

**ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ВІД ВИХРОВИХ СТРУМІВ У РОТОРІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО
ГЕНЕРАТОРА ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ**

О.В.Макарчук, канд.техн.наук
Національний університет „Львівська політехніка”,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна.
e-mail: makar_lp@rambler.ru

Розглядається спосіб розрахунку магнітних втрат в полюсах ротора високошвидкісного генератора, що виготовлені з рідкоземельних постійних магнітів. Проведено аналіз впливу конструкційних факторів на величину цих втрат. Бібл. 7, рис. 6.

Ключові слова: високошвидкісний генератор, втрати від вихрових струмів, FEM-аналіз.

У випадках, коли технічні об'єкти, які обслуговують газорозподільні системи, знаходяться на значному віддаленні від центральної електромережі, економічно доцільно жити їх від автономного джерела на базі відносно невеликої газової турбіни, що сполучена з високошвидкісним електричним генератором – так званим турбодетандер-електрогенераторним агрегатом або турбодетандером. Досвідом проектування елементів генератора такого призначення хочеться поділитися в даній роботі.

Постановка задачі. Наявність високоефективних магнітотвердих матеріалів спонукає проєктантів використовувати їх у подібних розробках з метою покращення масо-габаритних показників та показників надійності. Однак, проектування високошвидкісних машин зі збудженням від постійних магнітів (ПМ) пов'язане з чималими складнощами технічного та технологічного характеру. Зокрема, такими проблемними частинами конструкції є опори, у яких обертається ротор. Підбір магнітопровідних матеріалів для осердя статора, конструкційних – для ротора, розробка способів кріплення полюсів теж не тривіальні.

У даному дослідженні акцентується увага на труднощах у розрахунках загального бюджету втрат високошвидкісної машини для подальшого оцінювання її теплового стану. За певних розмірів активної зони втрати у роторі складають значну частку від загальних втрат, спричиняючи його надмірний нагрів, та, як наслідок, теплове розмагнічування полюсів індуктора.

Відсутність відповідних методик проектування таких машин призвела до необхідності створення власних та проведення численних експериментальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Огляд та аналіз літературних джерел [1–4] підтвердив нашу впевненість, що одним із багатьох критичних показників, який може обмежувати можливість реалізації проєкту високошвидкісного генератора зі збудженням від ПМ, є величина поверхневих та пульсаційних втрат у полюсах індуктора. Це пояснюється відносно невеликим питомим електричним опором інтерметалічних сполук на основі NdFeB та SmCo, з яких виготовляють ПМ. Зокрема, питомі опори цих матеріалів, залежно від хімічного складу, знаходяться в межах $110 \div 170 \times 10^{-8}$ Ом·м та $70 \div 90 \times 10^{-8}$ Ом·м відповідно.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка алгоритму розрахунку поверхневих та пульсаційних втрат у полюсах з ПМ у комплексному взаємозв'язку з іншими чинниками, що впливають на перебіг електромагнітних процесів у машині, – насиченням магнітопроводу, реальним просторовим розподілом магнітного потоку індуктора, зубчастістю статора.

Основний матеріал. Зрозуміло, що для вирішення подібної задачі необхідно мати динамічне (у часі), принаймні 2-вимірне квазістаціонарне наближення магнітного поля \vec{B} та поля густини струму \vec{J} в розрахунковій області. Пізніше, за відомим полем \vec{J} можливо визначити втрати в об'ємі індуктора. Теоретичні засади таких розрахунків відомі давно, однак їхня практична реалізація потребує використання спеціалізованого програмного забезпечення. Втім, навіть за умови використання потужних САЕ-систем (англ. Computer-Aided Engineering) складність даної задачі закладена у її неklasичності. Так, поле \vec{J} необхідно визначати в області, яка, по-перше, є першопричиною його виникнення, по-друге, ця область обертається, по-третє, має доволі складну форму й безпосередньо контактує з іншими струмопровідними областями – валом, що одночасно виконує функцію ярма.

Загальновідомо, що розрахунок магнітного поля нелінійної в магнітному відношенні системи S , що задана в нормованому базисі розподілом координат $S(x, y, z)$ та густин струмів $\bar{J}(x, y, z)$, зводиться до розв'язування рівнянь [5]:

– рівняння Максвела (закону повного струму)

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J}, \quad (1)$$

де ∇ – диференційний оператор Гамільтона, для декартової системи координат він набуває виду $\nabla = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial}{\partial z}$; $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – одиничні орти, відповідно, по координатних осях x, y, z декартової системи (зауважимо, що символами $\nabla \times$ позначатимемо оператор *rot*, $\nabla \cdot$ – оператор *div*, а ∇ – оператор *grad*); \bar{H} – вектор напруженості магнітного поля; \bar{J} – вектор повної густини струму в області розрахунку S ;

– рівняння неперервності магнітного поля

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0, \quad (2)$$

– рівняння зв'язку між напруженістю та індукцією магнітного поля (характеристика намагнічування середовища)

$$\bar{H} = H[\bar{B}]. \quad (3)$$

У нелінійних системах –

$$\bar{B} = \mu \bar{H} + \mu_0 \bar{M}_0, \quad (4)$$

де $\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 \begin{vmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{vmatrix}$ – матриця магнітної проникності середовища, що залежить від напруженості поля; $\bar{M}_0 = \begin{vmatrix} M_x & M_y & M_z \end{vmatrix}_*$ – вектор залишкового внутрішнього намагнічування.

Використовуючи поняття векторного магнітного потенціалу \bar{A} , рівняння (2), за потреби, замінюють залежністю

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}. \quad (5)$$

Однак розв'язання задачі динаміки, а саме така задача постає перед проектувальником, який намагатиметься обчислити поверхневі та пульсаційні втрати в полюсах, потребує визначення невідомих складових вектора \bar{J} . Скористаємося для цього узагальненим законом Ома у вигляді

$$\bar{J} = \sigma (\bar{E} + [\bar{v} \times \bar{B}]), \quad (6)$$

де $\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$ – матриця електричної провідності середовища; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ – електропровідності у напрямках x, y, z відповідно; $\bar{v} = \begin{vmatrix} v_x & v_y & v_z \end{vmatrix}_*$ – вектор швидкості руху середовища; \bar{E} – напруженість електричного поля, яка пов'язана з магнітним полем законом електромагнітної індукції

$$\nabla \times \bar{E} = \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}. \quad (7)$$

Враховуючи (5), отримуємо рівняння

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nabla V, \quad (8)$$

де V – скалярний електричний потенціал зовнішнього поля, яке автоматично задовольняє двом рівнянням Максвела (1) та (2).

Отже, для будь-якої струмопровідної області з електричною провідністю σ , магнітною проникністю μ , враховуючи (6), (8), вектор повної густини струму

$$\bar{J} = \sigma \left(-\nabla V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + [\bar{v} \times \bar{B}] \right). \quad (9)$$

Таким чином, можна стверджувати, що повна густина струму \bar{J} містить три складових, а саме:

– складову, обумовлену стороннім електричним полем

$$\bar{J}_s = -\sigma \nabla V, \quad (10)$$

– складову, обумовлену зміною магнітного поля в часі — так званий «вихровий струм»

$$\bar{J}_e = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}, \quad (11)$$

– складову, обумовлену рухом середовища в магнітному полі, з урахуванням (5)

$$\bar{J}_v = \sigma [\bar{v} \times \bar{B}] = \sigma [\bar{v} \times [\nabla \times \bar{A}]]. \quad (12)$$

Враховуючи (1), (4) та (5), а також властивість подвійного векторного добутку $\nabla \times [\nabla \times \bar{A}] = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - (\nabla \cdot \nabla)\bar{A}$ та вимогу $\nabla \cdot \bar{A} = 0$, перетворимо ліву частину (1)

$$\nabla \times \bar{H} = \nabla \times \mu^{-1} [\nabla \times \bar{A}] = -\mu^{-1} \nabla^2 \bar{A}. \quad (13)$$

Рівняння (1) тепер виглядатиме так:

$$\mu^{-1} \nabla^2 \bar{A} = \sigma \nabla V + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \sigma [\bar{v} \times [\nabla \times \bar{A}]]. \quad (14)$$

Візьмемо дивергенцію від обох частин (14)

$$\nabla \cdot \left(\sigma \nabla V + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \sigma [\bar{v} \times [\nabla \times \bar{A}]] \right) = 0. \quad (15)$$

Це рівняння, яке свідчить що в будь-якій точці поля немає ні витоку, ні стоку ліній повного струму, разом з (5) та граничними умовами складає зміст математичного формулювання задачі розрахунку нестаціонарного магнітного поля з урахуванням навантажень електромагнітного та механічного походжень. Поле густини струму вираховується за формулою (9).

Зрозуміло, що аналітичні методи розв'язування краєвих задач для нелінійних середовищ не прийнятні, тому використано метод скінченних елементів (СЕ) – як один з найбільш ефективних для задач даного класу [6]. Розроблено алгоритм розв'язання цієї задачі, який реалізовано на мові APDL (ANSYS Parametric Design Language) в середовищі ANSYS. Інтегрування за часом здійснюється неявним методом Ейлера.

На рис. 1 показано рівень дискретизації розрахункової області для моделі генератора, технічне завдання на проектування якого окреслює наступні показники: повна потужність 97 кВА, фазна напруга 220 В, частота обертання 24000 об/хв. Основні розміри генератора: розрахункова довжина осердя – 200 мм, діаметр розточки статора – 91 мм, зовнішній діаметр осердя – 190 мм. Тут показано також величини повітряного проміжку та «відкриття» паза для цього варіанту конструкції.

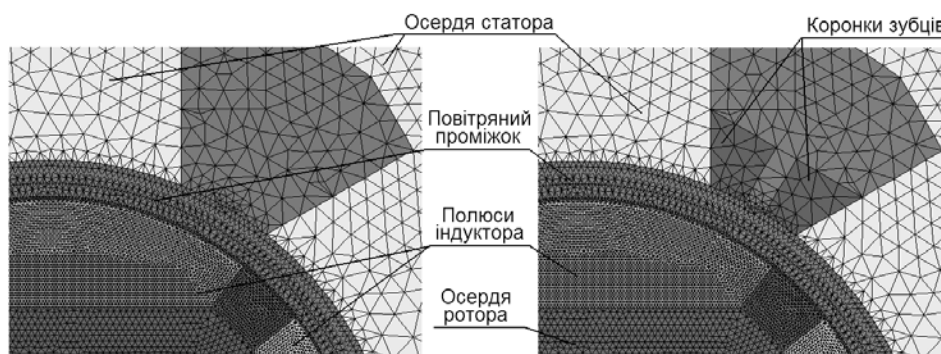


Рис. 1

Отримавши поле густини струму, втрати потужності на одиницю довжини у 2-вимірних струмопровідних областях знаходитимемо як

$$P_n = \sigma^{-1} \int_0^S |\bar{J}|^2 dS, \quad (16)$$

де dS – площа елементарної ділянки.

Після алгебризації (16) вираз для знаходження втрат потужності в полюсах індуктора, обумовлених дією вихрових струмів, виглядатиме так:

$$P_n = \sigma^{-1} \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |J_{zn}|^2 \right) S_k l_k, \quad (17)$$

де J_{zn} – модуль вузлового значення проекції на вісь z вектора густини струму; $n = \overline{1, N}$ – біжучий номер вузла в межах одного СЕ; $k = \overline{1, K}$ – біжучий номер СЕ, що належить струмопровідній області S ; $S_k l_k$ – об'єм k -го СЕ площею S_k та довжиною l_k .

На рис. 2 у вигляді растрового зображення показано поле вектора густини струму в полюсах та валу індуктора вищезгаданого генератора. Пази відкриті, повітряний проміжок становив 2 мм, частота обертання ≈ 18000 об/хв. Як видно з рисунку, на поверхні полюсів в зонах A та B , де найбільшою є пульсація індукції в повітряному проміжку, густина струму теж досягає максимального значення. В зоні $A \approx -14$ А/мм², а в зоні $B \approx +12$ А/мм². Зона C відповідає нульовому рівню J_{zn} .

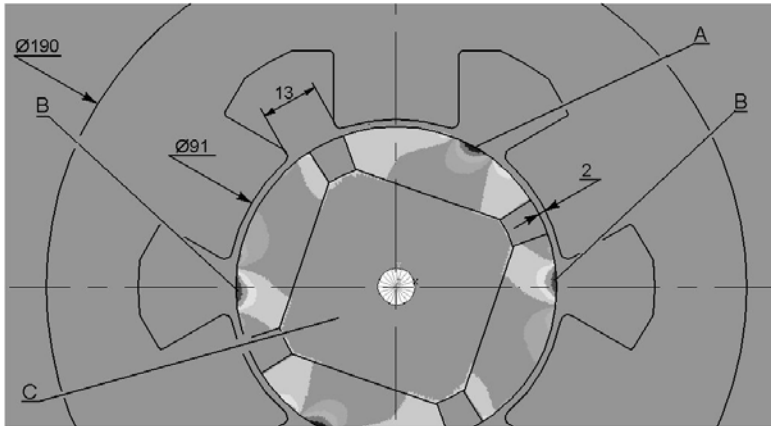


Рис. 2

Поле вектора \vec{J} та відповідні магнітні втрати розраховувалися в залежності від частоти обертання. Результати розрахунків середніх значень втрат P_n в одному з полюсів за повітряних проміжків у 2 мм та 6 мм показано на рис. 3.

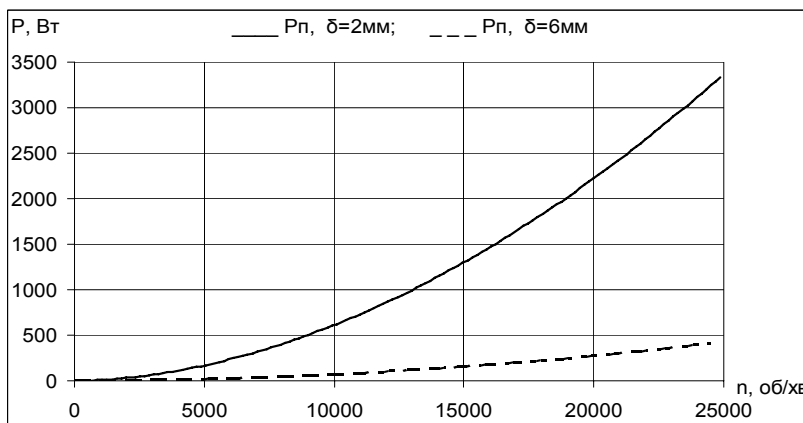


Рис. 3

За проміжку 2 мм та регламентованої частоти обертання вони сягають ≈ 3 кВт, тобто в 4-полюсному роторі виділятиметься ≈ 12 кВт теплових втрат! Поверхня охолодження проектованої машини з активною довжиною 200 мм (навіть за умови примусового охолодження) не здатна віддати таку кількість тепла. Одним із шляхів зменшення втрат є збільшення величини повітряного проміжку. Розрахунки показують, що за проміжку в 6 мм втрати у полюсі зменшуються майже в 10 разів. Причиною зменшення є падіння амплітуди пульсації індукції в проміжку та зменшення робочого магнітного потоку.

За рахунок зменшення зовнішнього діаметра ротора та відповідних розмірів магнітів площа його нейтрального перерізу зменшилася на $\approx 10\%$, висота в середній частині полюса не змінювалася, магнітний потік машини знизився на 29%. Це підтверджує просторовий розподіл радіальної складової B_r вектора \vec{B} , зображений на рис. 4, a – за різних повітряних проміжків, на рис. 4, b – за різної ширини шліца.

Для моделі генератора з відкритим пазом ($b_u = 13$ мм) та проміжком $\delta = 2$ мм, на рис. 5, a показано залежності від кутового положення ротора миттєвих значень втрат у полюсі за різних частот обертання.

Для цієї ж машини рис. 5, b відображає зміну густини струму в одному з поверхневих вузлів сітки СЕ, розташованому під серединою полюса. Очевидним стає вплив зубцевої гармоніки поля.

Подальші дослідження проводилися у напрямі аналізу співвідношень розмірів паза.

Тип обмотки статора та технологія її виготовлення вимагали застосування повністю відкритого паза та зубців з паралельними стінками, що забезпечувало технологічне вкладання такої обмотки. Однак проведені дослідження показали, що визначальним, з погляду втрат в полюсі, є ширина шліца між коронками зубців $b_{ш}$, або, іншими словами, «відкриття» паза. Саме цей розмір істотно змінює амплітуду пульсації поля в проміжку. На рис. 4, б представлено розподіл радіальної складової поля \vec{B} для пазів з різним «відкриттям».

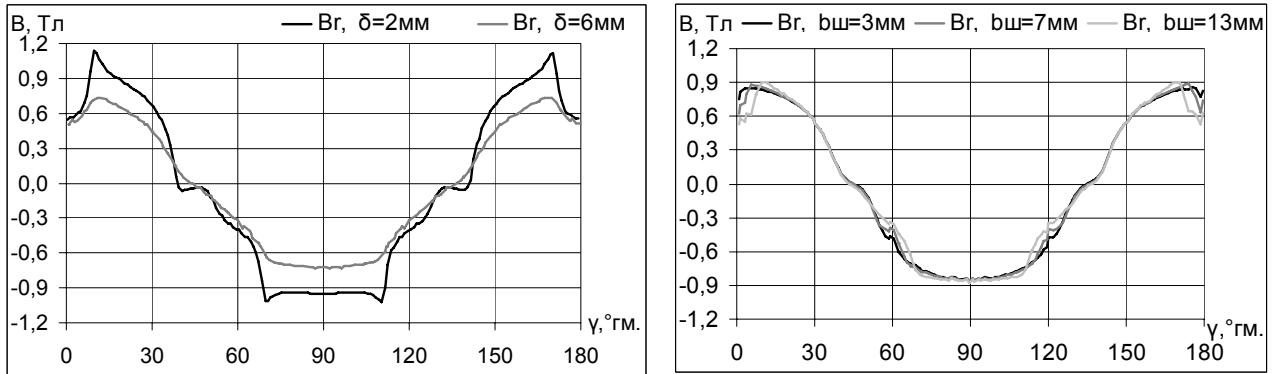


Рис. 4, а, б

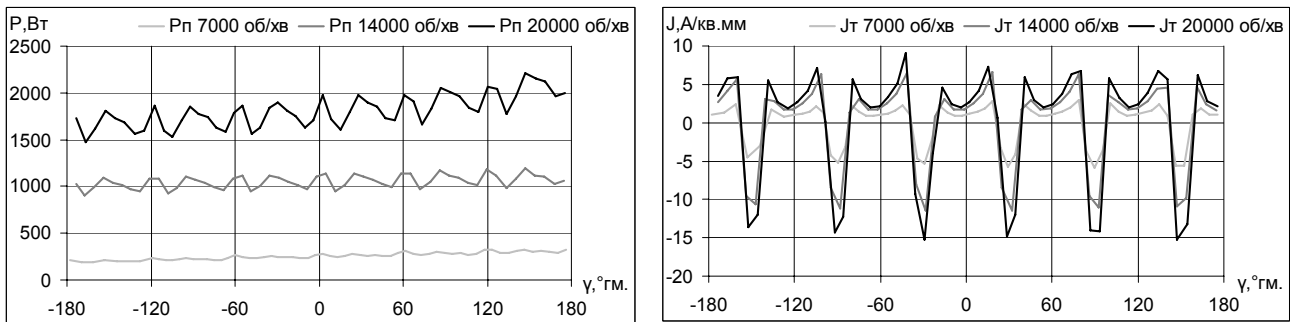


Рис. 5, а, б

У зв'язку з необхідністю зменшення «відкриття» паза вирішено застосувати клини спеціальної форми, виготовлені з порошкового магнітопровідного матеріалу Somaloy® 700 1P [7], які, з одного боку, забезпечують прийнятний рівень потоку пазового розсіювання (на початку кривої намагнічування цей матеріал має $\mu_r = 530$), а з іншого – виконують функцію фіксації котушок обмотки в пазах.

Залежності магнітних втрат у полюсі від частоти обертання за різного «відкриття» паза показано на рис. 6. Повітряний проміжок у цих дослідках становив 5 мм, а ширина шліца $b_{ш} = 13$ мм відповідала «відкритому» пазу.

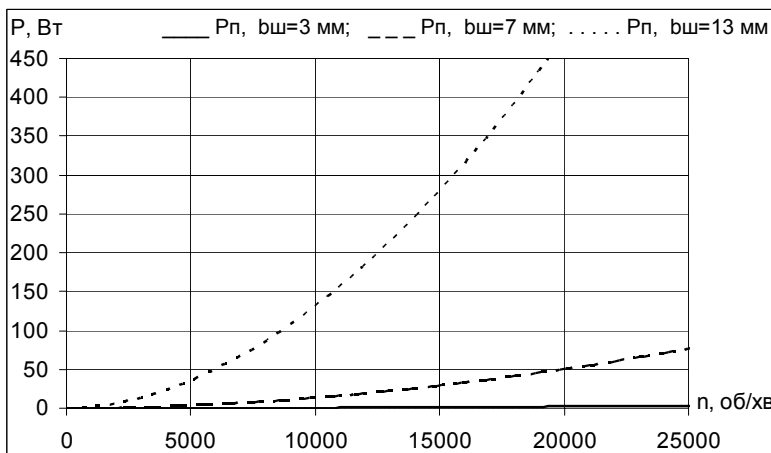


Рис. 6

повідідала «відкритому» пазу.

Висновки. Розроблено математичну модель високошвидкісного генератора зі збудженням від постійних магнітів, яка дозволяє визначати поверхневі та пульсаційні втрати в роторі на підставі розрахунку поля густини струму у 2-вимірному формулюванні з урахуванням найважливіших чинників, що впливають на перебіг процесу перетворення енергії: насичення магнітопроводу, конфігурації зубцевої зони, просторового розподілу потоку індуктора у відпо-

відності до форми його полюсів та їхнього розташування. З'ясовано, що при визначенні величини повітряного проміжку у генераторах зі збудженням від висококоерцитивних постійних магнітів необхідно брати до уваги не лише розмагнічуючу дію реакції якоря, а й величину поверхневих та пульсаційних втрат у роторі. У високошвидкісних машинах зі збудженням від ПМ зубцева зона на статорі повинна мати напівзакриті пази, ширина шліца повинна забезпечувати потік розсіювання, що замикається через коронку зубця, не більше 5% від повного потоку машини. Враховуючи характерний розподіл густини струму «вихрового» походження в роторі (рис. 2), з метою зменшення магнітних втрат можемо рекомендувати аксіальну та радіальну розбивку полюсів індуктора на окремі, ізольовані одна від одної частини (сегменти).

1. Aglen O. Loss calculation and thermal analysis of a high-speed generator. Proc. of IEMDC, 2003. – Pp. 1117–1125.
2. Aglen O. Back-to-back tests of a high-speed generator. Proc. of IEMDC, 2003. – Pp. 1084–1090.
3. Kano M., Noguchi T. Efficiency Improvement and Loss Analysis of Ultra-High Speed Permanent-Magnet Motor. The International Workshop on Mechatronics, 2006, Thailand.
4. Perryman R., M C Mhango L. High Efficiency High Speed PM Motors for the More Electric Aircraft. Proc. of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Portugal, 2006. – Pp. 368–375.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.
6. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов (для радионженеров и инженеров-электриков).: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
7. <http://www.hoganas.com>.

УДК 621.313.292

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ ОТ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В РОТОРЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЕНЕРАТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

А.В.Макарчук, канд.техн.наук, e-mail: makar_lp@rambler.ru

Национальный университет „Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина.

Рассматривается способ расчета магнитных потерь в полюсах ротора высокоскоростного генератора, которые изготовлены из редкоземельных постоянных магнитов. Проведен анализ влияния конструкционных факторов на величину этих потерь. Библ. 7, рис. 6.

Ключевые слова: высокоскоростной генератор, потери от вихревых токов, FEM-анализ.

EDDY CURRENTS LOSSES IN A ROTOR OF THE HIGH-SPEED GENERATOR WITH THE PERMANENT MAGNET EXCITATION

Makarchuk O. e-mail: makar_lp@rambler.ru

Lviv Polytechnic National University, str. S.Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine.

Design aspects of the high-speed generator with permanent magnet excitation are considered. These aspects are connected with calculation of superficial and pulsating losses in rotor poles. The algorithm of the calculation of a part of these losses conditioned by eddy currents, using FEM-analysis, is given. It is demonstrated an application of this algorithm on example of a 97 kVA generator, 24000 rpm. An influence on the sizes of an active zone on value of these losses, particularly the sizes of the air gap and “opening” slot, is discovered. As it turned out, when a configuration of an active zone of the generator is incorrect, value of such losses can reach a prohibitive amount. It is recommended to apply half-closed slots to decrease these losses on stator. And to make rotor poles segmented, both in axial and in tangential directions. References 7, figures 6.

Key words: high-speed generator, eddy currents losses, FEM-analysis.

1. Aglen O. Loss calculation and thermal analysis of a high-speed generator, Proc. of IEMDC, 2003. – Pp. 1117–1125.
2. Aglen O. Back-to-back tests of a high-speed generator, Proc. of IEMDC, 2003. – Pp. 1084–1090.
3. Kano M., Noguchi T. Efficiency Improvement and Loss Analysis of Ultra-High Speed Permanent-Magnet Motor. – The International Workshop on Mechatronics, 2006, Thailand.
4. Perryman R., M C Mhango L. High Efficiency High Speed PM Motors for the More Electric Aircraft. – Proc. of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Portugal, 2006. – Pp. 368–375.
5. Ivanov-Smolenskii A. Electromagnetic fields and processes in electric machines and their physical modeling. – Moskva: Energiia, 1969. – 304 p. (Rus)
6. Silvester P., Ferrari R. Finite element method (for radio engineers and engineers-electricians). – Moskva: Mir, 1986. – 229 p. (Rus)
7. <http://www.hoganas.com>.

Надійшла 25.01.2012

Received 25.01.2012