

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ МОДИФИКАЦИЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ЯВНОПОЛЮСНЫМ СТАТОРОМ

**В.В.Гребеников**, канд.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,  
e-mail: [elm1153@gmail.com](mailto:elm1153@gmail.com)

*Приведены результаты сравнительного расчета магнитного поля и электромагнитного момента электрогенераторов с постоянными магнитами и явно выраженными полюсами на статоре. При этом исследуются два типа конструктивных модификаций ротора – с тангенциальным и радиальным намагничиванием постоянных магнитов. Также для двух конструктивных модификаций электрогенераторов проведены оптимизационные расчеты при вариации наружного радиуса ротора, толщины полюсных наконечников статора и размеров постоянных магнитов. Показано, что при одинаковых внешних габаритах лучшим по величине тормозного момента является электрогенератор с тангенциальным намагничиванием постоянных магнитов. Библ. 7, рис. 5.*

**Ключевые слова:** электрогенератор, постоянные магниты, электромагнитный момент.

Рост цен на основные источники энергии, ухудшение экологической обстановки все острее ставят вопрос об использовании альтернативных источников энергоресурсов (энергии ветра, солнца, поверхностных вод и др.). Для удаленных от энергосетей объектов небольшой мощности оптимальными являются автономные системы энергоснабжения с применением аккумуляторов-накопителей электроэнергии. При этом для электроснабжения многих потребителей, например, оборудования навигационных буйев, освещения рекламных щитов, устанавливаемых вдали от населенных пунктов, достаточно мощности 300÷500 Вт [5]. В подобных случаях целесообразно применять ветроустановки с вертикальной осью вращения, которые обладают рядом преимуществ: независимость работы от направления ветрового потока, возможность размещения электрогенератора в основании ветроустановки, уменьшение шума и вибраций и т.д. Следует также отметить, что в последнее десятилетие начали появляться гидротурбины для работы в потоке с небольшой скоростью воды. Для этих целей также можно применять гидротурбины с вертикальной осью вращения (типа ротора Дарье). В Украине имеется много рек со скоростью течения от 0,5 до 1,5 м/сек, кинетическую энергию течения которых можно использовать. К преимуществам гидротурбины с ротором Дарье можно отнести следующее: простота конструкции, удобное соединение с электрогенератором (генератор может быть размещен на верхнем конце вертикального вала над поверхностью воды), малая гидродинамическая шумность [6]. Частота вращения как ветроротора, так и гидроротора малой мощности (300–500 Вт) зависит от диаметра ротора Дарье, скорости ветра или соответственно течения воды и составляет, как правило, около 200–250 об/мин.

Для ветро- и гидроэнергетических установок малой мощности чаще всего используются синхронные электрогенераторы на основе редкоземельных постоянных магнитов (ПМ) [2,5]. Это связано с тем, что частота вращения ротора у электрогенераторов невелика и необходимо применять многополюсную структуру. Стоимость редкоземельных постоянных магнитов, которые предлагаются сегодня на рынке, весьма значительна. Поэтому при разработке и проектировании электрогенераторов на основе ПМ существенное значение имеет конфигурация магнитной системы, которая должна быть оптимизирована по массе ПМ.

Целью данной работы является определение оптимальной конфигурации магнитной системы электрогенератора малой мощности с явнополюсным статором для двух типов конструктивных модификаций ротора – с тангенциальным и радиальным намагничиванием постоянных магнитов. При одинаковых внешних габаритах электрогенераторов варьировались следующие величины: внешний диаметр ротора, толщины полюсных наконечников и размеры постоянных магнитов.

Существует большое разнообразие конструктивных исполнений электрических машин с постоянными магнитами, в том числе и с явнополюсным статором [1,7]. Предварительные исследования показали, что возможно использовать конфигурацию магнитной системы статора без полюсных наконечников [3], которая позволяет получить ряд преимуществ: для уменьшения трудоемкости ка-



ширины полюсов насыщение железа статора уменьшается, но при этом и уменьшается сечение катушек статора. Поэтому при изменении ширины полюсов в кривой момента также есть точка оптимума. На рис 2, а показана зависимость массы ПМ от наружного радиуса ротора (от ширины полюсов масса ПМ не зависит).

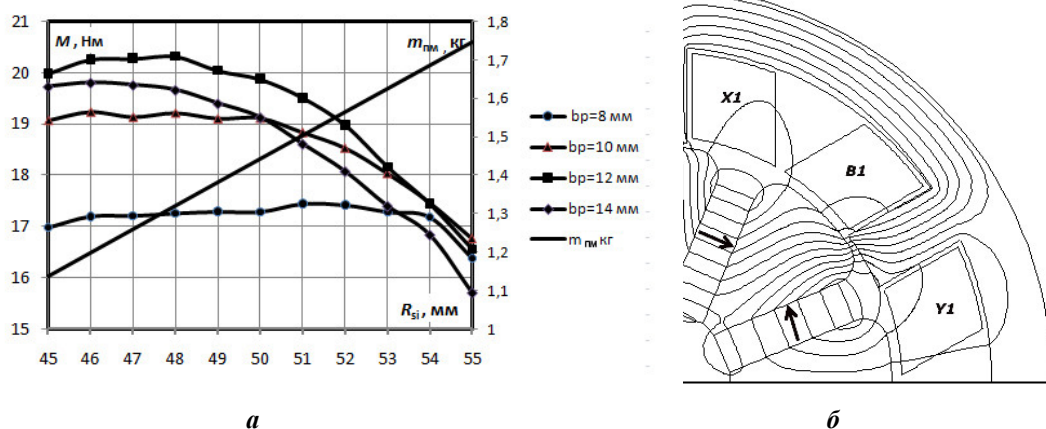


Рис. 2

Таким образом, оптимальным является вариант при наружном радиусе ротора, равном  $R_{si}=48$  мм, и, соответственно, оптимальной толщиной полюсов является  $b_p=12$  мм. При этих значениях достигается максимум момента, равный  $M_{opt(tang)}=20,2$  Нм, масса магнитов при этом равна  $m_{opt(tang)}=1,3$  кг.

На рис. 2, б показана картина магнитного поля в поперечном сечении исследуемого генератора для оптимальной конфигурации магнитной системы и для случая, когда ротор генератора находится в положении устойчивого магнитного равновесия. Стрелками указаны векторы намагниченности ПМ. Следует отметить, что для оптимальной конфигурации магнитной системы насыщение железа статора и ротора не наблюдается, средняя индукция в полюсах равна  $B_p=1,9$  Тл. В наиболее насыщенных участках концентраторов индукция равна  $B_{rot}=1,8$  Тл.

На втором этапе численных исследований определялась оптимальная конфигурация магнитной системы для ротора с радиальным намагничиванием ПМ (рис. 3). В этой конструктивной модификации при тех же  $R_{se}=79$  мм,  $l_{Fe}=100$  мм ширина полюсов и наружный радиус ротора имеют размеры такие же, как для оптимальной конфигурации электрогенератора с тангенциально намагниченными ПМ, т.е.  $b_p=12$  мм и  $R_{si}=48$  мм. В данном случае варьируемыми величинами выбраны следующие: толщина ПМ –  $h_m=3\div 12$  мм и угол раскрытия магнитов –  $\alpha=32\div 44$ . Во всех расчетах коэрцитивная сила ПМ, кривые намагничивания сталей, плотность тока в обмотках задавались такими же, как и в предыдущем случае, а электромагнитный момент вычислялся при  $\theta=22,5^\circ$ .

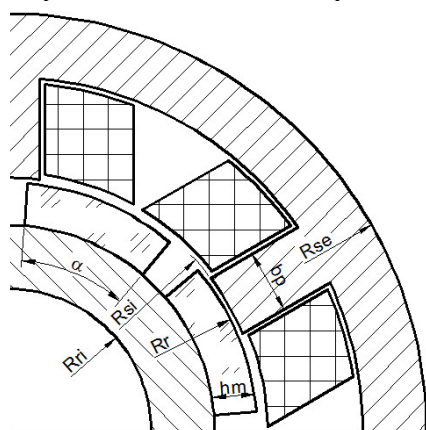


Рис. 3

Угол раскрытия магнитов  $\alpha$  также влияет на их массу и создаваемую ими МДС, при  $\alpha>40^\circ$  момент снижается. На рис. 4, а показана зависимость массы ПМ от их толщины  $\alpha=40^\circ$ . Таким образом, оптимальным является вариант при толщине ПМ, равной  $h_{PM}=8$  мм, и, соответственно, оптимальным углом раскрытия магнитов является  $\alpha=40^\circ$ . При этих значениях достигается максимум момента, равный  $M_{opt(rad)}=17,7$  Нм, масса магнитов при этом равна  $m_{opt(rad)}=1,45$  кг.

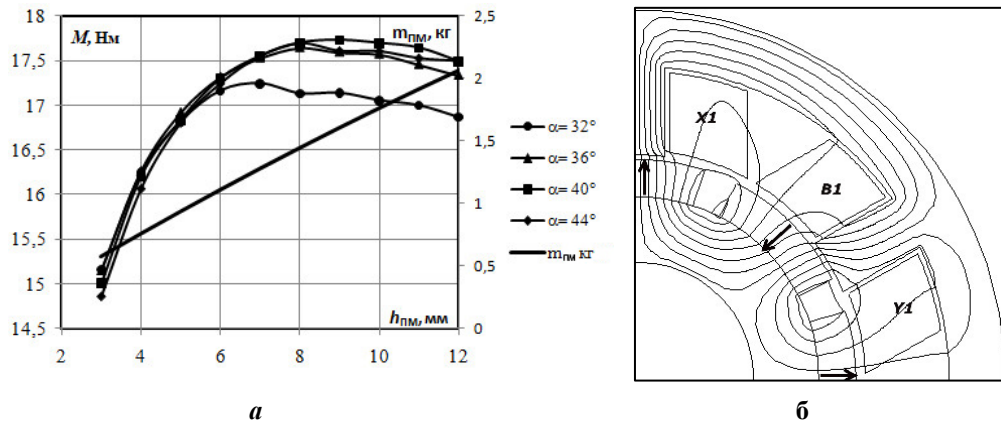


Рис. 4

На рис. 4, б показана картина магнитного поля в поперечном сечении генератора с радиально намагниченными ПМ для оптимальной конфигурации магнитной системы и для случая, когда ротор генератора находится в положении устойчивого магнитного равновесия. Векторы намагниченности ПМ указаны стрелками. Для этой модификации магнитной системы насыщение железа статора и ротора еще меньше, чем в предыдущей. Средняя индукция в полюсах статора равна  $B_p=1,7$  Тл. В наиболее насыщенных участках ротора индукция не превышает  $B_{rot}=0,8$  Тл. Таким образом, результаты численных исследований показали, что при одинаковых габаритах статора конструкция магнитной системы с тангенциальным намагничиванием ПМ (рис. 1) является предпочтительней по сравнению с конструкцией с радиальным намагничиванием ПМ (рис. 3). Для первого варианта конструкции электромагнитный момент генератора оказался примерно на 14% больше, чем у второго варианта, при этом масса магнитов у первого варианта примерно на 10% меньше.

Это связано, в первую очередь, с тем, что в модификации ротора с тангенциальным намагничиванием ПМ за счет ферромагнитных концентраторов удается получить эффект концентрации магнитного потока, создаваемого ПМ. Причем, этот эффект может быть еще большим при минимальной величине  $L_m$  между ПМ у немагнитного вала, однако по технологическим соображениям эта величина не может быть меньше 3 мм (ферромагнитные концентраторы должны крепиться к немагнитному валу с помощью винтов). Вышесказанное иллюстрирует рис. 5, на котором показана кривая распределения нормальной (радиальной) компоненты магнитной индукции  $B=f(\theta)$  по центру воздушного зазора в пределах одного полюсного деления  $\tau$  для двух рассмотренных конструктивных модификаций ротора генератора. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре зависит от конфигурации магнитной системы ротора: для модификации с тангенциальным намагничиванием ПМ максимальное значение нормальной компоненты магнитной индукции существенно выше, чем для модификации с радиальным намагничиванием, и график распределения нормальной компоненты магнитной индукции имеет меньше экстремумов. Графики распределения магнитной индукции в пределах одного полюсного деления приведены для случая, когда ротор находится в положении устойчивого магнитного равновесия, но аналогичная тенденция сохраняется и для всех других положений ротора относительно статора.

Таким образом, для оптимизированной конструктивной модификации электрогенератора с тангенциальным намагничиванием ПМ достигается максимум момента  $M_{opt(tang)}=20,2$  Нм, а значит, расчетное значение максимальной мощности генератора при частоте вращения  $n=250$  об/мин, составит примерно  $P_{рас}=500$  Вт.

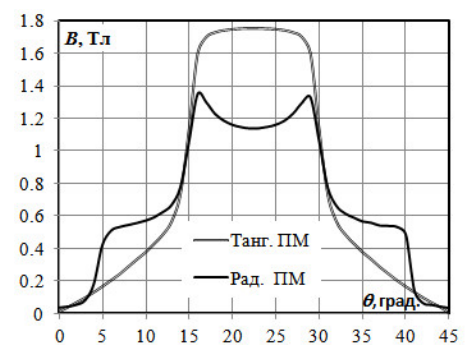


Рис. 5

**Выводы.** Конфигурация магнитной системы тихоходного электрогенератора малой мощности существенно влияет на его характеристики. Для двух конструктивных модификаций электрогенераторов проведены оптимизационные расчеты при вариации наружного радиуса ротора, толщины полюсных наконечников статора и размеров постоянных магнитов.

Анализ и сопоставление двух конструктивных модификаций генераторов с ПМ для ветро- или гидросиловой установки с тангенциальным и радиальным намагничиванием постоянных магнитов на

роторе показує, що генератор з тангенціальним намагнічуванням магнітів при ідентичних габаритних розмірах статора має більший електромагнітний момент ( $M_{\text{opt(tang)}}=20,2$  Нм,  $M_{\text{opt(rad)}}=17,7$  Нм) і меншу масу ПМ ( $m_{\text{opt(tang)}}=1,3$  кг,  $m_{\text{opt(rad)}}=1,45$  кг).

Розрахункове значення потужності для оптимізованого варіанта магнітної системи генератора при частоті обертання, рівній  $n=250$  об/мін, становить приблизно  $P_{\text{рас}}=500$  Вт.

1. Антонов А.Е., Радимов И.Н., Рышша В.В. Сопоставительный анализ вентильных двигателей с пассивным и активным ротором // Праці ІЕД НАН України. – 2005. – Вип. 1(10). – С. 53–57.
2. Гребеников В.В., Шымчак П.П., Прыймак М.В. Исследование электрогенератора с постоянными магнитами для малой ветро- и гидроэнергетики // Гідроенергетика України. – 2011. – № 3. – С. 40–45.
3. Гребеников В.В. Сравнительный анализ вентильных двигателей индукторно-реактивного типа и с постоянными магнитами на роторе // Праці ІЕД НАН України. – 2011. – Вип. 28. – С. 70–76.
4. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами // Електротехніка і електроенергетика. – 2009. – №2. – С. 57–60.
5. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю. Ветроустановки малой мощности. – К.: Наукова думка, 2011. – 590 с.
6. Каян В.П., Лебедь А.Г. Оптимизация работы модели водной турбины типа ротора Дарье с активным управлением лопастями // Відновлювальна енергетика. – 2011. – №4. – С. 46–54.
7. Радимов И.Н., Рышша В.В., Гулый М.В., Кравченко П.А. Исследования вентильного двигателя с внутренними постоянными магнитами при двух способах соединения фаз обмотки статора // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – №6. – С. 35–38.

УДК 621.313.17

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ МОДИФІКАЦІЙ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ І ЯВНОПОЛЮСНИМ СТАТОРОМ

**В.В.Гребеніков**, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,**

**пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: [elm1153@gmail.com](mailto:elm1153@gmail.com)**

*Наведено результати порівняльного розрахунку магнітного поля і електромагнітного моменту електрогенераторів з постійними магнітами і явно вираженими полюсами на статорі. При цьому досліджуються два типи конструктивних модифікацій ротора – з тангенціальним і радіальним намагнічуванням постійних магнітів. Також для двох конструктивних модифікацій електрогенераторів проведені оптимізаційні розрахунки при варіації зовнішнього радіуса ротора, товщини полюсних наконечників статора та розмірів постійних магнітів. Показано, що при однакових зовнішніх габаритах кращим за величиною гальмівного моменту є електрогенератор з тангенціальним намагнічуванням постійних магнітів. Бібл. 7, рис. 5.*

**Ключові слова:** електрогенератор, постійні магніти, електромагнітний момент.

### THE COMPARATIVE ANALYSIS OF LOW POWER ELECTRIC GENERATORS WITH A PERMANENT MAGNETS AND SALIENT POLE STATOR DESIGN MODIFICATIONS

**Grebenikov V.V.**

**Institute of Electrodynamics Academy of Sciences of Ukraine,**

**Peremohy av., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, e-mail: [elm1153@gmail.com](mailto:elm1153@gmail.com)**

*Comparative calculation results of magnetic fields and electromagnetic torque of electric generators with permanent magnets and salient poles on the stator are shown in this article. Two types of structural modifications of the rotor - with tangential and radial magnetization of permanent magnets are being studied as well. Also optimization calculations based on variations of the outer radius of the rotor, the pole tips thickness of the stator and size of permanent magnets for two structural modifications of electric generators are carried out. It is shown, when there are the same external dimensions, the best one according to the value of braking torque is the electric generator with tangential magnetization of permanent magnets. References 7, figures 5.*

**Key words:** electrical generator, permanent magnets, electromagnetic torque.

1. Antonov A.E., Radimov I.N., Ryshsha V.V. Comparative analysis of valve engines with passive and active rotor // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2005. – № 1(10). – Pp. 53–57. (Rus)
2. Grebenikov V.V., Shymchak P.P., Pryimak M.V. The study of electric generator with permanent magnets for small wind and water power engineering // Hidroenerhetyka Ukrainy. – 2011. – № 3. – Pp. 40–45. (Rus)
3. Grebenikov V.V. Comparative analysis of SRM type motors with BLDC type motors // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2011. – Vypusk 28. – Pp. 70–76. (Rus)
4. Grebenikov V.V., Pryimak M.V. Investigation of the influence of magnetic system configuration upon to the torque characteristics of electric motors with permanent magnets // Elektrotehnika і Elektroenerhetyka. – 2009. – №2. – Pp. 57–60. (Rus)
5. Dzenzerskii V.A., Tarasov S.V., Kostjukov I.Yu. Wind power machineries of low capacity. – Kyiv: Naukova dumka, 2011. – 590 p. (Rus)
6. Kaian V.P., Lebed A.G. Optimization of water turbine of Darrieus rotor type model operation on base with active control of blades // Vidnovliuvalna enerhetyka. – 2011. – №4. – Pp. 46–54. (Rus)
7. Radimov I.N., Ryshsha V.V., Gulyi M.V., Kravchenko P.A. Research of valve motor with internal permanent magnets when two ways of phase connection of stator windings are used // Elektrotehnika і Elektromekhanika. – 2010. – №6. – Pp. 35–38. (Rus)

Надійшла 20.11.2012

Received 20.11.2012