

В. В. ГРЕБЕНИКОВ, д-р. техн. наук, вед. науч. сотр. Институт электродинамики НАН Украины, Киев;
М. В. ПРЬИМАК, инж. I кат. Институт электродинамики НАН Украины, Киев

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

В статье приведены результаты численного исследования способов уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами тангенциальной намагниченности. Показано, что применение ферромагнитных клиньев в пазах статора с небольшой магнитной проницаемостью ($\mu_{кл} \leq 30$) в сочетании с профилированием формы ферромагнитных полюсов ротора или выполнение скоса полюсов на роторе позволяют существенно уменьшить пульсации электромагнитного момента.

Ключевые слова: постоянные магниты, форма полюсов, скос полюсов, пульсации электромагнитного момента.

Введение

Электрические машины с зубцово-пазовым статором и ротором с тангенциальными векторами намагниченности постоянных магнитов (ПМ) имеют конструктивную особенность – между ПМ располагаются ферромагнитные полюса (концентраторы), которые позволяют концентрировать магнитный поток в области энергопреобразования, что позволяет получить больший электромагнитный момент по сравнению с электрическими машинами с гладким беспазовым статором. Однако в электрических машинах такой конфигурации присутствуют существенные пульсации электромагнитного момента, которые приводят к возникновению вибраций и шумов, отрицательно влияющих на долговечность работы электрической машины.

Анализ основных достижений

В научной литературе, посвященной проектированию машин с ПМ, описано много способов, позволяющих уменьшить пульсации электромагнитного момента, например, скос полюсов на роторе, профилирование ферромагнитных полюсов на роторе, применение ферромагнитных клиньев в пазах статора [1-5]. Аналитические либо аналитико-эмпирические методы, используемые при проектировании классических электрических машин, не в состоянии адекватно описать процессы в электрических машинах с ПМ со сложной геометрией магнитной системы. Поэтому исследования влияния конфигурации магнитной системы на пульсации электромагнитного момента базируются на численном решении задач расчета магнитного поля методом конечных элементов в двухмерной и трехмерной постановке на основе лицензионных программных комплексов INFOLYTICA и COMSOL.

Цель исследований

Исследование влияния проницаемости ферромагнитных клиньев в пазах статора в сочетании с профилированием формы ферромагнитных полюсов ротора, а также скоса полюсов в роторе на пульсации электромагнитного момента.

Материал исследований

Для достижения поставленной цели в работе исследовано несколько моделей машин с ПМ. Во всех исследуемых моделях статор по размерам идентичен со статором асинхронного двигателя АИР90L8 (рис. 1), с внешним диаметром – $D_a = 158$ мм, внутренним диаметром статора – $D_i = 104$ мм, числом пазов $Z_p = 48$ и высотой пазов $h = 14,2$ мм, длиной 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. Количество ПМ в роторе – 8, размеры магнитов – $10 \times 25 \times 100$ мм, масса одного магнита – $m = 187,5$ гр., масса восьми магнитов – $m_{ПМ} = 1,5$ кг.

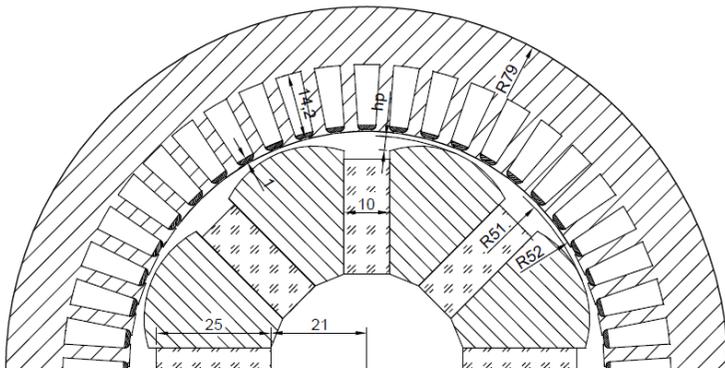


Рис. 1 – Размеры магнитной системы электрической машины с тангенциальной намагниченностью ПМ

При исследованиях влияния конфигурации магнитной системы на пульсации электромагнитного момента варьировалась глубина профиля ферромагнитных полюсов ротора h_p . Глубина профилирования полюсов – это разность между максимальным и минимальным расстоянием от центра ротора до наружной поверхности ферромагнитных полюсов (концентраторов).

Еще один способ уменьшения пульсаций электромагнитного момента в зубцово-пазовых электрических машинах – это размещение ферромагнитных клиньев в пазах статора электрической машины [3]. Закрытие пазов ферромагнитными клиньями уменьшает пульсации электромагнитного момента. При этом магнитная проницаемость клиньев должна быть

небольшой. Как показывают расчеты – магнитная проницаемость клиньев должна быть в пределах $\mu_{кл} = 5 \div 30$. Материал с такой магнитной проницаемостью может быть получен из ферромагнитных порошков путем их спекания по специальной технологии. Толщина клиньев должна выбираться исходя из условий механической прочности клиньев и способности обеспечивать нужное замыкание потока. В исследуемых моделях толщина клиньев принята равной $h_{кл} = 1$ мм.

Таким образом при исследовании пульсаций электромагнитного момента варьировалась глубина профилирования ферромагнитных полюсов в роторе и магнитная проницаемость клиньев, размещаемых в пазу статора. Было исследовано пять моделей, каждая из которых имеет свою глубину профилирования полюсов. Для удобства восприятия материала каждой из исследуемых моделей было присвоено свое обозначение. В модели **TPM0** (рис. 2.) наружный радиус ферромагнитных полюсов ротора равен наружному радиусу ротора, глубина профиля полюсов в этом случае равна $h_p = 0$ мм, в модели **TPM1** глубина профиля равна $h_p = 1$ мм, в модели **TPM2** – $h_p = 2$ мм и т.д. Расстояние между полюсами или толщина магнитов во всех исследуемых моделях одинакова и равна 10 мм.

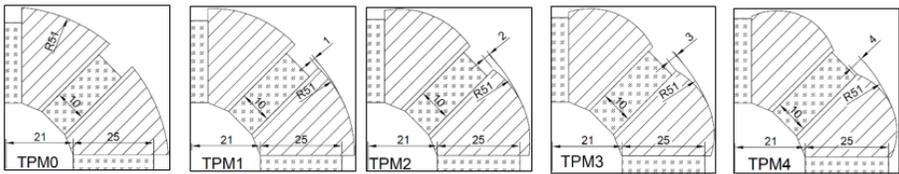


Рис. 2 – Конфигурация ротора с различной глубиной профилирования полюсов.

Во всех расчетах коэрцитивная сила ПМ задавалась равной $H_{CB} = 955$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 1,21$ Тл, 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 $A(+)$, $B(-)$, $C(0)$; плотность тока задана равной $J_r = 5,0$ А/мм², а коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_3 = 0,5$.

Результаты исследований

На рис. 3, а приведены зависимости электромагнитного момента от положения ротора и проницаемости клиньев $M = f(\theta, \mu_{кл})$ для модели **TPM0**. Электромагнитный момент для 8-ми полюсных электрических машин имеет период 45° и соответственно два нулевых значения: в положении устойчивого магнитного равновесия – ось q (это положение принято за начальное – $\theta = 0^\circ$), второе нулевое значение момента находится в положении неустойчивого магнитного равновесия – ось d ($\theta = 45^\circ$ геометрических градусов).

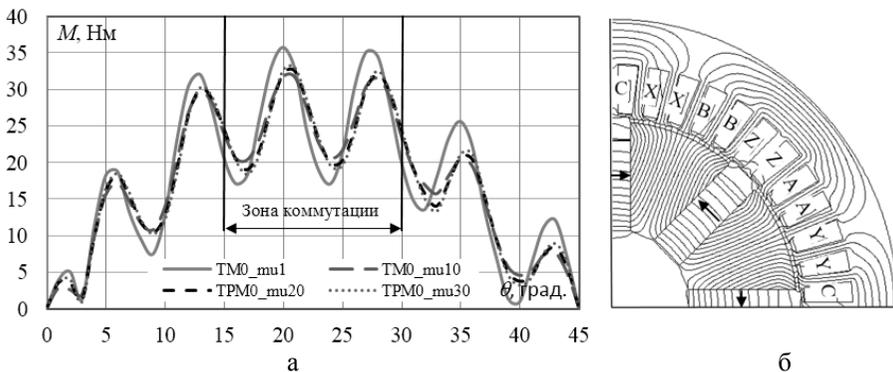


Рис. 3 – Результаты расчета при глубине профиля полюсов $h_p = 0$ мм:
 а – зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора и магнитной проницаемости клиньев; б – распределение магнитного потока

Для каждой из моделей расчет производился для нескольких значений магнитной проницаемости клиньев. Кривая TPM0_mu1 соответствует модели TPM0, в которой магнитная проницаемость клиньев равна $\mu_{кл} = 1$, соответственно TPM0_mu10 – $\mu_{кл} = 10$, TPM0_mu20 – $\mu_{кл} = 20$, TPM0_mu30 – $\mu_{кл} = 30$.

На рис. 3б показано распределение магнитного потока для случая, когда ротор относительно включенных фаз находится в положении максимума электромагнитного момента, т.е. посередине между осям q и d (направление намагниченности ПМ показаны стрелками), фазы включены следующим образом $A(+)$, $B(-)$, $C(0)$.

При анализе моментных характеристик определялись значения максимального M_{max} , минимального M_{min} и среднего M_{cp} электромагнитного момента. Эти значения определялись для зоны коммутации, которая для 8-ми полюсной электрической машины равна 15° геометрических градусов (от 15° до 30° по рис. 3). Для количественной оценки пульсаций электромагнитного момента производился расчет коэффициентов пульсации, которые определялись для зоны коммутации по двум формулам:

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

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.

В табл. 1 приведены коэффициенты пульсации k_{n1} и k_{n2} , среднее M_{cp} , максимальное M_{max} и минимальное M_{min} значения электромагнитного

момента, рассчитанные для зоны коммутации при глубине профиля ферромагнитных полюсов $h_p = 0$ мм. При такой глубине профилирования (как иллюстрируют результаты последующих исследований) пульсации электромагнитного момента наибольшие.

Таблица 1 – Параметры моделей с тангенциальной намагниченностью ПМ при глубине профиля ферромагнитных полюсов $h_p = 0$ мм

Модель	$k_{п1}$	$k_{п2}$	$M_{ср}$	M_{max}	M_{min}
ТМ0_mu1	36.18%	26.06%	25.81	35.78	17.10
ТРМ0_mu10	22.00%	15.89%	25.75	31.73	20.40
ТРМ0_mu20	26.20%	17.81%	25.63	32.48	19.05
ТРМ0_mu30	28.42%	19.15%	25.54	32.88	18.36

Минимальные пульсации получены при проницаемости клиньев $\mu_{кл} = 10$, при увеличении проницаемости клиньев пульсации незначительно возрастают. При изменении проницаемости клиньев от $\mu_{кл} = 1$ (клинья из немагнитного материала) до $\mu_{кл} = 10$ коэффициенты пульсации $k_{п1}$ и $k_{п2}$ уменьшаются примерно в 1.6 раза, однако их величина во всем диапазоне изменения проницаемости клиньев остается достаточно высокой.

Уменьшение пульсаций происходит при увеличении глубины профилирования ферромагнитных полюсов. На рис. 4а приведены зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора и магнитной проницаемости клиньев $M = f(\theta, \mu_{кл})$ при глубине профиля ферромагнитных полюсов $h_p = 4$ мм.

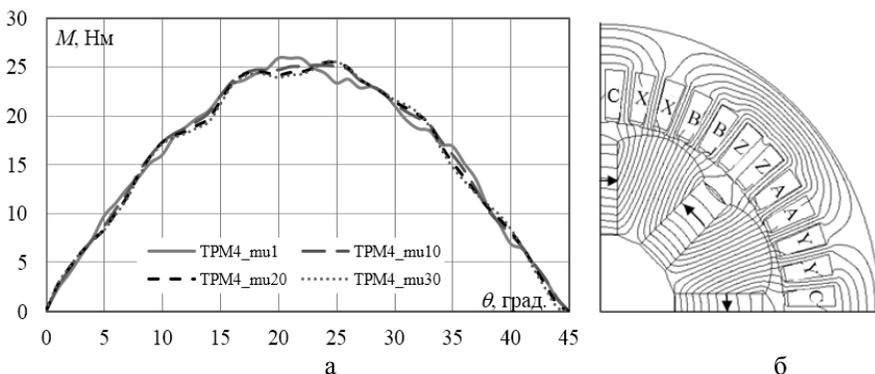


Рис. 4 – Результаты расчета при глубине профиля полюсов $h_p = 4$ мм:
 а – зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора и магнитной проницаемости клиньев; б – распределение магнитного потока

На рис. 4, б справа приведена картина магнитного поля для одного из положений статора относительно ротора для случая, когда фазы статора включены следующим образом: $A(+)$, $B(-)$, $C(0)$ и магнитная проницаемость клиньев $\mu_{\text{кл}} = 30$. Из графиков видно, что пульсации электромагнитного момента существенно ниже для всех значений проницаемости ферромагнитных клиньев по сравнению с моделью, в которой глубина профилирования полюсов равна $h_p = 0$ мм.

В программном комплексе INFOLYTICA были проведены расчеты для всех пяти моделей приведенных на рис. 2 при изменении магнитной проницаемости клиньев в диапазоне $\mu_{\text{кл}} = 1 \div 30$. На рис. 5 приведены минимальные значения коэффициентов пульсации для каждой из исследуемых моделей, которые получены при различных значениях проницаемости клиньев. Так, например, для модели **TPM0** с глубиной профилирования $h_p = 0$ мм минимальные значения коэффициентов пульсации получены при $\mu_{\text{кл}} = 10$, для модели **TPM1** – минимальные значения коэффициентов пульсации получены при $\mu_{\text{кл}} = 20$ и т. д. Из этих графиков видно, что при отсутствии профилирования полюсов ротора пульсации электромагнитного момента существенны, однако изменение глубины профилирования на 2 мм приводит к значительному уменьшению пульсаций (более чем в 4 раза), среднее значение электромагнитного момента при этом уменьшается незначительно (примерно на 5%).

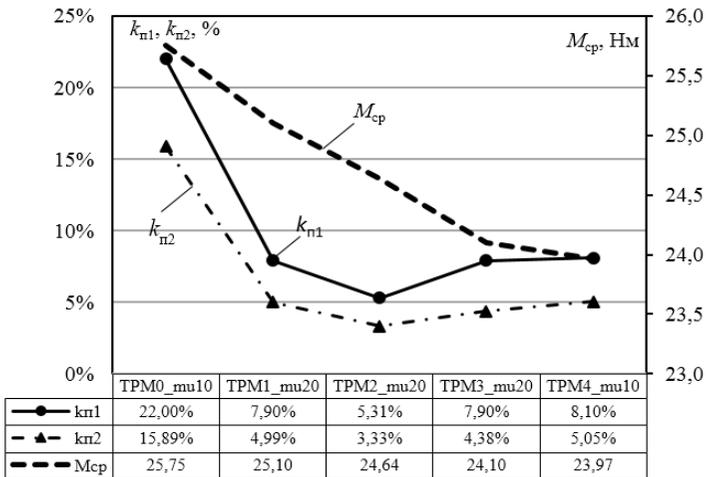


Рис. 5 – Зависимость коэффициентов пульсации и среднего электромагнитного момента для моделей с тангенциальной намагниченностью ПМ

Таким образом результаты численных исследований иллюстрируют, что изменение формы полюсов для электрических машин с тангенциальной намагниченностью ПМ существенно влияют на пульсации электромагнитного момента. Коэффициенты пульсации рассчитанные по двум формулам отличаются по абсолютному значению, однако характер изменения в зависимости от магнитной проницаемости клиньев и глубины профилирования полюсов совершенно идентичен. Ввиду того, что первая формула проще, можно рекомендовать определение коэффициента пульсации по данной формуле.

Альтернативный способ уменьшения пульсаций электромагнитного момента – это выполнение скоса полюсов на роторе [2]. При моделировании электрических машин со скосом полюсов необходимо выполнять расчеты в трехмерной постановке либо в двухмерной по нескольким сечениям. Расчеты в трехмерной постановке требуют существенных затрат времени на подготовку исходной модели и затрат машинного времени. Если в двухмерной постановке расчет зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора (45 точек) происходит за несколько минут, то в трехмерной постановке – несколько часов для персонального компьютера с тактовой частотой процессора 3 ГГц и оперативной памятью 8 ГБ.

На рис. 6 приведены проекции исследуемой трехмерной модели SPM_3D. Масса магнитов и их характеристики, а также характеристики сталей статора и ротора, значение плотности тока в фазах двигателя такие же, как и во всех остальных моделях, проницаемость клиньев $\mu_{кл} = 1$. Скос полюсов выполняется на величину зубцового деления t_z статора.

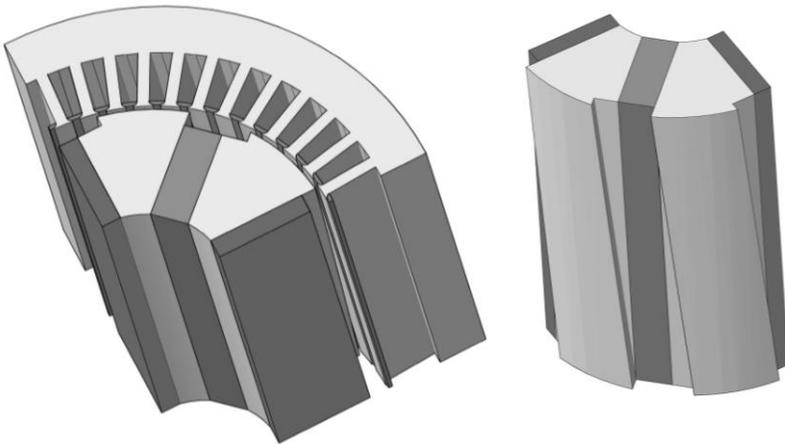


Рис. 6 – Внешний вид фрагментов 3D модели со скосом полюсов на роторе.

На рис. 7 приведены зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора для трех моделей: двухмерной модели TPM0_mu1 ($h_p = 0$,

$\mu_{кл} = 1$), для которой получены наибольшие значения коэффициентов пульсации; двухмерной модели TPM2_mu20 ($h_p = 0, \mu_{кл} = 1$), для которой получены наименьшие значения коэффициенты пульсации; трехмерной модели SPM_3D (выполнен скос полюсов, $\mu_{кл} = 1$). Все параметры моделей со скосом и без скоса полюсов рассчитаны для зоны коммутации, которая для данного двигателя составляет 15° геометрических градусов и находится в диапазоне $\theta = 15^\circ \div 30^\circ$, на этом рисунке $\theta = 0^\circ$ соответствует оси q , а $\theta = 45^\circ$ – оси d .

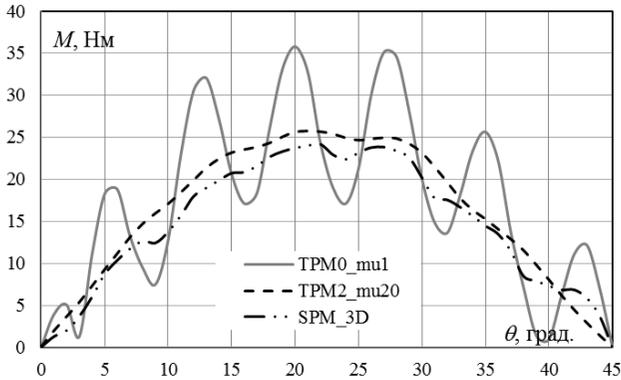


Рис. 7 – Зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора для моделей без скоса и со скосом полюсов

Сравнивая график момента для моделей со скосом и соответственно без скоса полюсов, следует отметить, что применение скоса позволяет существенно уменьшить пульсации электромагнитного момента. Однако профилирование ферромагнитных полюсов в сочетании с применением клиньев в пазу статора с небольшой магнитной проницаемостью также позволяет существенно уменьшить пульсации электромагнитного момента. На рис. 7 приведены расчетные значения коэффициентов пульсации и среднего электромагнитного момента соответственно для моделей TPM0_mu1, TPM2_mu20 и SPM_3D. Сопоставляя значения коэффициентов пульсации, следует отметить, что пульсации электромагнитного момента для модели со скосом полюсов более, чем в 4 раза ниже, чем у модели без скоса полюсов и профилирования ферромагнитных концентраторов. Если сравнивать значение коэффициентов пульсации для модели TPM0_mu1 и соответственно TPM2_mu20, то коэффициенты пульсации отличаются примерно в 7 раз.

Альтернативным способом трехмерному моделированию для электрических машин с со скосом полюсов является двухмерное по трем сечениям, суть такого моделирования заключается в следующем.

Рассчитываются три двухмерных модели со скосом полюсов на роторе: в сечении на расстоянии 1/6 от переднего края активной части магнитной системы (сечение 1); на расстоянии 1/2 от переднего края активной части (сечение 2); на расстоянии 5/6 от переднего края активной части (сечение 3).

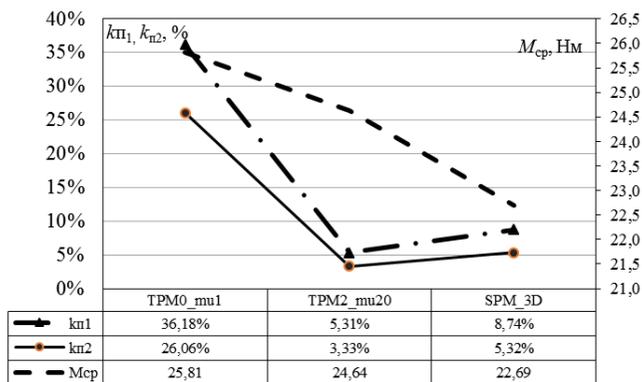


Рис. 8 – Зависимость коэффициентов пульсации и среднего электромагнитного момента для моделей со скосом и без скоса полюсов

Аксиальная длина каждой модели равна 1/3 аксиальной длины расчетной модели. Суммарный электромагнитный момент для каждой точки определяется как сумма моментов трех моделей. В результате численных исследований установлено, что значение электромагнитного момента в трехмерной модели несколько меньше, чем в двухмерной (в среднем на 10 %), однако характер изменения момента идентичен. Объясняется это тем, что в двухмерной постановке не учитываются торцевые поля рассеяния.

Таким образом, на стадии предварительного проектирования электрических машин со скосом полюсов можно вместо трехмерного моделирования выполнять двухмерное по трем сечениям с последующим уточнением окончательного варианта расчета в трехмерной постановке.

Выводы

1. Проведены численные исследования и сопоставление влияния на пульсации электромагнитного момента проницаемости клиньев в пазах электрической машины с зубцово-пазовым статором в сочетании с различной конфигурацией магнитной системы ротора с постоянными магнитами. При этом масса и свойства каждого из магнитов, характеристики сталей, плотности тока в фазах во всех моделях одинаковы.

2. Применение клиньев с небольшой магнитной проницаемостью ($\mu_{кл} \leq 30$) в пазах электрической машины с зубцово-пазовым статором в сочетании с профилированием формы ферромагнитных полюсов ротора позволяют значительно уменьшить пульсации электромагнитного момента

(примерно в 4 раза) по сравнению с конфигурацией, в которой отсутствует профилирование полюсов ротора и проницаемость клиньев равна $\mu_{кл} = 1$.

3. Альтернативный способ уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с ротором, имеющим магниты тангенциальной намагниченности – это применение скоса полюсов на роторе, такой способ более технологичен, по сравнению с профилированием полюсов и может быть рекомендован для мелкосерийного производства.

Список литературы: 1. *Вигрянов П.Г.* Пульсации электромагнитного момента монофазных вентиляльных двигателей в аварийных режимах работы / *П.Г. Вигрянов* // Вопросы электромеханики. Т. 128. – 2012. – С. 9-16. 2. *Гребеников В. В.* Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами и зубцово-пазовым статором / *В.В. Гребеников, М.В. Приймак* // Праці ІЕД НАНУ: Зб. наук. пр., 2010. – Вип. 27. – С. 52-58. 3. *Гребеников В.В.* Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами радиальной намагниченности / *В.В. Гребеников, М.В. Приймак* // Гідроенергетика України. – 2014. – № 2-3. – С. 62-67. 4. *Радимов И.Н.* Разработка вентиляльных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины / *И.Н. Радимов, В.В. Рымша, М.В. Гульий, З.П. Процьина, Чан Тхи Тху Хьонг* // Електротехніка і електромеханіка. №1 – 2008. – С. 41–44. 5. *Рымша В.В.* Влияние конфигурации зубцовой зоны статора на электромагнитный момент и радиальные электромагнитные силы вентиляльно-реактивного электродвигателя / *В.В. Рымша, И.Н. Радимов, Чан Тхи Тху Хьонг* // Електротехніка і Електромеханіка. №2. – 2006. – С.56-58

Bibliography (transliterated): 1. *Vigryanov P.G.* Pulsatsii elektromagnitnogo momenta monofaznyih ventilnyih dvigateley v avariyniyih rezhimah roboty. *P.G. Vigryanov.* Voprosy elektromehani. T. 128. 2012. 9-16. [Print]. 2. *Grebennikov V. V.* Sposobyi umensheniya pulsatsiy elektromagnitnogo momenta v elektricheskikh mashinah s postoyannymi magnitami i zubtsovo-pazovyim statorom. *V.V. Grebenikov, M.V. Priyimak.* Pratsi IED NANU: Zb. nauk. pr., 2010. Vip. 27. 52-58. [Print]. 3. *Grebennikov V.V.* Sposobyi umensheniya pulsatsiy elektromagnitnogo momenta v elektricheskikh mashinah s postoyannymi magnitami radialnoy namagnichennosti. *V.V. Grebenikov, M.V. Priyimak.* Hidroenergetika Ukraini. 2014. No 2-3. 62-67. [Print]. 4. *Radimov I.N.* Razrobotka ventilnyih dvigateley s postoyannymi magnitami na baze shtampa statora reaktivnoy mashiny. *I.N. Radimov, V.V. Ryimsha, M.V. Gulyiy, Z.P. Protsyina, Chan Thi Thu Hyiong.* Elektrotehnika I elektromehanika. No 1. 2008. 41–44. [Print]. 5. *Ryimsha V.V.* Vliyanie konfiguratsii zubtsovoy zonyi statora na elektromagnitnyy moment i radialnyie elektromagnitnyie silyi ventilno-reaktivnoy elektrodvigatelya. *V.V. Ryimsha, I.N. Radimov, Chan Thi Thu Hyiong.* Elektrotehnika I Elektromehanika. No2. 2006. S.56-58/ [Print]

Надійшла (received) 22.09.2014



Гребеников Виктор владимирович
д-р техн. наук,
ведущ. науч. сотр., Институт электродинамики НАН Украины
E-mail: elm1153@gmail.com



Приймак Максим Васильевич
Инж. 1 кат., Институт электродинамики НАН Украины
E-mail: maksim.prv@gmail.com