



УДК 621.313.17

ГРЕБЕНИКОВ В.В.



ПРЬЙМАК М.В.

ГРЕБЕНИКОВ В.В., докт. тех. наук, вед. науч. сотр.,
ПРЬЙМАК М.В., инж. I кат.

Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

СПОСОБЫ УМЕНЬШАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ РАДИАЛЬНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Приведены результаты численного исследования способов уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами радиальной намагниченности. Показано, что применение ферромагнитных клиньев в пазах с небольшой магнитной проницаемостью ($\mu_{кл} \leq 30$) в сочетании с профилированием формы постоянных магнитов или полюсных наконечников над магнитами позволяют существенно уменьшить пульсации электромагнитного момента.

Электродвигатели с постоянными магнитами (ПМ) и зубцово-пазовым статором характеризуются большей величиной электромагнитного момента по сравнению с электрическими машинами, имеющими гладкий беспазовый статор. Однако их недостатком являются зубцово-пазовые пульсации, вызванные различными магнитными сопротивлениями областей пространства, расположенных вблизи зубцов и пазов. Для ветро- и гидроустановок малой мощности применяются электрогенераторы с ПМ [1, 2]. При зубцово-пазовом статоре в электрогенераторе тоже присутствуют пульсации электромагнитного момента. Эти пульсации генерируют набор высших гармонических составляющих, приводящих в конечном итоге к возникновению вибраций и шумов, отрицательно влияющих на долговечность подшипниковых узлов, а значит и надёжность электрогенераторов в целом.

Решению проблемы пульсаций момента посвящено много работ. Среди предложенных способов можно назвать как традиционные, давно используемые в машинах других типов, так и меры, характерные только для машин с постоянными магнитами. Один из них — это выполнение скосов полюсов на роторе или сдвиг магнитов на

роторе, который является весьма эффективным [3, 4]. Другим способом, позволяющим уменьшить величину пульсации электромагнитного момента, является профилирование ферромагнитных полюсов на роторе по определенному закону, а также размещение ферромагнитных клиньев с небольшой магнитной проницаемостью в пазах электрической машины [5]. На величину пульсаций момента в значительной мере влияет и форма постоянных магнитов [6].

Цель данной работы — численное исследование влияния формы магнитов с радиальной намагниченностью и формы полюсных наконечников, устанавливаемых над магнитами, а также проницаемости ферромагнитных клиньев на пульсации электромагнитного момента в электрических машинах с ПМ.

На Рис. 1 приведены размеры исследуемой модели электрической машины, ротор которой имеет восемь радиально намагниченных ПМ. В этой модели статор по размерам идентичен со статором асинхронного двигателя АИР90L8, имеющим внешний диаметр $D_a = 158$ мм, внутренний диаметр статора — $D_i = 104$ мм, число пазов $Z_p = 48$ и высоту пазов $h = 14,2$ мм, длину активной части сердечника — $l_{Fe} = 100$ мм. Ферромагнитные клинья в пазах статора имеют толщину $h_{кл} = 1$ мм. Величина воздушного зазора между статором и ротором равна $\delta = 1$ мм. При исследованиях влияния конфигурации магнитной системы на пульсации электромагнитного момента варьировалась глубина профиля магнитов h (разность между максимальным и минимальным расстоянием от центра ротора до наружной поверхности ПМ) и магнитная проницаемость ферромагнитных клиньев. Количество ПМ в роторе — 8.

Было исследовано пять моделей, каждая из которых имеет свой наружный радиус магнитов. В модели **РРМ0** (Рис. 2) наружный радиус магнитов

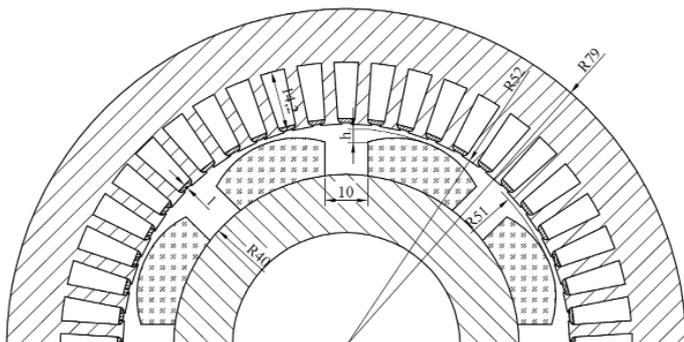


Рис. 1. Размеры магнитной системы электрической машины с радиальной намагниченностью постоянных магнитов.

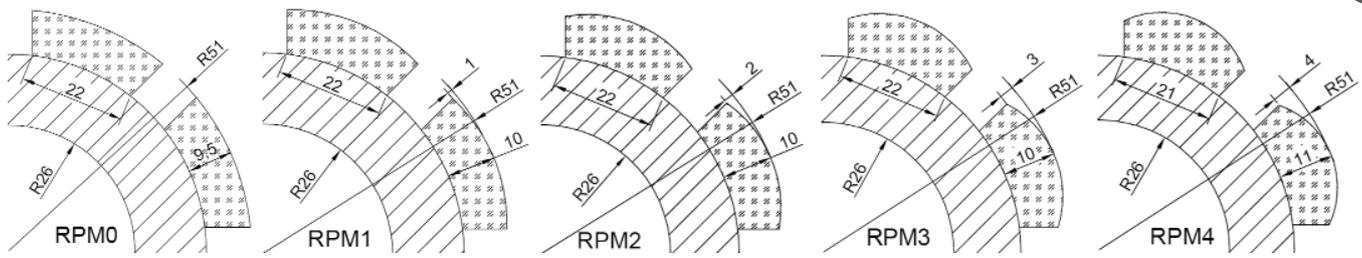


Рис. 2. Конфігурація ротора з різницею глибини профілювання магнітів.

равен наружному радиусу ротора, глубина профиля магнитов в этом случае равна $h = 0$ мм, в модели **RPM1** глубина профиля равна $h = 1$ мм, в модели **RPM2** — $h = 2$ мм, в модели **RPM3** — $h = 3$ мм и в модели **RPM4** — $h = 4$ мм. Во всех моделях площадь поперечного сечения магнитов одинакова и составляет $S_{\text{ПМ}} = 250 \text{ мм}^2$, т. е. масса одного магнита составляет $m_{\text{ПМ}} = 187.5$ гр. Расстояние между магнитами также во всех исследуемых моделях одинаково и равно 10 мм.

Во всех расчетах коэрцитивная сила ПМ задавалась равной $H_{\text{св}} = 950$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 1.25$ Тл, магнитная проницаемость магнитов принята равной — $\mu_{\text{ПМ}} = 1.04$, магнитопровод статора — сталь СТ2211 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); магнитопровод ротора — конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности кривой намагничивания стали); в режиме двигателя фазы статора включаются следующим образом А(+), В(-), С(0); Плотность тока задана равной $J_r = 5,0$ А/мм², а коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_s = 0,5$. Все расчеты проводились в программном комплексе ELCUT 5.6.

На Рис. 3 приведены зависимости крутящего момента от положения ротора $M = f(\theta)$ для исследуемых моделей электродвигателей с ПМ. Электромагнитный момент для 8-ми полюсных двигателей изменяется с периодом 45° и имеет нулевое значение в положении устойчивого магнитного равновесия — ось d (это положение принято за начальное — $\theta = 0^\circ$), второе нулевое значение момента находится в положении неустойчивого магнитного равновесия — ось q ($\theta = 45^\circ$). Для каждой из моделей расчет производился для нескольких значений магнитной проницаемости клиньев. Кривая RPM0_mu1 соответствует модели **RPM0**, в которой магнитная проницаемость клиньев $\mu_{\text{кл}} = 1$, соответственно RPM0_mu10 — $\mu_{\text{кл}} = 10$, RPM0_mu20 — $\mu_{\text{кл}} = 20$, RPM0_mu30 — $\mu_{\text{кл}} = 30$.

При анализе моментных ха-

рактеристик определялись значения максимального M_{max} , минимального M_{min} и среднего $M_{\text{ср}}$ электромагнитного момента. Эти значения определялись для зоны коммутации, которая для 8-ми полюсной электрической машины составляет 45° (от 15° до 30° по Рис. 3). Для количественной оценки пульсаций электромагнитного момента производился расчет коэффициентов пульсации, которые определялись для зоны коммутации. Поскольку в литературе встречаются различные формулы для расчета коэффициента пульсации, в данной работе эти коэффициенты были рассчитаны по двум формулам:

$$k_{n1} = \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{2M_{\text{ср}}}; \quad k_{n2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - M_{\text{ср}})^2}{n M_{\text{ср}}^2}}$$

Коэффициент k_{n1} — это разница между максимальным и минимальным значением отнесенным к двойному среднему, а k_{n2} — это квадратный корень из дисперсии отнесенный к среднему значению.

Анализируя моментные характеристики исследуемых моделей, следует отметить, что для всех моделей наблюдаются существенные пульсации электромагнитного момента. Однако пульсации уменьшаться пропорционально магнитной проницаемости клиньев.

Коэффициенты пульсации и среднее значение электромагнитного момента при различных значениях проницаемости клиньев приведены в

Таблица 1.

$\mu_{\text{кл}}$	$K_{\text{П1}}$	$K_{\text{П2}}$	$M_{\text{ср}}$, НМ
1	26.42%	16.49%	22.25
10	17.32%	11.32%	21.73
20	14.15%	9.38%	21.37
30	12.80%	8.48%	21.14

Таблица 2.

Модель	k_{n1}	k_{n2}	$M_{\text{ср}}$	M_{max}	M_{min}	$M_{\text{max}} - M_{\text{min}}$
RPM0_mu30	12.80%	8.48%	21.14	23.90	18.49	5.41
RPM1_mu30	8.39%	5.16%	20.63	21.99	18.53	3.46
RPM2_mu30	8.75%	5.38%	20.11	21.35	17.83	3.52
RPM3_mu30	9.56%	6.14%	19.54	20.93	17.20	3.74
RPM4_mu30	10.21%	6.48%	19.06	20.63	16.73	3.89

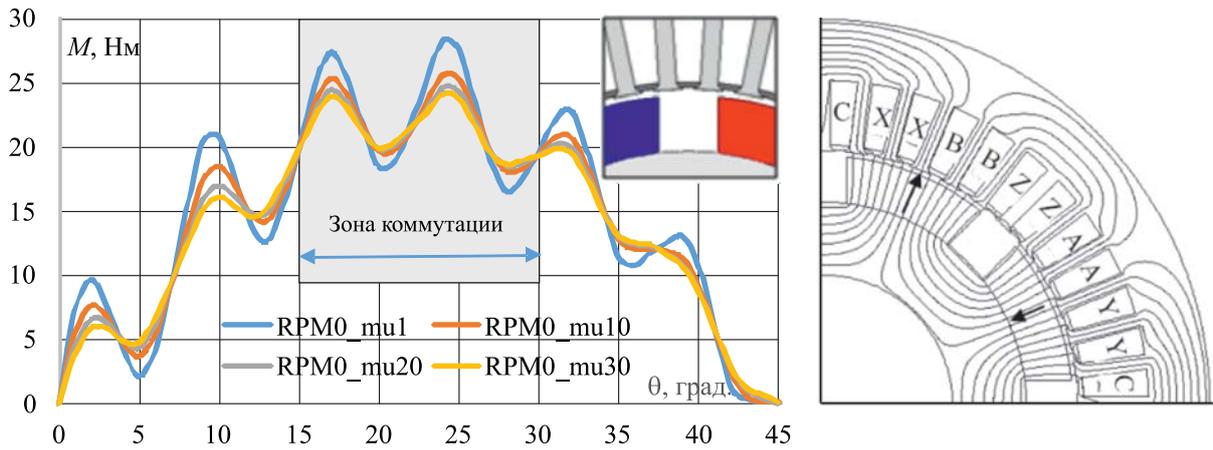


Рис. 3. Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора и магнитной проницаемости клиньев статора при глубине профиля магнитов $h = 0$ мм.

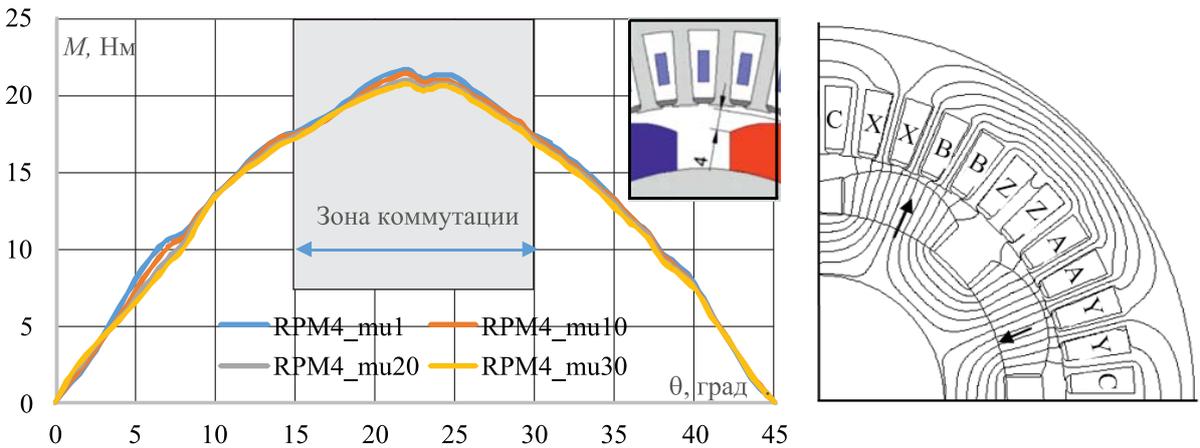


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора и магнитной проницаемости клиньев статора при глубине профиля магнитов $h = 4$ мм.

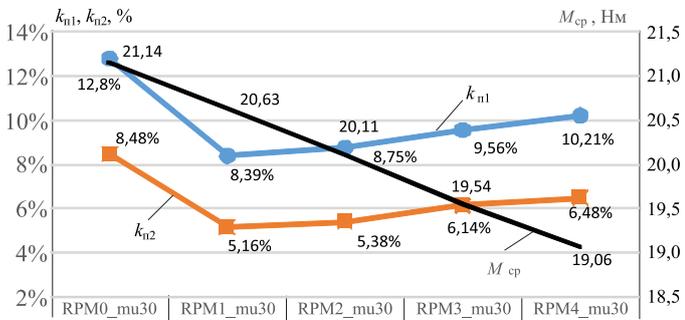


Рис. 5. Сравнение коэффициентов пульсации электромагнитного момента для исследуемых моделей с радиальной намагниченностью ПМ.

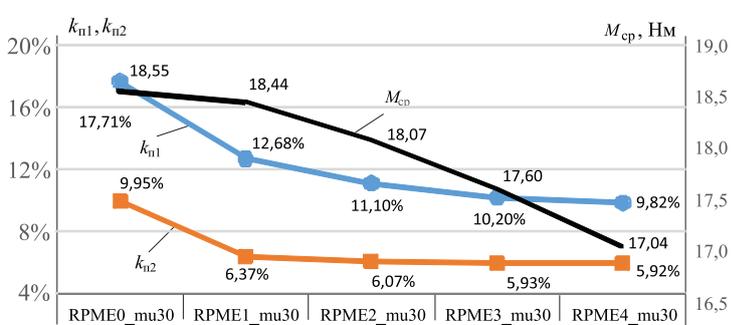


Рис. 8. Сравнение коэффициентов пульсации электромагнитного момента для моделей с полюсными наконечниками над ПМ.

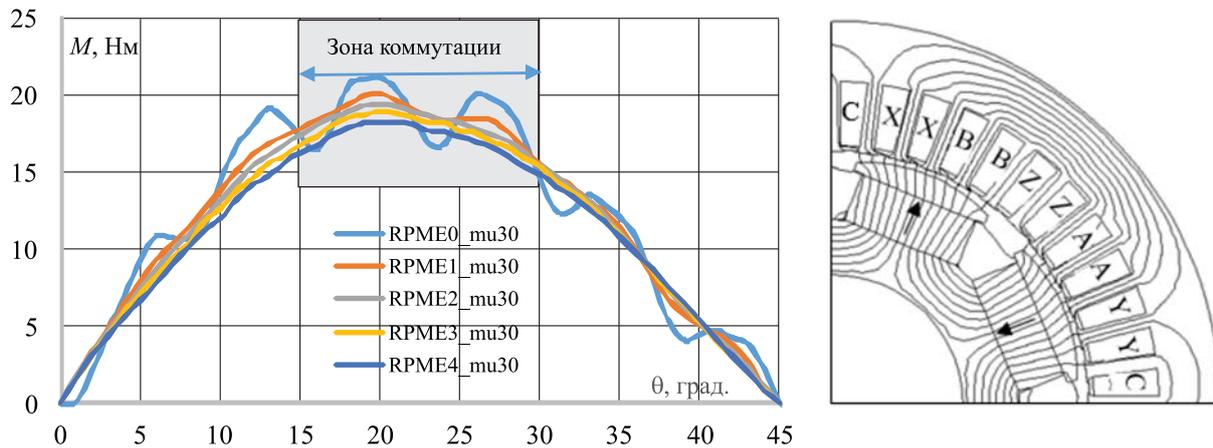


Рис. 7. Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для моделей с различной глубиной профилирования полюсных наконечников.

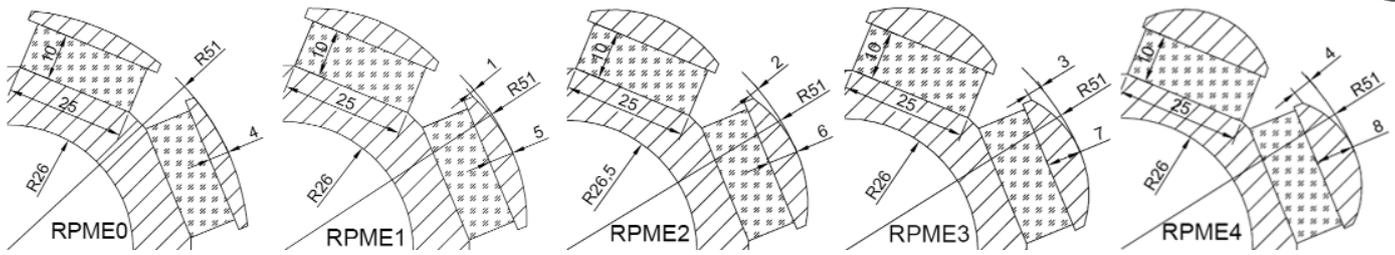


Рис. 6. Конфигурация ротора с различной глубиной профилирования полюсных наконечников.

Табл. 1. При изменении проницаемости клиньев от $\mu_{\text{кл}} = 1$ (клинья из немагнитного материала) до $\mu_{\text{кл}} = 30$ коэффициенты пульсации $k_{\text{п1}}$ и $k_{\text{п2}}$ уменьшаются примерно в 2 раза, но при этом уменьшается и среднее значение электромагнитного момента от $M_{\text{ср}} = 22.25$ Нм при $\mu_{\text{кл}} = 1$ до $M_{\text{ср}} = 21.14$ Нм при $\mu_{\text{кл}} = 30$, т. е. примерно на 5 %. Таким образом использование ферромагнитных клиньев является эффективным способом уменьшения пульсаций электромагнитного момента.

На Рис. 3 справа показана картина магнитного поля для случая, когда ротор относительно включенных фаз находится в положении максимума электромагнитного момента, т. е. посередине между осям d и q , (направление намагниченности ПМ показаны стрелками), фазы включены следующим образом А(+), В(-), С(0).

Уменьшение пульсаций электромагнитного момента путем профилирования или изменения формы постоянных магнитов иллюстрируется Рис. 4. На этом рисунке приведена зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для электрической машины, ротор которой имеет магниты с глубиной профилирования равной $h = 4$ мм. Как видно из этого графика пульсации электромагнитного момента в зоне коммутации существенно ниже для всех значений проницаемости ферромагнитных клиньев.

Для этой конфигурации магнитной системы коэффициенты пульсации при $\mu_{\text{кл}} = 30$ соответственно равны $k_{\text{п1}} = 10.21\%$ и $k_{\text{п2}} = 6.48\%$. т. е. примерно в 1.3 раза меньше, чем для конфигурации магнитной системы с ротором, ПМ которого имеют глубину профилирования равную $h = 0$ мм и проницаемость клиньев $\mu_{\text{кл}} = 30$, однако среднее значение электромагнитного момента примерно на 10% меньше и составляет $M_{\text{ср}} = 19$ Нм.

В программном комплексе ELCUT 5.6 были проведены расчеты для всех пяти моделей, приведенных на Рис. 2 при вариации магнитной проницаемости клиньев от $\mu_{\text{кл}} = 1$ до $\mu_{\text{кл}} = 30$.

В Табл. 2 приведены расчетные значения параметров моделей, для которых получены наи-

меньшие значения коэффициентов пульсации. Следует отметить, что для всех моделей наименьшие значения коэффициентов пульсации получены для проницаемости клиньев раной $\mu_{\text{кл}} = 30$. Однако для больших значений $\mu_{\text{кл}}$ расчеты не проводились поскольку с увеличением проницаемости клиньев уменьшается средний электромагнитный момент, а значит и мощность электрической машины и поэтому применять клинья с проницаемостью $\mu_{\text{кл}} > 30$ не целесообразно. В результате расчетов определено, что наименьшие значения коэффициента пульсации получено для модели RPME1_μ30, т. е. (для этой модели $h = 1$ мм, $\mu_{\text{кл}} = 30$, в Табл. 2 расчетные параметры выделены жирным шрифтом).

На Рис. 5 приведены коэффициенты пульсации для пяти исследуемых моделей и значения среднего электромагнитного момента. Анализируя эти данные, следует отметить, что при отсутствии профилирования магнитов коэффициенты пульсации имеют наибольшие значения, оптимум получен при глубине профилирования магнитов равной $h = 1$ мм, дальнейшее увеличение глубины профиля магнитов приводит даже к незначительному увеличению пульсаций и к снижению среднего электромагнитного момента. Таким образом результаты моделирования иллюстрируют, что изменение формы магнитов существенно влияют на пульсации электромагнитного момента и на его среднее значение. Коэффициенты пульсации рассчитанные по двум формулам отличаются по абсолютному значению, однако характер изменения в зависимости от магнитной проницаемости клиньев и глубины профилирования магнитов совершенно идентичен. Ввиду того, что первая формула проще, можно рекомендовать определение коэффициента пульсации по данной формуле.

Таким образом изменение формы постоянных магнитов позволяет уменьшить пульсации электромагнитного момента, но удорожает стоимость магнитов из-за необходимости применения специальных форм для их изготовления, а значит, может быть рекомендовано при среднесерийном или крупносерийном производстве электрических машин.

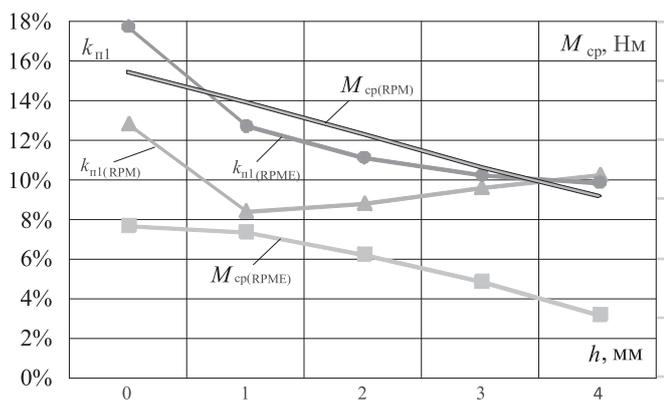


Рис. 9. Сравнение коэффициента пульсации и среднего электромагнитного момента.

Для мелкосерийного или единичного производства электрических машин можно рекомендовать другой способ уменьшения пульсаций момента. В такой конструкции постоянные магниты имеют прямоугольную форму и над ними размещены полюсные наконечники, на немагнитных стойках [7]. На Рис. 6 показана пять моделей, у которых форма и размеры полюсных наконечников различна (стойки для крепления полюсных наконечников не показаны).

Как и для моделей (Рис. 2) каждая из исследуемых моделей имеет свой радиус наружной поверхности полюсных наконечников.

В модели **RPME0** наружный радиус полюсных наконечников равен наружному радиусу ротора, глубина профиля магнитов в этом случае равна $h = 0$ мм, в модели **RPME1** глубина профиля ферромагнитных наконечников равна $h = 1$ мм, в модели **RPME2** — $h = 2$ мм, в модели **RPME3** — $h = 3$ мм и в модели **RPME4** — $h = 4$ мм. Во всех моделях площадь поперечного сечения магнитов одинакова и составляет $S_{ПМ} = 250$ мм². Таким образом при равной массе ПМ глубина профилирования и соответственно форма полюсных наконечников полностью соответствует форме магнитов моделей, рассмотренных выше.

Также, как и для моделей (Рис. 2) расчет производился для нескольких значений магнитной проницаемости клиньев. На Рис. 7 приведены зависимости крутящего момента от положения ротора $M = f(\theta)$ для исследуемых моделей электрических машин с различной формой полюсных наконечников при магнитной проницаемости клиньев $\mu_{кл} = 30$. Кривая **RPME0_μ30** соответствует модели **RPME0**, в которой глубина профилирования полюсных наконечников равна $h = 0$ мм, соответственно **RPME1_μ30** — $h = 1$ мм, **RPME2_μ30** — $h = 2$ мм, **RPME3_μ30** — $h = 3$ мм и **RPME4_μ30** — $h = 4$ мм. На Рис. 7 справа показана картина магнитного поля для одного из поло-

жений ротора относительно статора. Картина поля приведена для следующих условий: $\mu_{кл} = 30$, фазы статора включены следующим образом А(+), В(-), С(0), плотность тока в обмотках $J_r = 5,0$ А/мм², а коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_3 = 0,5$.

Анализируя эти кривые следует отметить, что при глубине профилирования $h = 0$ мм наблюдаются существенные пульсации электромагнитного момента, однако с увеличением глубины профилирования пульсации электромагнитного момента снижаются примерно в 1.7 раза, при этом средний электромагнитный момент уменьшается примерно на 10%.

На Рис. 8 приведены графики изменения коэффициентов пульсации и среднего электромагнитного момента для моделей с полюсными наконечниками над внешней поверхностью магнитов. Следует подчеркнуть, что характер изменения коэффициентов пульсации k_{n1} и k_{n2} одинаков во всем диапазоне изменения глубины профилирования полюсных наконечников и поэтому, также, как и для моделей с различной формой ПМ можно рекомендовать применение для расчета этого коэффициента первую формулу. При изменении глубины профилирования в диапазоне $h = 1-4$ мм коэффициенты пульсации практически не изменяются, но среднее значение электромагнитного момента уменьшается практически пропорционально глубине профилирования, поэтому оптимальным значением глубины профилирования следует принять $h = 1$ мм (также, как и для моделей с различной формой ПМ).

На Рис. 9 приведен результирующий график изменения коэффициента пульсации k_{n1} и среднего электромагнитного момента в зависимости от глубины профилирования ПМ и соответственно от глубины профилирования полюсных наконечников.

Минимальное значение коэффициента пульсации для моделей с различной формой ПМ получено при глубине профилирования магнитов равной $h = 1$ мм, среднее значение электромагнитного момента равно при этом $M_{cp}(RPM) = 20.63$ Нм, а коэффициент пульсации равен $k_{n1} = 8.39\%$. Для альтернативного варианта с различной формой полюсных наконечников, располагаемых над ПМ прямоугольной формы, оптимальное значение коэффициента пульсации равно $k_{n1} = 12.68\%$ получено также при глубине профилирования $h = 1$ мм, среднее значение электромагнитного момента равно при этом $M_{cp}(RPM) = 18,44$ Нм.

**Выводы:**

1. Применение клиньев с небольшой магнитной проницаемостью ($\mu_{\text{кл}} \leq 30$) в пазах электрической машины с зубцово-пазовым статором в сочетании с профилированием формы постоянных магнитов позволяют существенным образом уменьшить пульсации электромагнитного момента (примерно в 1.5 раза).

2. Альтернативным способом уменьшения пульсаций электромагнитного момента — это применение клиньев в сочетании с профилированием формы полюсных наконечников, располагаемых над магнитами прямоугольной формы, при этом средний электромагнитный момент при той же массе магнитов у этого способа примерно на 12 %, меньше, чем у способа с профилированием постоянных магнитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребеников В.В., Шымчак П.П., Прыймак М.В. Исследование электрогенератора с постоянными магнитами для малой ветро- и гидроэнергетики // Гидроэнергетика Украины. — 2012. — № 3. — С. 40–45.
2. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костоков И.Ю. Ветроустановка малой мощности — К: Наук. думка, 2011. — 591 с.
3. Радимов И.Н., В.В. Рымиша, М.В. Гульий, З.П. Процына, Чан Тхи Тху Хыонг. Разработка вентильных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины // Електротехніка і електромеханіка. — 2008. — № 1. — С. 41–44.
4. Lee G. H., Choi W. C., Kim S.I., Kwon S.O., Hong J.P. Torque ripple minimization control of permanent magnet synchronous motors for eps applications // International Journal of Automotive Technology. — 2011. — Vol. 12. — No. 2. — P. 291–297.
5. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами и зубцово-пазовым статором. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. ІЕД НАН України. — К: — 2010. — Вип. 27. — С. 52–58.
6. Ping Zheng, Jing Zhao, Jianqun Han, Jie Wang, Zhiyuan, Ranran Liu. Optimization of the Magnetic Pole Shape of a Permanent-Magnet Synchronous Motor // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. — 2007. — Vol. 43. — No. 6. — P. 2531–2533.
7. Патент України № 99683 / Барабаш В. А., Богаенко М.В., Гребеніков В.В., Попков В.С. Електрична машина з постійними магнітами. // Бюл. — 2012. — № 17.

© Гребеников В. В., Прыймак М.В., 2014

