

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЯВНОПОЛЮСНЫМ И НЕЯВНОПОЛЮСНЫМ ЯКОРЯМИ

А.Б. Захаренко, В.М. Чернухин
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Анализ магнитного поля, проведенный методом конечных элементов, и расчет характеристик коллекторного электрического двигателя постоянного тока с явнополюсным якорем позволили сравнить показатели этой машины с традиционной. В результате удалось создать достаточно технологичную и надежную машину с хорошим процессом коммутации, удовлетворительным КПД при малых пульсациях электромагнитного момента.

Ключевые слова: коллекторная электрическая машина постоянного тока, явнополюсный якорь, сосредоточенная обмотка, распределенная обмотка.

Введение. Электрические машины постоянного тока применяются для регулируемого в широких пределах привода: электроинструмента, тяговых машин электротранспорта и др. Традиционно для этой цели применяются машины с неявнополюсными якорями и распределенной обмоткой якоря. Однако электрические машины с явнополюсными якорями (ЭМЯЯ) и сосредоточенной на полюсах катушечной обмоткой обладают преимуществами перед машинами с распределенной обмоткой.

Обмотка, состоящая из катушек, каждая из которых сосредоточена на соответствующем явно выраженном полюсе, по сравнению с распределенной обмоткой является более технологичной и надежной, обладает повышенным коэффициентом заполнения пространства между полюсами (паза) якоря. Упорядоченная намотка позволяет увеличить теплопроводность катушки и улучшить её охлаждение. За счет этого плотность тока в обмотке якоря может быть повышена на 10 – 15%.

Лобовые части сосредоточенной катушечной обмотки имеют меньшую длину и вылет, благодаря чему снижается расход обмоточной меди и поток лобового рассеяния. В ряде случаев за счет малого вылета лобовых частей можно весьма существенно сократить длину машины.

К недостаткам явнополюсных машин следует отнести более высокие потери от высших гармоник и наличие пульсаций электромагнитного момента.

Для детального анализа преимуществ и недостатков ЭМЯЯ выполним расчет их магнитного поля и сравним полученные характеристики с характеристиками неявнополюсных машин.

Метод анализа. Анализ магнитного поля необходимо провести с приемлемой точностью. С этой целью в настоящее время широко применяются численные методы анализа. На основе метода ко-

нечных элементов (МКЭ) создан целый ряд прикладных программ, поэтому его применение представляется оправданным. К недостаткам МКЭ относятся высокие требования к ресурсам компьютера и/или достаточно большое время, необходимое для расчета. Избежать упомянутых недостатков можно, применяя разновидность МКЭ – метод конечных суперэлементов. При этом в качестве базисных функций суперэлементов активной части электрической машины могут быть выбраны магнитные потоки [1] или магнитные проводимости [2].

Рассмотрим алгоритм применения метода конечных элементов для расчета характеристик ЭМЯЯ. Исходными данными являются зависимости тока или МДС обмотки якоря от угла поворота ротора [$i = f(\gamma)$ или $i_w = f(\gamma)$], геометрия машины и характеристики применяемых магнитных, обмоточных и изоляционных материалов. Сначала проводится анализ магнитного поля машины с учетом МДС обмоток возбуждения и якоря для ряда углов поворота ротора относительно статора. В результате находится зависимость потокосцеплений и ЭДС катушек обмотки якоря от угла поворота ротора [$\psi = f(\gamma)$ и $e = f(\gamma)$]. Произведение зависимостей $i = f(\gamma)$ и $e = f(\gamma)$ позволяет найти электромагнитную мощность и оценить пульсации электромагнитного момента. Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора может быть также рассчитана непосредственно методом конечных элементов. По найденным характеристикам определяются энергетические показатели, при необходимости проводится анализ теплового состояния машины.

Сравнительный анализ коллекторных электрических машин постоянного тока с неявнополюсным и явнополюсным якорями. Рассмотрим серийно выпускаемый коллекторный электрический двигатель постоянного тока СЛ-621 с распре-

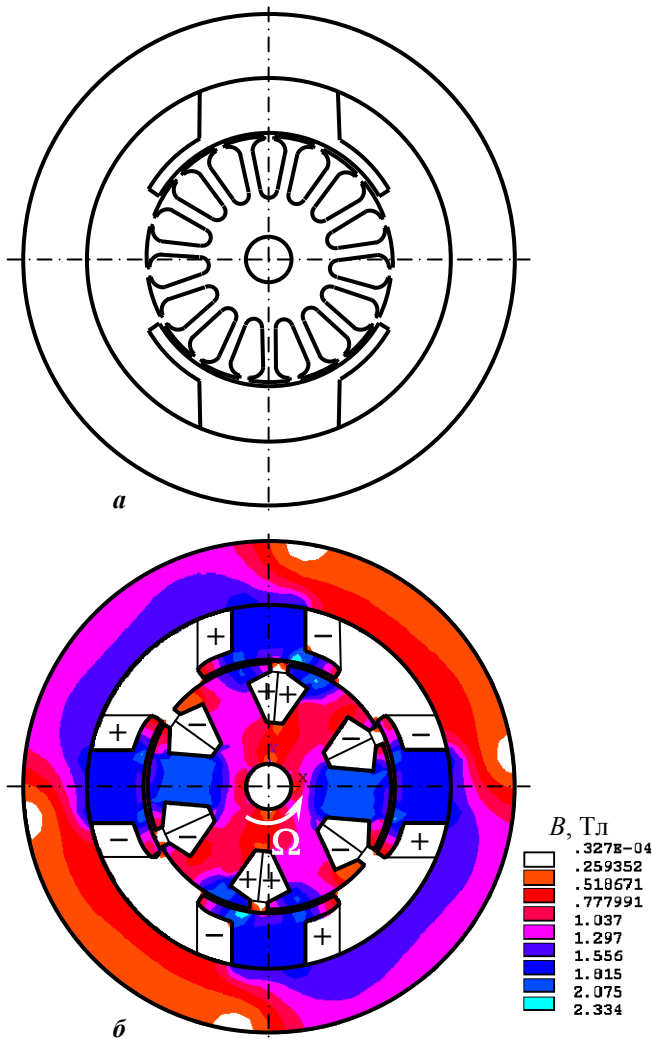


Рис. 1. Эскиз поперечного сечения активной части машины СЛ-621 (а) и распределение индукции аналога с явнополюсным якорем в режиме нагрузки при угле поворота индуктора 5° (б)

делённой обмоткой на внутреннем вращающемся якоре с числом зубцов $Z_R = 15$ (рис. 1, а) и с числом полюсов индуктора $2p = 2$. Внешний диаметр индуктора $D_a = 130$ мм, активная длина $l_\delta = 60$ мм. В тех же габаритах выполнен вновь разработанный электрический двигатель с явнополюсным якорем с числом полюсов якоря $Z_R = 6$ и индуктором с числом полюсов $2p = 4$ (рис. 1, б), оптимизированный согласно [3]. Сердечник якоря и полюса индуктора выполнены из листов электротехнической стали 2013 у серийного двигателя, и 2212 у вновь разработанного, ярмо индуктора выполнено в обоих вариантах из массива конструкционной стали 10.

Расчетная модель выполнена как двумерная, разбита неравномерной сеткой 8-узловых криволинейных четырехугольников на примерно 3500 конечных элементов. Проведён расчет магнитного поля для ряда положений ротора относительно ста-

тора. Пример распределения индукции в поперечном сечении машины с явнополюсным якорем приведён на рис. 1, б для режима нагрузки, когда плотность тока в обмотке возбуждения составила 5 А/мм^2 , а в обмотке якоря $3,6 \text{ А/мм}^2$. Направления токов в катушках обмоток обозначены на рис. 1, б знаками + и -, катушки с неуказанными направлениями токов коммутируются при данном положении ротора относительно статора. Зависимость тока якоря от угла поворота ротора в относительных единицах приведена на рис. 2, за базовое значение принято амплитудное значение тока.

Аналогичным образом построена расчетная модель для двигателя с неявнополюсным якорем.

В результате рассмотрения ряда положений ротора относительно статора, были рассчитаны зависимости потокосцеплений для холостого хода и режима нагрузки от угла поворота ротора $\psi = f(\gamma)$. При этом нулевой угол соответствует совпадению оси полюса якоря с осью полюса индуктора. Расчеты потокосцеплений были проведены в относительных единицах, где за базовое значение принято максимальное значение потокосцепления $\Psi_{\max} = 190 \text{ мВб}$. С учетом цикличности работы машины полученные результаты могут быть применены для анализа при любых углах γ , а не только для значений $0 \leq \gamma \leq \pi$, как показано на рис. 2. Для режима нагрузки в результате численного дифференцирования зависимости $\psi = f(\gamma)$, согласно закону электромагнитной индукции, была получена зависимость $e = f(\gamma)$.

Полученная зависимость потокосцепления от угла поворота ротора была разложена в ряд Фурье с коэффициентами, согласно [4]:

$$\psi(\gamma) = a_0 + a_1 \sin(\gamma) + b_1 \cos(\gamma) + a_2 \sin(2\gamma) + b_2 \cos(2\gamma) + \dots + a_v \sin(v\gamma) + b_v \cos(v\gamma) + \dots;$$

$$a_v = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\gamma) \sin(v\gamma) d\gamma; \quad (1)$$

$$b_v = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \psi(\gamma) \cos(v\gamma) d\gamma, \quad (2)$$

где при численном анализе интегралы в формулах (1) и (2) заменяются конечными суммами. Коэффициенты разложения для первых 10-ти гармоник потокосцепления в режиме нагрузки приведены в таблице. При холостом ходе кривая потокосцепления близка к косинусоиду. Коэффициенты разложения для ЭДС могут быть найдены произведением коэффициентов разложения для потокосцепления и номера гармоники.

Значения коэффициентов разложения в ряд Фурье для зависимости потокоосцепления от угла поворота ротора

| ν | a_ν | b_ν |
|-------|---------|---------|
| 1 | -0,0612 | 0,9971 |
| 2 | 0,0174 | 0,0196 |
| 3 | 0,0066 | 0,0074 |
| 4 | 0,0016 | 0,0011 |
| 5 | 0,0036 | -0,0006 |
| 6 | 0,0001 | 0,0009 |
| 7 | 0,0020 | -0,0014 |
| 8 | 0,0003 | 0,0010 |
| 9 | 0,0010 | -0,0012 |
| 10 | 0,0005 | 0,0006 |

Из анализа результатов, полученных для холостого хода и нагрузки, вытекает, что реакция якоря оказывает существенное (до 30%) влияние на потокоосцепление обмотки. Следует отметить, что при сдвиге щеток с геометрической нейтрали на физическую против вращения ротора в режиме электрического двигателя на угол равный 8,1 эл. град. (рис. 2), реактивная ЭДС в коммутируемой секции электрической машины с явнополюсным якорем уменьшилась на 3% по сравнению с реактивной ЭДС аналогичной машины с распределённой обмоткой.

С целью получения зависимости электромагнитного момента $m = f(\gamma)$ от угла поворота ротора (рис. 2) для электрического двигателя с явнополюсным якорем функции для каждой фазы обмотки якоря $e = f(\gamma)$ и $i = f(\gamma)$ были численно перемножены, сложены с аналогичными функциями для других фаз, результат отнесен к величине частоты вращения. При построении функции $m = f(\gamma)$ в относительных единицах за базовое значение принято амплитудное значение электромагнитного момента. Величина пульсации электромагнитного момента двигателя от среднего значения составила около 4%, что вполне удовлетворительно.

Рассмотрим пространственное распределение индукции в воздушном зазоре B_δ при совпадении осей полюса индуктора и паза якоря для машин с явнополюсным и неявнополюсным якорями (рис. 3). При близкой площади пазов якоря, занимаемой обмоткой, в неявнополюсной машине большая доля занята изоляцией, что приводит к необходимости снижения суммарной площади активной стали якоря и её насыщению. Поэтому в машине с явнополюсным якорем удается достичь увеличения максимальной индукции в зазоре на 35 – 40%.

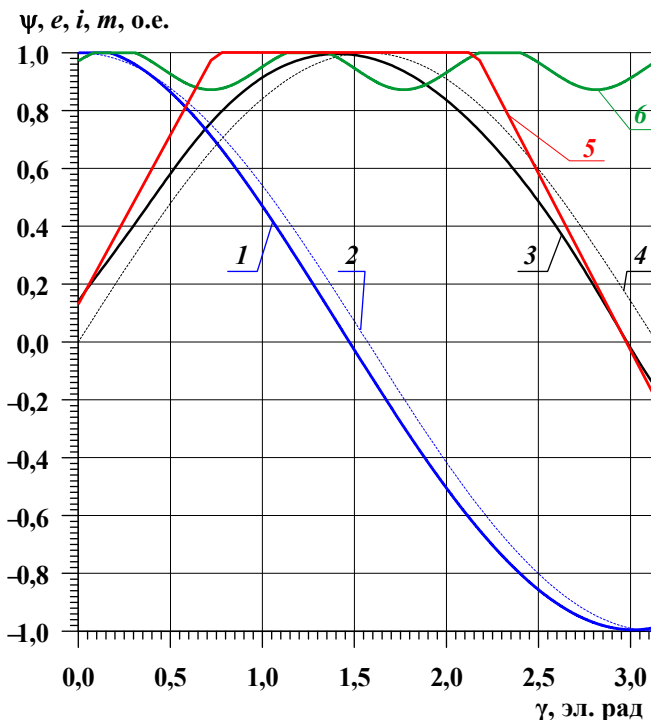


Рис. 2. Расчетные зависимости потокоосцепления ψ , ЭДС e и тока i фазы обмотки якоря, а также суммарного электромагнитного момента m от угла поворота ротора γ для машины с явнополюсным якорем: 1 – зависимость $\psi(\gamma)$ в режиме нагрузки; 2 – зависимость $\psi(\gamma)$ в режиме холостого хода; 3 – зависимость $e(\gamma)$ в режиме нагрузки; 4 – зависимость $e(\gamma)$ в режиме холостого хода; 5 – зависимость $i(\gamma)$; 6 – зависимость $m(\gamma)$

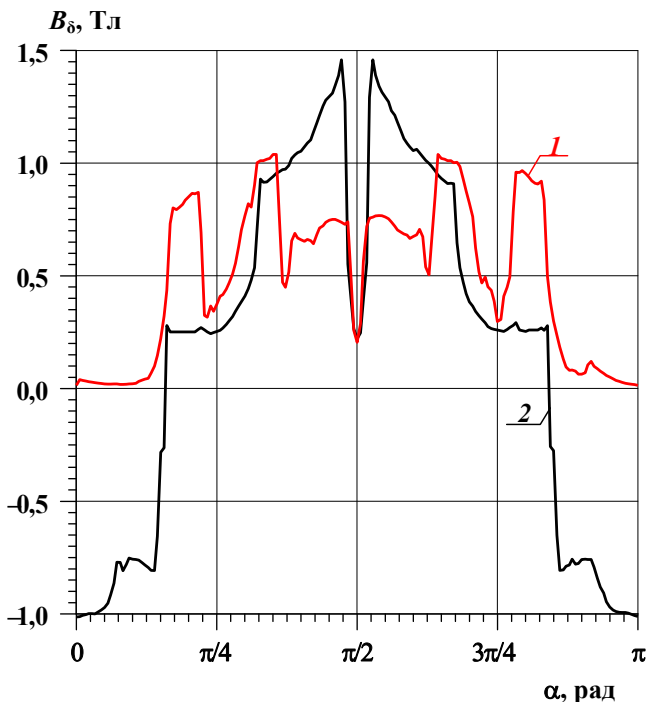


Рис. 3. Пространственное распределение индукции в воздушном зазоре B_δ при совпадении осей полюса индуктора и паза якоря для машин: с неявнополюсным якорем 1, с явнополюсным якорем 2

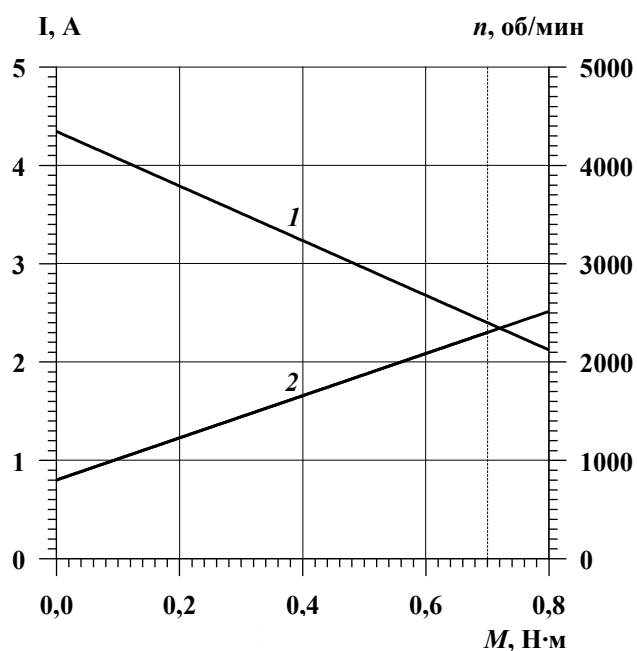


Рис. 4. Электромеханические характеристики двигателя с явнополюсным якорем: 1 – зависимость частоты вращения от момента на валу $n(M)$, 2 – зависимость тока якоря от момента на валу $I(M)$

Электромеханические характеристики коллекторного электрического двигателя с явнополюсным якорем приведены на рис. 4. Номинальный

режим с током якоря 2,3 А, частотой вращения 2400 об/мин и моментом на валу 0,7 Н·м практически соответствует паспортизованному номинальному режиму серийно выпускаемой машины с неявнополюсным якорем. А это значит, что и КПД обеих машин примерно одинаков.

Вывод. Таким образом, удалось предложить достаточно технологичную и более надежную конструкцию коллекторного электрического двигателя постоянного тока с явнополюсным якорем, обладающую не худшим КПД по сравнению с традиционной конструкцией, хорошим процессом коммутации при малых (около 4%) пульсациях электромагнитного момента.

Литература

1. Применение метода конечных суперэлементов для расчета электромагнитного поля магнитоэлектрической машины / В.Я. Геча, А.Б. Захаренко // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – Т. 106. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008 – С. 19 – 23.
2. Расчет магнитной проводимости пазового рассеяния / А.Б. Захаренко // Электротехника. – 2009. – № 5. – С. 28 – 33.
3. Чернухин В.М. Коллекторная электрическая машина с полюсным якорем. Патент на изобретение РФ № 2 359 392. Опубликовано 20.06.2009, бюллетень № 17.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831 с., ил.

Поступила в редакцию 03.02.2010

Андрей Борисович Захаренко, д-р техн. наук, зам. начальника отдела, т. 8 (495) 366-26-44.
 Владимир Михайлович Чернухин, начальник сектора, т. 8 (495) 366-21-01.
 E-mail: vniiem@vniiem.ru.