизации построим следующим образом.

Полагаем $M_p = 0$. Задаёмся минимальным значением R_1 (из механических соображений). По R_1 находим $R_2 = 1,16 \cdot R_1$, затем $R_3 = R_2 + \Delta$.

Так как обмотка статора содержит всего 27 катушек, а каждая катушка имеет 2 стороны, то на каждую сторону приходится $360^\circ / 54 = 0,1163$ рад.

Если на один проводник смотреть из центра окружности радиуса $R_3 + d/2$, то этот проводник будет виден под углом $\alpha^{(1)} = 2 \arcsin[d / (2R_3 + d)]$.

Число проводников $w^{(1)}$, которое можно уложить на угле $0,1163$ радиан, будет равно целой части $0,1163 / \alpha^{(1)}$. Тем самым определено число проводников каждой катушки на первом шаге оптимизации.

Находим $R_5 = R_3 + d$. Рассчитываем омическое сопротивление одной катушки $r^{(1)} = 8\rho(L + L_n)w^{(1)} / \pi d_0^2$, где ρ – удельное сопротивление меди при температуре 100°C , L_n – длина лобовой части витка. Приблизённо её можно найти по формуле $L_n = \pi \cdot R_5 / 9$. Находим ток

$I_m^{(1)} = 0,272165 \sqrt{P_{\text{дон}} / r^{(1)}}$. Производим расчёт максимального значения магнитного поля $B_{\text{max}}^{(1)}$ в стали статора при $t = 0$ на дуге радиуса $R_5 + 0,1(R_6 - R_5)$. Если это значение меньше или равно допустимому значению $B_{\text{дон}}$, то рассчитываем вращающий момент $M_p^{(1)}$. На этом заканчивается первый шаг оптимизации.

На следующем шаге R_1 , а следовательно R_2 и R_3 остаются прежними. R_5 берётся равным $R_3 + 2d$. Количество витков во втором слое $w^{(2)}$ будет равно целой части отношения $0,1163 / \alpha^{(2)}$, где $\alpha^{(2)} = 2 \arcsin[d / (2R_3 + 3d)]$.

Суммарное число витков на втором шаге $w^{(2)} = w^{(1)} + w^{(2)1}$. По аналогии с первым шагом находим омическое сопротивление $r^{(2)}$ и максимальное значение тока $I_m^{(2)}$.

Производим расчёт максимального значения магнитного поля $B_{\max}^{(2)}$ в стали статора при $t = 0$ на дуге радиуса $R_5 + 0,1(R_6 - R_5)$. Если это значение меньше или равно допустимому $B_{\text{доп}}$, то рассчитываем вращающий момент $M_P^{(2)}$. Если вращающий момент больше предыдущего значения, то оставляем последние значения параметров, а если наоборот, то оставляем предыдущие.

Наращивание радиуса R_5 производим, пока он меньше или равен $0,99 \cdot R_6$. Если R_5 после очередного наращивания стал больше $0,99 \cdot R_6$, то этот шаг не выполняется.

Далее увеличиваем R_1 на величину ΔR (ΔR , например, берём равным $0,01$ первичного R_1). По изложенному выше алгоритму находим R_3 . Проверяем выполнение неравенства $R_3 \leq 0,99 \cdot R_6 - d$. Если оно выполняется, то производим следующий шаг, аналогично первому. Далее наращиваем R_5 и так далее, пока $R_5 \leq 0,99 \cdot R_6$. Если при очередном увеличении R_1 на величину ΔR $R_3 > 0,99 \cdot R_6 - d$, то этот шаг не выполняется, и процесс оптимизации заканчивается.

Оптимизация производилась при первоначальном значении $R_1 = 18$ мм и $\Delta R = 0,18$ мм. Оптимальные значения параметров: $R_1 = 47,34$ мм; $R_2 = 55,047$ мм; $R_3 = 56,597$ мм; $R_5 = 60,197$ мм; $w = 148$; $r = 8,048$ Ом (при 100°C); $I_m = 1,047$ А; $B_{\max} = 0,994$ Тл; $M_P = 14,291$ Н·м.

Внутри магнитов после оптимизации (рис. 5) максимальное значение составляющей напряжённости магнитного поля, направленной против \vec{J} (при $H_{\max} = 405$ кА/м), не превосходит допустимой напряжённости магнитного поля 1591 кА/м, при которой может произойти размагничивание магнитов.

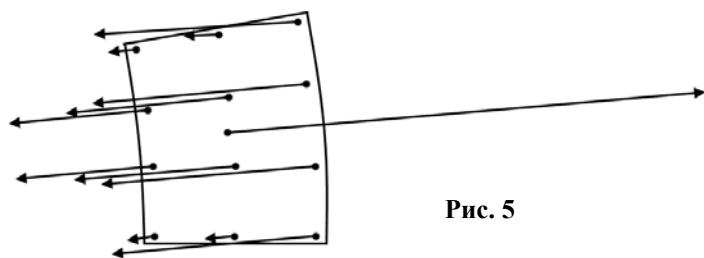


Рис. 5

Можно показать, что вращающий момент, действующий на ротор, определяется путём расчёта вращающего момента, действующего со стороны магнитного поля токов обмотки статора с учётом стали статора и ротора на магниты ротора. Расчет этого поля выполнялся аналитически путём разложения пространственного распределения токов статора в ряд Фурье. В результате

вращающий момент для $t = 0$ и исходных данных, приведённых в разделе «Расчёт вращающего момента электродвигателя», получился равным $M_P = 11,79$ Н·м, т.е. совпадает со значением, полученным методом интегральных уравнений.

Также результаты расчетов вращающего момента были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на электродвигателе с размерами, приведенными в первом варианте, но с улучшенной конструкцией магнитной системы (вместо 18 магнитов использовано 36, т.е. кроме полюсных магнитов имеются межполюсные магниты, намагниченные перпендикулярно нейтрали). Результаты таковы: $M_{P \text{ опт}} = 14,291$ Н·м; $M_3 = 13,423$ Н·м (сравните 11,79 Н·м – для 18-ти полюсной магнитной системы).

Это подтверждает достоверность расчетов.

Выводы. Разработанный алгоритм оптимизации позволяет находить оптимальные радиусы R_1 , R_2 и R_5 , при которых достигается максимум вращающего момента. При этом мощность тепловых потерь в трёхфазной обмотке равна допустимой, а максимальное значение индукции в стали статора не превышает $B_{\text{доп}}$, т.е. эта сталь не насыщается.

Разработан также алгоритм расчёта магнитного поля во всех областях двигателя. Показано, что для оптимальной конструкции магниты не будут размагничиваться.

Результаты данной работы могут быть использованы при оптимальном проектировании подобных электродвигателей.

1. Зарицкая Е.И., Приймак М.В., Олейников А.М. Оценка влияния конфигурации магнитной системы на характеристики тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами // Электротехника и электро-механика. – 2012. – №1. – С. 28–32.

2. Стадник И.П. Электродинамика. Лекции с вопросами и задачами. – К.: Техника, 2012. – 336 с.

3. Тозони О.В., Маергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. – Киев: Техника, 1974. – 352 с.

УДК 621.313.323

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

І.П.Стадник, докт.техн.наук, В.В.Чабанов
ООО "Фірма "Оптімаг"
Вул. Комунальна, 39-а, Сімферополь, 95000, Україна.
E-mail: optimag.org@gmail.com

Для багатополюсного електродвигуна зі збудженням від постійних магнітів і гладким статором розроблено методичку розрахунку магнітного поля і моменту, що обертає, з використанням мікрострумкової моделі. Запропонований алгоритм оптимізації геометричних параметрів двигуна по максимуму моменту, що обертає, при заданих зовнішньому діаметрі і довжині пакету, діаметрі дроту, величині повітряного проміжку, потужності теплових втрат, максимальному значенню індукції в пакеті статора, магнітної проникності сталевих елементів. Бібл. 3, рис. 5.

Ключові слова: постійний магніт, електродвигун, момент, що обертає; мікрострум, магнітна проникність, індукція магнітного поля.

OPTIMIZATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF ELECTRIC MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

I.P.Stadnik, V.V.Chabanov
ООО "Optimag",
str. Komunalna, 39-a, Simferopol, 95000, Ukraine.
E-mail: optimag.org@gmail.com

The method of calculation of a magnetic field and the torque is developed for the multi-polar electric motor with excitation from permanent magnets and a smooth stator with use of microcurrent model. The algorithm of optimization of geometrical parameters of the engine, to the maximum torque is offered, for specified values: external diameter and stator package length, diameter of a wire, size of an air gap, power of thermal losses, the maximum value of induction in a package of a stator, magnetic permeability of steel elements. References 3, figures 5.

Key words: permanent magnet, electric motor, torque, microcurrent, magnetic permeability, magnetic induction.

1. Zaritskaia E.I., Pryymak M.V., Oleynikov A.M. Estimation of magnetic system configuration influence on low-speed permanent-magnet synchronous generator characteristics // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2012. – №1. – Pp. 28–32. (Rus)
2. Stadnik I.P. Electrodynamics. Lecture with questions and tasks. – Kyiv: Tekhnika, 2012. – 336 p. (Rus)
3. Tozoni O.V., Mayergoyz I.D. Calculation of three-dimensional electromagnetic field. – Kyiv: Tekhnika, 1974. – 352 p. (Rus)

Надійшла 22.07.2014
Остаточний варіант 08.01.2015