

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Виконано аналіз і співставлення двох типів тихохідних магнітоелектричних синхронних генераторів (з радіальним і тангенціальним намагніченням постійних магнітів на роторі) для вітросилової установки при однакових габаритних розмірах статора. Показано, що у синхронному генераторі з поверховим розташуванням і радіальним намагніченням магнітів пульсації магнітної індукції та електромагнітного моменту істотно нижчі. Наведено результати розрахунків поля і моментів такого генератора для різних співвідношень активної частини і маси постійних магнітів.

Выполнен анализ и сопоставление двух типов тихоходных магнитоэлектрических синхронных генераторов (с радиальным и тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов на роторе) для ветросилового установки при идентичных габаритных размерах статора. Показано, что в генераторе с поверхностным расположением и радиальным намагничиванием магнитов пульсации магнитной индукции и электромагнитного момента существенно ниже. Приведены результаты расчетов поля и моментов такого генератора для различных геометрических соотношений активной части и массы постоянных магнитов.

Особенностью тихоходных СГ с постоянными магнитами, предназначенных для ветроустановок, является малое значение относительной длины $\lambda_i = L_i/D_i$, что связано с необходимостью увеличения диаметра ротора статора D_i в соответствии с большим числом полюсов и необходимостью размещения обмотки статора в ограниченном числе пазов при весьма малом значении q_1 – числе пазов на полюс и фазу. При достаточно большом диаметре ротора D_p даже для СГ малой мощности основная масса магнитов сосредотачивается на периферии ротора, внутренний объем которого в магнитном отношении недоиспользуется, однако соображения увеличения момента инерции вращающихся масс диктуют необходимость делать сердечник ротора массивным. При этом для ротора типа "звездочка" ширина образующего полюс магнита естественным образом определяется, прежде всего, величиной полюсного деления τ (при определенном коэффициенте полюсного перекрытия α_δ), а его толщина h_m должна обеспечивать расчетный объем магнита V_m . Ясно поэтому, что определение оптимальных соотношений между размерами магнита, его объемом и основными геометрическими размерами ротора статора - активной длиной L_i и диаметром D_i является одной из основных задач проектирования. В эти соотношения естественным образом включаются и многие другие параметры магнитной цепи, а также обмотки статора, массогабаритные и энергетические показатели [1].

Соотношения для расчета размеров магнита и магнитной цепи ротора зависят от типа магнитной системы, а необходимый объем магнитов определяется, главным образом, задаваемой мощностью и характером нагрузки, параметрами самих магнитов и соотношениями определенных коэффициентов, характеризующих магнитную цепь. В то же время вполне взаимосвязанными с размерами магнитов выступают электромагнитные нагрузки (A_1 и B_δ) и величина воздушного зазора δ . Таким образом, оказывается крайне необходимым на этапе формирования исходных данных на проектирование СГ провести сравнительную оценку соотношений геометрических размеров статора и ротора, а также магнитной системы и на этом основании

выбрать вариант, при котором достигается наибольшее значение электромагнитной мощности (или момента).

В статье на примере тихоходного СГ средней мощности рассматриваются возможности проведения такой оценки на основе численного моделирования в программном комплексе ELCUT 5.6.

По аналогии с вариантом СГ с электромагнитным возбуждением, изготовленном нами для безредукторной ВЭУ средней мощности [6] и на основании предварительного расчета СГ с постоянными магнитами (ПМ) для ветросилового установки мощностью 25 кВт были выбраны его главные геометрические размеры: наружный диаметр статора $D_a = 740$ мм; диаметр внутренней ротора статора $D_i = 630$ мм; наружный диаметр ротора $D_p = 628$ мм; длина сердечника статора $L_i = 200$ мм. При выборе типа магнитной системы рассматривались два варианта конструкции ротора – с радиальным и тангенциальным намагничиванием магнитов (рис. 1) [2, 4].

На рис. 1,а показан сегмент магнитной системы генератора с поверхностным расположением магнитов и с их радиальным намагничиванием, а на рис. 1,б – тангенциальным намагничиванием таких же магнитов.

Сердечник статора синхронного генератора набран, как обычно, из отдельных листов электротехнической стали 2212, число пазов статора $Z_1 = 144$. Ротор выполнен из конструкционной стали марки Ст3. Постоянные магниты располагаются в специальных выточках на роторе, количество полюсов ротора $2p = 48$. Для генератора по рис. 1,а магниты имеют трапециевидную форму, для генератора по рис. 1,б – прямоугольную.

На рис. 1,в представлена заготовка ротора с пазами, подготовленная к установке постоянных магнитов по варианту 1,а; количество магнитов равно числу полюсов $n_m = 2p = 48$, толщина магнитов $h_m = 7$ мм; ширина $b_{m1} = 32$ мм и $b_{m2} = 30$ мм, аксиальная длина $l_m = 200$ мм. Полюсное деление составляет $\tau = 7,5^\circ$ (180 эл. град.). Марка магнитов NdFeB с паспортными данными: остаточная индукция $B_r = 1,23$ Тл, коэрцитивная сила по индукции $H_{cb} \geq 860$ кА/м (то же по намагниченности $H_{cj} \geq 960$ кА/м); энергетическое произведение $W_{max} = (BH)_{max} = 287-310$ кДж/м³.

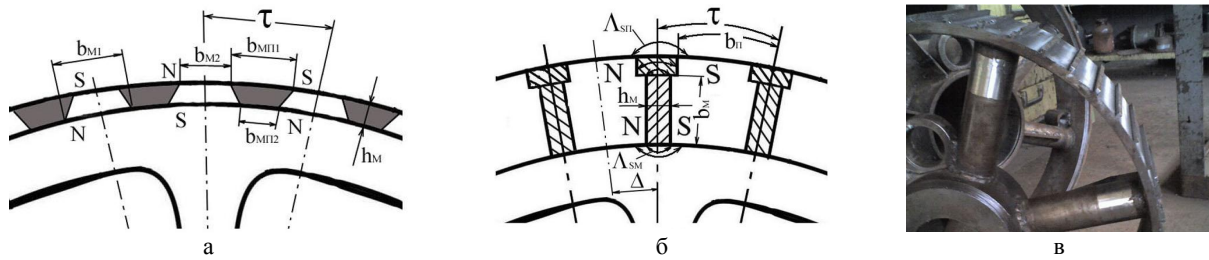


Рис. 1. Варианты магнитной системы ротора СГ с постоянными магнитами

Как видно из рис. 1, в на поверхности ротора профрезерованы осевые пазы для установки в них постоянных магнитов, а между пазами предусмотрены выступы трапецеидального сечения, предназначенные для дополнительной фиксации магнитов.

Конфигурация магнитной системы электрической машины существенным образом влияет на ее характеристики [3, 5]. На рис. 2, а приведена картина магнитного поля в поперечном сечении исследуемого генератора с радиальным намагничиванием ПМ на роторе, а на рис. 2, б – с тангенциальным. Вектор намагниченности ПМ на этом рисунке показан стрелками. При расчёте приняты граничные условия: $A = 0$ для верхней и нижней границ расчетной области, для правой и левой границы расчетной области – четная периодичность ($A_1 = A_2$).

При дискретизации расчетной области применено автоматическое разбиение в программном комплексе ELCUT 5.6, количество узлов – 18000.

На первом этапе исследовано влияние в целом конфигурации магнитной системы ротора на электромагнитный момент генератора, при этом участок магнитной цепи статора задан реальной кривой намагничивания стали 2212, а для ротора – кривой стали Ст 3. Поле реакции якоря представлено как образованное токами трех фаз для момента времени, когда ток в фазе А максимальный $i = I_m$ и условно положительный, а в фазах В и С – $i = 0,5I_m$ и условно отрицательный (рис. 2, в). Плотность тока задана равной $J_r = 5 \text{ А/мм}^2$, а коэффициент заполнения паза медью принят равным $k_3 = 0,5$.

Во всех расчетах коэрцитивная сила постоянных магнитов задавалась равной $H_{CB} = 860 \text{ кА/м}$, магнитная проницаемость магнитов – $\mu_m = 1,05$.

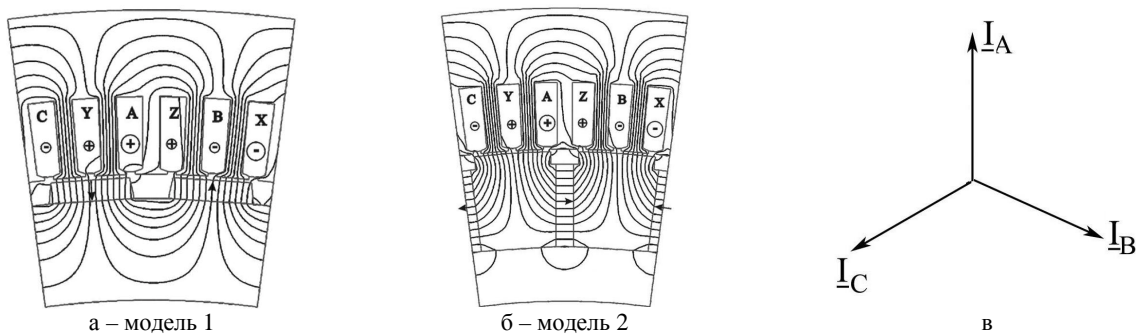


Рис. 2. Картины магнитного поля СГПМ для заданного момента времени

На рис. 3, а приведена кривая распределения нормальной (радиальной) компоненты магнитной индукции $B = f(\vartheta)$ посередине воздушного зазора в пределах одного полюсного деления τ для двух моделей генератора, соответственно с радиальным (модель 1) и тангенциальным (модель 2) намагничиванием ПМ.

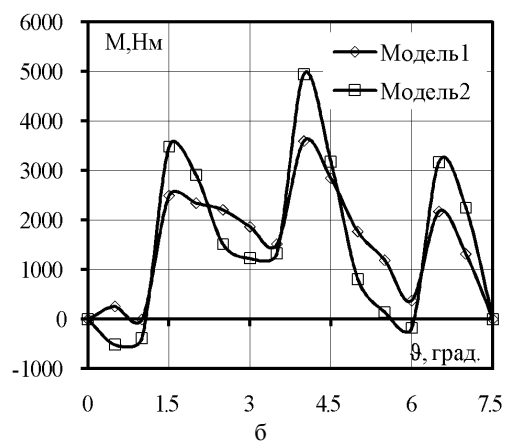
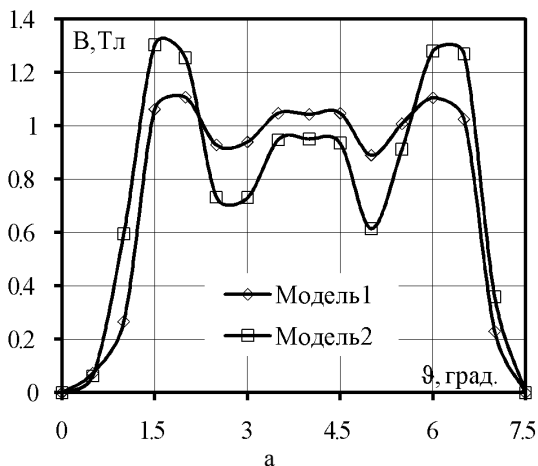


Рис. 3. Зависимости поля и момента от угла поворота в пределах полюсного деления

Как видно из рис. 3, распределение магнитной индукции в воздушном зазоре существенно зависит от конфигурации магнитной системы ротора: для модели 2 наблюдается весьма большая разница между максимальным и минимальным значениями индукции в воз-

душном зазоре, для модели 1 график распределения нормальной компоненты магнитной индукции имеет форму, более близкую к трапецеидальной, а разница между усредненными минимальными значениями индукции по двум моделям составляет в среднем 0,2 Тл.

На рис. 3,б приведена картина тормозного электромагнитного момента M , действующего при нагрузке на ротор СГ, для угла $\vartheta = 0-7,5^\circ$. Как видно из рис. 3,б, электромагнитный момент также существенно зависит от конфигурации магнитной системы ротора.

Для модели 1 (при радиальном намагничивании ПМ) пульсации момента существенно меньше, чем для модели 2 (при тангенциальном намагничивании ПМ). С учетом этих результатов, а также технологических особенностей сборки на втором этапе численных исследований рассматривался вариант конструкции ротора с радиальным намагничиванием магнитов при неизменной конструкции статора.

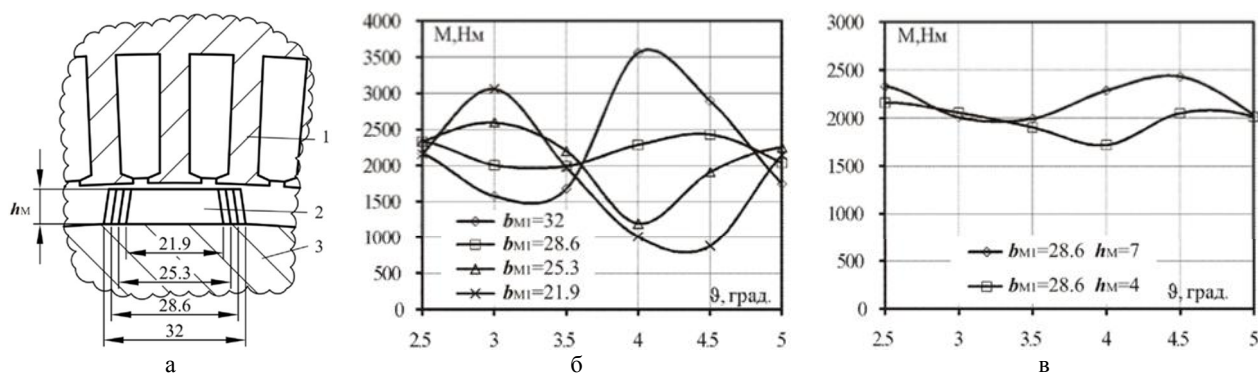


Рис. 4. Влияние размеров магнита на распределение электромагнитного момента СГПМ

Из рис. 4 ясно видно, что при ширине ПМ, равной $b_{m1} = 32$ мм, пульсации электромагнитного момента достигают величины 2000 Н·м. Существенные пульсации электромагнитного момента наблюдаются также и при значениях ширины ПМ $b_{m1} = 25,3$ мм и $b_{m1} = 21,9$ мм. Наиболее приемлемой шириной с точки зрения величины электромагнитного момента и его формы является величина $b_{m1} = 28,6$ мм, при этом размах пульсаций момента не превышает 500 Н·м в диапазоне $\vartheta = 3-4,5^\circ$.

Далее проводились расчеты при ширине магнитов, равной $b_{m1} = 28,6$ мм и их толщине $h_m = 4$ мм. Результаты расчета зависимости электромагнитного момента от угла поворота для различных значений толщины ПМ приведены на рис. 4,в.

В табл. 1 приведена масса постоянных магнитов при различной их ширине и толщине. В исходном варианте масса магнитов равна $m_{пм} = 11,86$ кг, в рассмотренном расчетном – соответственно $m_{пм} = 5,94$ кг. Анализируя результаты расчетов, приведенные на рис. 4,в и в табл. 1, следует отметить, что уменьшение толщины магнитов почти в 2 раза мало сказывается на значении электромагнитного момента.

Таким образом, предварительная оценка влияния на величину электромагнитного момента СГ ширины и толщины постоянных магнитов, дает возможность прогнозировать приемлемую их толщину, которая составляет $h_m = 4$ мм. Однако из соображений обеспечения механической прочности магнитов для опытно-конструкторского варианта СГ их толщина принята равной $h_m = 7$ мм и соответственно ширина – $b_{m1} = 28,6$ мм.

Целью второго этапа численного исследования явилось определение влияния размеров ПМ на величину электромагнитного момента генератора по модели 1. Исходные размеры ПМ – ширина у основания $b_{m1} = 32$ мм, толщина $h_m = 7$ мм.

Поскольку ширина полюсного деления и коэффициент полюсного перекрытия для рассматриваемой конструкции не подлежат изменению, проведена серия расчетов для значений ширины ПМ, не превышающих исходную величину – $b_{m1} = 28,6$ мм, $b_{m1} = 25,3$ мм и $b_{m1} = 21,9$ мм.

На рис. 4 показан фрагмент магнитной системы ротора с размерами магнитов и результаты расчета электромагнитного момента при различных значениях угла поворота ротора для различных размеров ПМ. Для удобства анализа названные зависимости $M = f(\vartheta)$ для 4 вариантов толщины магнитов на рисунках 4, б и в приведены в среднем диапазоне угла от $\vartheta = 2,5^\circ$ до $\vartheta = 5^\circ$.

Таблица 1

Расчетные массы магнитов в зависимости от их размеров

h_m , мм	b_{m1} , мм	Масса одного магнита, кг	Масса 48-ми магнитов, кг
7	32	0,25	11,86
7	28,6	0,22	10,57
7	25,3	0,19	9,27
7	21,9	0,17	7,97
4	28,6	0,12	5,94

Представляет интерес определение влияния на кривую момента электрогенератора размеров ферромагнитных выступов на ярме ротора между магнитами (рис. 5,а), предназначенных для их дополнительного крепления в пазовом пространстве. При такой оценке за основу взята конфигурация магнитной системы с шириной ПМ, равной $b_{m1} = 28,6$ мм, а в расчетах высота этих выступов варьировалась в пределах $h_\phi = 0$ мм (между ПМ отсутствуют выступы) до $h_\phi = 7$ мм (между ПМ выступы имеют высоту магнита).

На рис. 5,б приведена картина магнитного поля для сектора исследуемого генератора. Выбор сектора в качестве расчетной модели существенно сокращает время расчета. Как видно из рис. 5,б, наблюдается вытеснение поля в область ферромагнитного выступа.

Результаты расчета электромагнитного момента для различных значений высоты ферромагнитных выступов приведены на рис. 5,в. На этом рисунке зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора также приведена для диапазона изменения угла от $\vartheta = 2,6^\circ$ до $\vartheta = 4,6^\circ$.

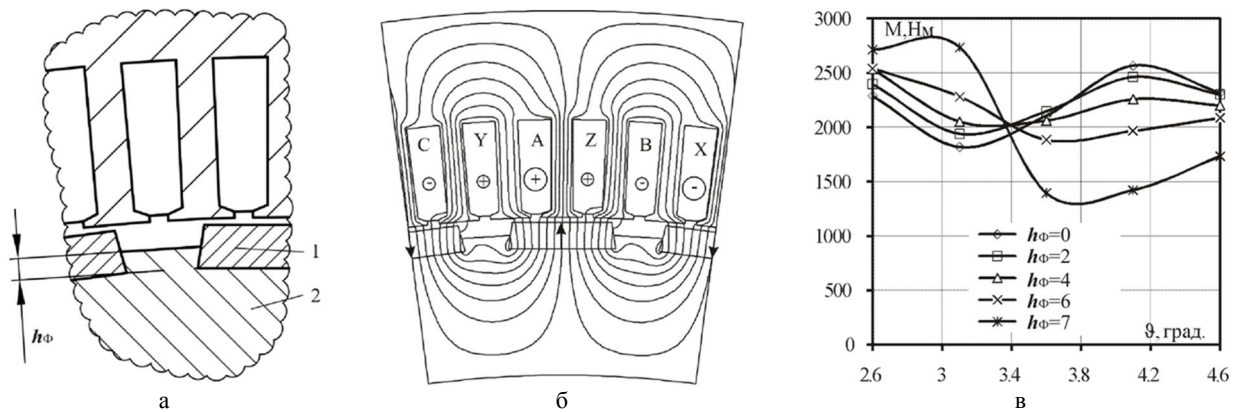


Рис. 5. Влияние размеров зубца между магнитами на распределение электромагнитного момента СГПМ

Анализируя эти зависимости, следует отметить, что электромагнитный момент существенно зависит от высоты ферромагнитных выступов, располагаемых между ПМ. При высоте ферромагнитного выступа $h_{\phi} = 7$ мм имеют место пульсации электромагнитного момента в пределах ± 750 Н·м. При высоте ферромагнитного выступа $h_{\phi} = 4$ мм пульсации электромагнитного момента наименьшие, поэтому эту высоту ферромагнитного выступа следует принять в качестве исходной.

С точки зрения достижения максимального использования СГПМ, выбора его геометрии в целом, включая и размеры ротора с постоянными магнитами, и конфигурацию активной зоны статора, представляет интерес рассмотреть различные варианты соотношений высоты пазов и ярма статора, а также изменения диаметра внутренней расточки статора и соответственно – наружного диаметра ротора. Это даст возможность наиболее правильного выбора основных соотношений машины на этапе формирования заказа на штамповку листов электротехнической стали и сборки пакета.

Из этих соображений для рассматриваемого варианта СГПМ при неизменных значениях наружного диаметра D_a , ширины паза b_n и активной длины L_i варьировались значения высоты паза h_n и значений D_i и D_p в следующих соотношениях: исходные значения: $h_n = 26$ мм, $D_i = 630$ мм, $D_p = 628$ мм; увеличение высоты паза до значения $h_n = 45$ мм при $D_i = 630$ мм и $D_p = 628$ мм; уменьшение диаметров до значений $D_i = 592$ мм, $D_p = 590$ мм при той же высоте $h_n = 45$ мм; то же при увеличении высоты до значения $h_n = 64$ мм. Речь в данном случае идет об оценке возможностей, при неизменных габаритных размерах (D_a и L_i), увеличения активной мощности СГПМ за счет повышения линейной нагрузки статора при одновременном снижении размеров и массы (при меньшем диаметре ротора) постоянных магнитов, которые в исходном варианте из соображений сохранения механической прочности были выбраны завышенными.

На рис. 6 приведены расчетные зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора для всех приведенных выше моделей. За основу взята конфигурация магнитной системы с шириной ПМ $b_{m1} = 28,6$ мм, при которой величина электромагнитного момента и его пульсации определены как приемлемые (рис. 4).

Приведенные результаты компьютерного моделирования подтверждают то, что конфигурация магнитной системы, включающая ПМ, ферромагнитные

вставки между магнитами и элементы статора с обмоткой, существенным образом влияют на характеристики синхронного генератора. На стадии предварительного проектирования генератора с ПМ важен и должен учитываться характер распределения радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре машины на ширине полюсного деления как главный фактор, определяющий зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора.

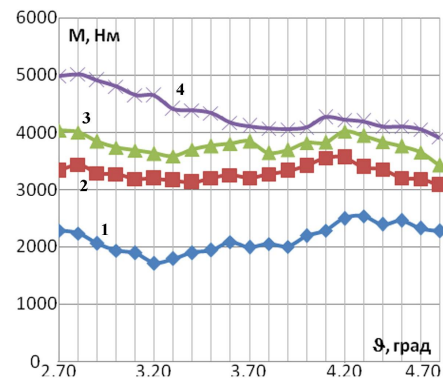


Рис. 6. Влияние геометрии статора и ротора на величину электромагнитного момента СГПМ при различных значениях угла поворота ротора:
1 – $h_n = 26$ мм, $D_p = 628$ мм; 2 – $h_n = 45$ мм, $D_p = 590$ мм;
3 – $h_n = 45$ мм, $D_p = 628$ мм; 4 – $h_n = 64$ мм, $D_p = 590$ мм

Ясно при этом, что окончательные решения по всем геометрическим и электромагнитным параметрам, обмоточным данным и размерам постоянных магнитов могут быть приняты только после полного расчета СГ, построения рабочей диаграммы магнита его характеристик, а также теплового расчета при номинальной нагрузке.

ВЫВОДЫ

1. Анализ и сопоставление двух типов синхронных генераторов с ПМ для ветросиловой установки с радиальным и тангенциальным намагничиванием магнитов на роторе показывает, что генератор при идентичных габаритных размерах статора с радиальным намагничиванием магнитов может иметь существенно меньшие пульсации электромагнитного момента.

2. При уменьшении ширины и толщины ПМ и соответственно их массы вдвое можно добиться уменьшения пульсации электромагнитного момента при несущественном снижении среднего момента.

3. Электромагнитный момент существенно зависит от высоты ферромагнитных выступов, располагаемых между ПМ – при определенной их высоте ($h_{\phi} = 4$ мм) пульсации электромагнитного момента могут быть наименьшими.

4. Расчетное значение мощности для рассмотренного варианта магнитной системы синхронного генератора при частоте вращения, равной 125 об/мин составляет 24 кВт, а при увеличении объема меди может быть доведено до 45-50 кВт.

5. Окончательное суждение о реальной картине поля и связанных с ней взаимодействий, а также о результатах проведенных расчетов может быть сделано по итогам экспериментального исследования опытного образца данного генератора, находящегося в процессе сборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. Пат. 88640 С2 Украина, МПК Н 02 К 15/02. Багатополюсний ротор синхронної машини з постійними магнітами. / Олейников А.М., Мартинов В.М., Мирсаитов К. М., Агафонов В.В., Зарицька О.І.; заявитель и патентообладатель Севаст. нац. техн. универ.; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.
3. Гребеников В.В., Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами / В.В. Гребеников, М.В. Прыймак // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – №2. – С. 57-60.
4. Пат. 86070 Украина, МПК Н 02 К 21/00. Ротор тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами. / Олейников А.М., Мартынов В.Н., Терещенко П.В., Мирошниченко М.С.; заявитель и патентообладатель Севаст. нац. техн. универ.; Опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.
5. Гребеников В.В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами / В.В. Гребеников, М.В. Прыймак // Вісник Кременчуцького держ. політехн. універ. ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: Изд-во КДПУ, 2009. – №3 (56). – Ч 2. – С. 70-73.
6. Олейников А.М. Автономная безредукторная ВЭУ с тихоходным синхронным генератором средней мощности / А.М. Олейников, Е.И. Зарицкая, А.В. Пильганчук // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – Вып. 97. – С. 103-106.

Bibliography (transliterated): 1. Balagurov V.A. `Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami / V.A. Balagurov, F.F. Galteev. - M.: `Energoatomizdat, 1988. - 280 s. 2. Pat. 88640 S2 Ukraina, MPK N 02

K 15/02. Bagatopolyusnij rotor sinhronnoi mashini z postijnimi magnitami. / Olejnikov A.M, Martynov V.M., Mirsaitov K. M., Agafonov V.V., Zaric'ka O.I.; zayavitel' i patentoobladatel' Sevavast. nac. tehn. univer.; opubl. 10.11.2009, Byul. № 21. 3. Grebenikov V.V., Issledovanie vliyaniya konfiguracii magnitnoj sistemy na momentnye harakteristiki `elektrodvigatelej s postoyannymi magnitami / V.V. Grebenikov, M.V. Pryjmak // `Elektrotehnika i `elektro`energetika. - 2009. - №2. - S. 57-60. 4. Pat. 86070 Ukraina, MPK N 02 K 21/00. Rotor tihohodnogo sinhronnogo generatora s postoyannymi magnitami. / Olejnikov A.M., Martynov V.N., Tereschenko P.V., Miroshnichenko M.S.; zayavitel' i patentoobladatel' Sevast. nac. tehn. univer.; Opubl. 25.03.2009, Byul. № 6. 5. Grebenikov V.V. Modelirovanie magnitnyh polej v `elektromehaničeskikh preobrazovatelyah `energii s postoyannymi magnitami / V.V. Grebenikov, M.V. Pryjmak // Visnik Kremenčuc'kogo derzh. politehn. univer. im. Mihajla Ostrograds'kogo. - Kremenčuk: Izd-vo KDPU, 2009. - №3 (56). - Ch 2. - S. 70-73. 6. Olejnikov A.M. Avtonomnaya bezreduktornaya V`EU s tihohodnym sinhronnym generatorom srednej moschnosti / A.M. Olejnikov, E.I. Zarickaya, A.V. Pil'ganchuk // Vestnik SevNTU. Ser. Mehanika, `energetika, `ekologiya: sb. nauch. tr. - Sevastopol': SevNTU, 2009. - Vyp. 97. - S. 103-106.

Поступила 13.10.2011

Зарицкая Елена Игоревна

Одесский национальный морской университет
кафедра "Электротехника и электрооборудование судов"
65053, Одесса, пр. Шевченко д. 10/3, кв 27
тел. 0505843936

Прыймак Максим Васильевич

Институт электродинамики НАН Украины
04201, Киев, ул. Бережанская, д. 20 кв. 55
тел. 0443310164, e-mail: maksim.prv@gmail.com
Олейников Александр Михайлович, д.т.н., проф.,
Севастопольский национальный технический университет
кафедра судовых и промышленных электромеханических систем
99022, Севастополь, ул. Кронштадтская, 2Д
тел. 0999722001, e-mail: A.M.Olejnikov@sevgtu.sebastopol.ua

Zaritskaya E.I., Pryjmak M. V., Olejnikov A.M.

Estimation of magnetic system configuration influence on low-speed permanent-magnet synchronous generator characteristics.

Analysis and comparison of two low-speed magnetoelectric synchronous generators (with radial and tangential magnetization of permanent magnets on the rotor) for a wind power plant with identical stator dimensions are carried out. It is shown that, in the generator with surface location and radial magnetization of the magnets, pulsation of magnetic induction and electromagnetic moment is considerably lower. Results of the generator field and moments calculations for different geometric relations of the active part and the permanent magnet mass are given.

Key words – synchronous generator, permanent magnet, magnetic field, magnetic induction, modulation.