

машины. Получены выражения для составляющих синтезирующей функции в обобщенном виде — цель управления не задана явно. На основе синтезирующей функции получены управляющие

устройства электромагнитным моментом асинхронного электродвигателя, отличающиеся простотой реализации и идентификации переменных, а также высоким быстродействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bocker J., Mathapati S. State of the Art of Induction Motor Control // The University of Paderborn site. 2007. URL: <http://www.lea.uni-paderborn.de/fileadmin/Elektrotechnik/AG-LEA/forschung/veroeffentlichungen/2007/07IEMDC-boeckermathapati.pdf> (дата обращения: 01.06.2011).
2. Бичай В.Г., Пиза Д.М., Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Состояние, тенденции и проблемы в области методов управления асинхронными двигателями // Радиоэлектроника, информатика, управление. — 2001. — № 1. — С. 138–144.
3. Kerkman R.J., Skibinski G.L., Schlegel D.W. AC Drives: Year 2000 (Y2K) and Beyond // The Rockwell Automation site. 1999. URL: <http://www.ab.com/support/abdrives/documentation/techpapers/Y2KIEEE.pdf> (дата обращения: 01.06.2011).
4. Григорьев А.В. Оптимальное управление координатами асинхронного электродвигателя // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2008. — № 6. — С. 29–32.
5. Ешин Е.К., Григорьев А.В. Общая задача управления асинхронным электродвигателем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2010. — № 1. — С. 39–43.
6. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1983. — 392 с.

Поступила 04.07.2011 г.

УДК 621.313.8

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭДС МАЛОИНЕРЦИОННЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Е.Г. Коков, А.С. Жибинов, Э.Р. Гейнц, Г.С. Цехмestрюк

ОАО «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск
E-mail: polus@online.tomsk.net

Получены аналитические выражения для расчета поля возбуждения в средней части активной длины машины, где поле принимается плоскопараллельным, что позволяет достаточно точно находить ЭДС возбуждения в проводниках прямой части и с некоторым приближением — в проводниках лобовых частей обмотки.

Ключевые слова:

Магнитное поле, уравнение Лапласа, обмотка якоря, ЭДС проводника, коэффициент использования.

Key words:

Magnetic field, Laplace's equation, armature winding, electromotive force of conductor, activity factor.

Требование максимального быстродействия устройств автоматики обусловило необходимость разработки исполнительных двигателей с малым моментом инерции вращающихся частей. Для этого электрическая машина (ЭМ) заданной мощности проектируется с максимально допустимой по механической устойчивости длиной якоря при минимальном его диаметре (длинная ЭМ). Дальнейшее повышение быстродействия достигается уменьшением инерционной массы ЭМ, когда вращаются только проводники обмотки якоря (двигатель с полым печатным или проволочным якорем [1]) или исключается зубчатая зона, а проводники обмотки равномерно распределяются по ядру якоря (двигатель с гладким якорем [2]). Дополнительно снизить массу вращающихся частей можно путем активного использования лобовых соединений [3] при продлении в их зону индуктора с одновременным сокращением длины прямой (пазовой) части якоря.

Поскольку в длинных ЭМ основное преобразование энергии происходит в проводниках прямой части, а поле в этой зоне можно считать плоскопараллельным, то можно обойтись более простым решением уравнения Лапласа в двухмерной области, приняв найденные параметры поля для расчета с некоторой погрешностью ЭДС в проводниках лобовых частей, тогда как для коротких ЭМ необходимо решение трехмерной задачи [4, 5].

Целесообразно определять поле в обобщенной расчетной области (рис. 1), в которой можно выделить пять подобластей в цилиндрических координатах r, φ : t — подобласть с внутренним источником поля J_1 , w — подобласть с наружным источником поля J_2 , e, f — подобласть стыковых зазоров, отделяющих источники поля от соответствующих магнитопроводов.

Тогда частными вариантами будут: ЭМ с полым якорем и внутренними постоянными магнитами (ПМ) ($J_2=0, r_3=r_{10}=r_{11}$), полым якорем и наружными ПМ ($J_1=0, r_1=r_2=r_3$) и с гладким якорем ($J_1=0,$

$r_1=r_2=r_3=r_4$). По приведенной на рис. 1 расчетной области и полученной для нее математической модели можно найти поле в рабочем зазоре ЭМ с шихтованным пакетом [6] и внутренними ($J_2=0$, $r_4=r_5=r_6=r_7=r_8=r_9=r_{10}=r_{11}$) или наружными ($J_1=0$, $r_1=r_2=r_3=r_4=r_5=r_6=r_7=r_8$) ПМ.

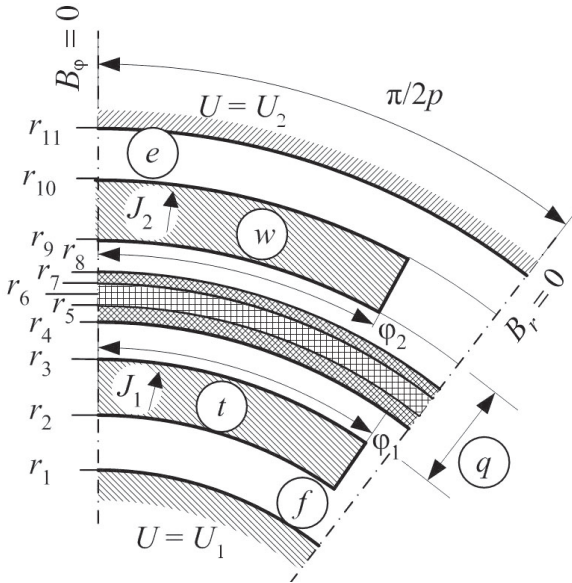


Рис. 1. Обобщенная расчетная область ЭМ

Решение уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала в отдельной области в цилиндрических координатах известно [7] и имеет вид

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n r^{pn} + D_n r^{-pn}) \cos pn\varphi.$$

где n – нечетные числа натурального ряда; p – число пар полюсов ЭМ; C, D – коэффициенты; φ – полярный угол от оси полюса; r – расстояние от центра расчетной области.

Используя условия на внешних границах r_1, r_{11} , где равны потенциалы, и внутренних границах r_2, r_3, r_9, r_{10} , где равны и потенциалы, и нормальные составляющие индукции, составим систему из десяти уравнений для определения неизвестных коэффициентов C и D , решив которую, найдем

$$D_n^q = \frac{1}{A_{3n}} \left[\frac{1}{2pn} (J_{1n} A_{1n} - J_{2n} A_{2n}) + U_{1n} r_1^{-pn} - U_{2n} r_{11}^{-pn} \right];$$

$$C_n^q = \frac{J_{2n} A_{2n} - D_n^q r_{11}^{-2pn} + U_{2n} r_{11}^{-pn}}{2pn};$$

$$D_n^w = D_n^q - \frac{J_{2n} r_9^{pn+1}}{2pn}; \quad C_n^w = C_n^q + \frac{J_{2n} r_9^{-pn+1}}{2pn};$$

$$D_n^e = D_n^w + \frac{J_{2n} r_{10}^{pn+1}}{2pn}; \quad C_n^e = C_n^w - \frac{J_{2n} r_{10}^{-pn+1}}{2pn};$$

$$D_n^t = D_n^q - \frac{J_{1n} r_3^{pn+1}}{2pn}; \quad C_n^t = C_n^q + \frac{J_{1n} r_3^{-pn+1}}{2pn};$$

$$D_n^f = D_n^t + \frac{J_{1n} r_2^{pn+1}}{2pn}; \quad C_n^f = C_n^t - \frac{J_{1n} r_2^{-pn+1}}{2pn},$$

где

$$J_{1n} = \frac{4J_1}{\pi n} \sin pn\varphi_1; \quad J_{2n} = \frac{4J_2}{\pi n} \sin pn\varphi_2;$$

$$U_{1n} = \frac{4p}{\pi} \int_0^{-\pi/2p} U_1(\varphi) \cos pn\varphi d\varphi;$$

$$U_{2n} = \frac{4p}{\pi} \int_0^{-\pi/2p} U_2(\varphi) \cos pn\varphi d\varphi;$$

$$A_{1n} = r_2^{-pn+1} - r_3^{-pn+1} + r_1^{-2pn} (r_3^{pn+1} - r_2^{pn+1});$$

$$A_{2n} = r_{10}^{-pn+1} - r_9^{-pn+1} + r_{11}^{-2pn} (r_9^{pn+1} - r_{10}^{pn+1});$$

$$A_{3n} = r_1^{-2pn} - r_{11}^{-2pn}.$$

В свою очередь, $U_{1,2}(\varphi)$ – функции распределения потенциалов на поверхности магнитопроводов от падения магнитодвижущей силы в тангенциальном направлении, определяемые последовательными приближениями (при первом расчете $U_{1,2}=0$).

Дальнейшие вычисления производятся в следующем порядке. По радиальной индукции на поверхности магнитопроводов $B_{r1} = -\mu_0 \frac{\partial U^e}{\partial r}$ и

$B_{r1} = -\mu_0 \frac{\partial U^f}{\partial r}$ вычисляется их поток:

$$\Phi_{j1} = \int_0^{\varphi} B_{r1} r_1 d\varphi =$$

$$= -\mu_0 r_1 \sum_{n=1}^{\infty} (C_n^f r_1^{pn-1} - D_n^f r_1^{-pn-1}) \sin pn\varphi;$$

$$\Phi_{j2} = \int_0^{\varphi} B_{r11} r_{11} d\varphi =$$

$$= -\mu_0 r_{11} \sum_{n=1}^{\infty} (C_n^e r_{11}^{pn-1} - D_n^e r_{11}^{-pn-1}) \sin pn\varphi$$

и при известной высоте магнитопроводов $h_{j1,2}$ определяется тангенциальная индукция:

$$B_{j1} = \frac{1}{h_{j1}} \Phi_{j1} \quad \text{и} \quad B_{j2} = \frac{1}{h_{j2}} \Phi_{j2}.$$

Учитывая, что потенциал магнитопроводов посередине межполюсного пространства равен нулю, очередное приближение $U_{1,2}$ найдем в виде

$$U_1(\varphi) = \int_{-\pi/2p}^{\varphi} \left(r_1 - \frac{h_{j1}}{2} \right) H(B_{j1}) d\varphi;$$

$$U_2(\varphi) = \int_{-\pi/2p}^{\varphi} \left(r_{11} + \frac{h_{j2}}{2} \right) H(B_{j2}) d\varphi,$$

где $H(B_j)$ – нелинейная скалярная функция.

Итерации продолжаются до достижения заданной погрешности двух последовательных приближений.

После определения поля в расчетной области необходимо проверить правильность задания размеров магнитов, вычислив индукцию при $\varphi=0$ и $r=r_9, r=r_3, r=r_2$. Ни одно из этих значений не дол-

жно превышать значение остаточной индукции ПМ [2].

При вычислении ЭДС принимаем индукцию в зоне расположения обмотки равной среднему значению по радиусу:

$$B_{cp}^q = -\mu_0 \frac{U^q(r_7) - U^q(r_5)}{r_7 - r_5} = \sum_{n=1}^{\infty} S_n \cos pn\varphi,$$

где $S_n = \frac{-\mu_0}{r_7 - r_5} [C_n^q (r_7^{pn} - r_5^{pn}) + D_n^q (r_7^{-pn} - r_5^{-pn})]$.

Расчет ЭДС в лобовой части обмотки рассмотрим на примере аппроксимации ее формы зависимостью $z = a + b\varphi_0^k$ (рис. 2), которая при $k=1$ представляет прямую линию (треугольная форма лобовой части обмотки), а при четном $k \geq 2$ – параболу второго или высшего порядка [8].

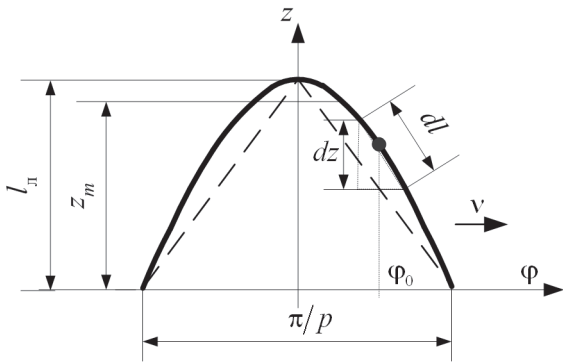


Рис. 2. Представление лобовой части обмотки для расчета ЭДС

Шаг обмотки в прямой части считаем диаметральной, как обычно принимается для коллекторных ЭМ постоянного тока. После преобразований аппроксимирующей зависимости для угла φ_0 , отсчитываемого от середины витка, получим

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2p} k \sqrt{1 - \frac{z}{l_n}}.$$

При скорости v взаимного перемещения проводника и поля ЭДС элемента dl проводника в лобовой части обмотки вычисляется по составляющей dz , перпендикулярной скорости, т. е. $de = B_{cp}^q v dz$. ЭДС $de_{вл}$ двух сторон витка в лобовой части при текущей координате φ середины витка запишется в виде

$$de_{вл} = v \sum_{n=1}^{\infty} S_n [\cos pn(\varphi + \varphi_0) - \cos pn(\varphi - \varphi_0)] dz.$$

ЭДС лобовой части витка найдем, проинтегрировав $de_{вл}$ на длине z_m ($0 \leq z_m \leq l_n$) распространения магнитного поля в зону лобовых частей (рис. 2):

$$E_{вл} = -2vl_n \sum_{n=1}^{\infty} S_n I_n \sin pn\varphi,$$

где $I_n = \int_0^{z_m} \sin\left(\frac{\pi n}{2} \sqrt{1 - z'}\right) dz'$; $z' = \frac{z}{l_n}$ – относительная координата.

Учитывая, что для прямой части обмотки $\varphi_0 = \frac{\pi}{2p}$, получаем ЭДС элемента l_n прямой части

$$E_{вл} = -2vl_n \sum_{n=1}^{\infty} S_n \sin \frac{\pi n}{2} \sin pn\varphi.$$

Максимального значения $E_{вл}$ достигает при $\varphi = \frac{\pi}{2p}$, когда стороны витка располагаются по осям полюсов. Примем это значение за базовое:

$$E_{вл0} = -2vl_n \sum_{n=1}^{\infty} S_n.$$

Считая витки обмотки якоря равномерно распределенными по углу φ , ЭДС последовательно соединенных витков на полюсном делении запишем в виде

$$E_t = \frac{p w_t}{\pi} \int_0^{\pi/p} E_w d\varphi. \text{ Тогда для прямой части}$$

$$E_{тл} = -\frac{4}{\pi} v l_n w_t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} S_n \sin \frac{\pi n}{2}; \quad E_{t0} = -2v l_n w_t \sum_{n=1}^{\infty} S_n;$$

для лобовой части

$$E_{тл} = -\frac{4}{\pi} v l_n w_t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} S_n I_n.$$

Для общего представления введем относительные параметры при длине элемента l_n прямой части, равной активной длине z_m лобовой части: относительную ЭДС витка $E'_w = \frac{E_w}{E_{вл0}}$ и обмотки

на полюсном делении $E'_t = \frac{E_t}{E_{t0}}$, коэффициент

использования лобовой части $k_u = \frac{E_{тл}}{E_{тл0}}$:

$$E'_{вл} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} S_n \sin \frac{\pi n}{2} \sin pn\varphi}{\sum_{n=1}^{\infty} S_n}; \quad E'_{вл} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} S_n I_n \sin pn\varphi}{z'_m \sum_{n=1}^{\infty} S_n};$$

$$E'_{тл} = \frac{2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} S_n \sin \frac{\pi n}{2}}{\sum_{n=1}^{\infty} S_n}; \quad E'_{тл} = \frac{2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} S_n I_n}{z'_m \sum_{n=1}^{\infty} S_n};$$

$$k_u = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} S_n I_n}{z'_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} S_n \sin \frac{\pi n}{2}}.$$

Провести исчерпывающий анализ рассматриваемых ЭМ по полученной математической модели из-за большого числа варьируемых параметров (тип якоря, форма лобовой части, радиальные размеры немагнитного зазора и обмотки якоря, раз-

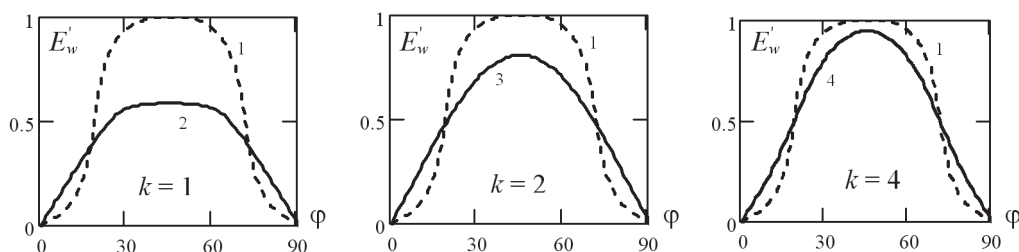


Рис. 3. ЭДС: 1) прямой ($E'_{\text{вл}}$) и 2–4) лобовой ($E'_{\text{вл}}$) частей обмотки

меры и свойства ПМ и др.) не представляется возможным, поэтому ограничимся частным примером двигателя с гладким якорем ДПУ170 [8] (при замене системы возбуждения с тангенциальной на радиальную). Размеры активной части (в сантиметрах): $r_1=r_2=r_3=r_4=2,71$; $r_5=2,725$; $r_6=2,955$; $r_8=2,97$; $r_9=3,01$; $r_{10}=r_{11}=4,01$; $\varphi_1=0$; $\varphi_2=26^\circ$; $p=2$; $l_n=2,8$; $l_n=16,8$.

Результаты расчетов при $z'_m=1$ показаны на рис. 3, а зависимости коэффициента использования k_n от активной длины лобовой части z_m и степени k аппроксимирующей ее параболы представлены на рис. 4.

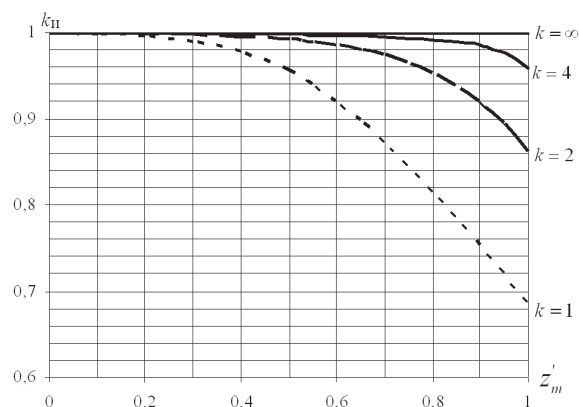


Рис. 4. Коэффициент использования лобовой части обмотки

В рассматриваемом двигателе форма лобовых частей обмотки близка к треугольной, поэтому две

лобовые части (общей длиной 5,6 см) при коэффициенте использования 0,688 ($k=1$) эквивалентны по развиваемой мощности 3,8 см прямой части, т. е. длину якоря можно сократить с 22,4 см (l_n+2l_n) до 18,6 см при одновременном увеличении длины индуктора с 16,8 до 18,6 см. Это приведет к снижению момента инерции (с учетом неизменной массы коллектора) примерно на 10 %, уменьшению активного сопротивления якоря, потере в меди и улучшению теплового состояния. Использование лобовых частей обмотки эквивалентно увеличению мощности при неизменных габаритах машины.

Выводы

1. Получены аналитические выражения для расчета магнитного поля малоинерционных магнитоэлектрических машин, позволяющие находить ЭДС возбуждения в прямой и лобовых частях обмотки якоря.
2. Исследование магнитоэлектрических машин с активными лобовыми частями является основой для их оптимизации, что позволяет снизить массогабаритные показатели. Улучшение использования активного объема машин достигается за счет приближения формы лобовой части обмотки к прямоугольной.

Рекомендовано для публикации Оргкомитетом V Юбилейной Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», посвященной памяти Г.А. Сипайлова, г. Томск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанский В.М. Беспазовые электродвигатели малой мощности: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1970. – 304 с.
2. Электрические двигатели с гладким якорем для систем автоматизации / под ред. Ю.К. Васильева. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
3. Гейнц Э.Р., Коков Е.Г. Использование объема лобовых соединений обмотки якоря в электрических машинах постоянного тока // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. / под ред. А.И. Чернышева. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 239–249.
4. Коков Е.Г., Жибинов А.С., Гейнц Э.Р. ЭДС якорной обмотки в магнитоэлектрических машинах с активными лобовыми частями // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. / под ред. В.Н. Глушченко. – Томск: Изд-во НТЛ, 2011. – С. 273–281.
5. Коков Е.Г., Жибинов А.С., Гейнц Э.Р. Поля возбуждения и реакции якоря в машинах с постоянными магнитами и якорной обмоткой в воздушном зазоре // Электромеханические преоб-

- разователи энергии: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 2009. – С. 45–48.
6. Коков Е.Г., Жибинов А.С., Гейнц Э.Р. Поля возбуждения и реакции якоря магнитоэлектрических машин с шихтованным сердечником // Электромеханические преобразователи энергии: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Томск, 2009. – С. 48–52.
7. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
8. Братковский О.А., Судов В.Б., Руссков В.В. Электродвигатель с беспазовым якорем для следящего привода // Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства: Сб. науч. трудов НПО «Полус» / под ред. П.В. Голубева и А.И. Чернышева. – Томск, 1992. – Т. 2. Проектирование и технология электрических машин и приборов. – С. 155–158.

Поступила 23.12.2011 г.