

## ЯВНОПОЛЮСНИЙ ВЕНТИЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР З U-ПОДІБНИМ СТАТОРОМ

© Ткачук В. І., Біляковський І. Є., Каша Л.В., Шаповалов І.Г., 2013

Запропоновано методику проектування генератора з постійними магнітами на роторі та U-подібними елементами магнітопроводу на статорі. Обґрунтовано рекомендації щодо проектування з урахуванням особливостей конструкції та на підставі теорії електромагнітного перетворення енергії, які покладені в основу проектного розрахунку основних геометричних розмірів такого генератора. Наведено зовнішні характеристики для різних швидкостей обертання генератора з постійними магнітами, спроектованого з використанням запропонованої методики.

**Ключові слова:** вентильний генератор, постійні магніти, U-подібний статор.

The design method of brush-less generator with permanent magnets on the rotor and U-similar elements on the stator is given. Recommendations are grounded in relation to designing taking into account the features of construction and on the basis of theory of electromagnetic transformation of energy. These recommendations are taken as a basis of project calculation of basic geometrical sizes of such generator. A generator with permanent magnets, created with the use of the offered method is described. External characteristics for different speeds of rotation are given. The results of the conducted researches of the created generator testify the sufficient level of adequacy.

**Key words:** brush-less motor, permanent magnets, U-similar stator.

### Вступ

За останні роки у сучасних електромеханічних перетворювачах, як у двигунах, так і в генераторах обмеженої потужності, все частіше застосовують збудження від високоенергетичних постійних магнітів (ПМ). Деякі конструктивні і техніко-експлуатаційні переваги таких перетворювачів сприяють збільшенню їх виробництва в провідних електромашинобудівних компаніях.

На кафедрі електричних машин і апаратів Національного університету “Львівська політехніка” розроблено низку електроприводів на базі вентильних двигунів (ВД). З-поміж відомих конструкцій магнітопроводів статора електромеханічного перетворювача (ЕМП) ВД, найбільш раціональних з погляду технології, в основному застосовувались конструктивні схеми з U-подібним та псевдо-U-подібним статорами (рис. 1, 2), які в кожному конкретному випадку можуть мати свої переваги [1].

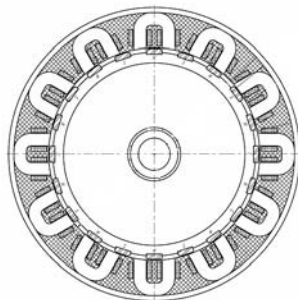


Рис. 1. Конструкція генератора з ПМ на роторі та з U-подібними елементами на статорі

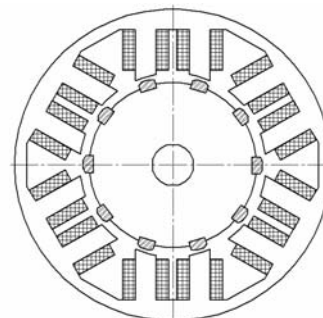


Рис. 2. Конструкція генератора з ПМ на роторі та з псевдо-U-подібним статором

Такі конструкції, поряд з класичною, забезпечують кращі динамічні показники за менших індуктивності розсіяння та реакції якоря внаслідок практично повної магнітної ізоляції фаз. Однак кількість зубців статора тут повинна бути достатньо великою, що може бути корисним при використанні їх для ЕМП із порівняно невисокими швидкостями обертання та великих діаметрів.

### **Аналіз останніх досягнень і публікацій**

Зазвичай, для розроблених ВД передбачено режими роботи як двигуна, так і генератора, зокрема, для динамічного гальмування. Тому доцільним видається застосування згаданих конструктивних схем магнітопроводів у ЕМП генераторних установок обмеженої потужності та невисоких швидкостей обертання, зокрема, для вітрогенераторів.

Оскільки на території нашої країни переважають вітри з малими та середніми швидкостями, варто використовувати вітроенергоустановки малої потужності, переважно з вертикальною віссю обертання. Такі установки повинні працювати з високою енергетичною ефективністю, тому в них застосовують синхронні генератори з постійними магнітами, активні напівпровідникові перетворювачі та акумуляторну батарею. Такий активний випрямляч напруги повинен забезпечити максимальний відбір потужності вітру за різних його швидкостей, ефективний заряд-розряд акумуляторної батареї та режим роботи генератора з максимальною ефективністю з урахуванням втрат [2]. Особливості конструкції вітроустановки з вертикальною віссю обертання, такі як відсутність редуктора та розміщення генератора внизу установки, дають можливість використовувати тихохідні генератори з порівняно великим діаметром, зокрема конструктивні схеми з U-подібним та псевдо-U-подібним статорами.

Для генераторів, як і для двигунів, відмінності в конструкціях магнітопроводів і не однакові шляхи замикання робочих магнітних потоків, зумовлюють необхідність створення методик проектування ЕМП, які дещо відрізняються між собою. Розрахунок магнітної системи такого генератора із достатньою точністю може бути здійснений, подібно, як і двигуна [1], з урахуванням на початковому етапі тільки найважливіших впливаючих чинників.

### **Мета роботи**

Метою роботи є удосконалення інженерних методик розрахунку та оптимізації основних геометричних розмірів генератора з постійними магнітами та U-подібним статором на етапі його проектування та отримання відповідних співвідношень для основних показників.

### **Матеріали і результати дослідження**

Розрахунок генератора з постійними магнітами, як і двигуна, складається з двох частин: визначення основних розмірів і перевірний розрахунок. Основні розміри генератора із постійними магнітами визначаються, зазвичай, розмірами системи збудження. На відміну від методик розрахунку основних розмірів відомих типів електричних машин, які базуються на виборі величин електромагнітних навантажень, враховуючи досвід проектування, для генератора з ПМ на роторі та з U-подібним статором такий досвід обмежений. Отже, рекомендації щодо проектування обґрунтовано, враховуючи особливості конструкцій магнітопроводу, на підставі теорії електромеханічного перетворення енергії.

Для ЕМП генератора такої конструкції з U-подібним статором співвідношення між кількістю зубців статора і полюсів (постійних магнітів) ротора розраховуємо як (1):

$$2p = Z_s \cdot \frac{2 \cdot m \pm 1}{2 \cdot m}; \quad Z_s = m \cdot q; \quad q = 4, 6, 8, \dots, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість секцій.

Зазвичай, у технічному завданні на проектування генератора задають напругу живлення, частоту обертання та потужність, а тому пошук геометричних розмірів ЕМП та їх співвідношень здійснюють, відштовхуючись від значення  $2p$  та заданої потужності за номінальної швидкості обертання (фактично, визначеного з інших заданих значень, величини електромагнітного моменту).

Проте, електромагнітний момент може бути пов'язаний з різними величинами залежно від розв'язуваної задачі. На стадії ескізного проектування електромагнітний момент доцільно розглядати у зв'язку з основними розмірами генератора і електромагнітними навантаженнями. Під час технічного проектування потрібна залежність електромагнітного моменту від розмірів і обмотувальних даних, від форми і параметрів постійного магніту. Тут же необхідні оцінка кількості витків котушок для прийнятої схеми з'єднань, густини струму тощо.

Як свідчать теоретичні та експериментальні дослідження, співвідношення між геометричними розмірами елементів зубцево-полюсної зони генератора із сучасними магнітами знаходяться приблизно в таких самих межах, як і для двигуна [1]. Зокрема оптимальні значення коефіцієнта полюсного перекриття статора знаходяться в межах  $\alpha_s = (0.38 \div 0.42)$ , а коефіцієнта полюсного перекриття ротора генератора – в межах  $\alpha_m = (0.5 \div 0.6)$ . Висота магніту, зазвичай, визначається з умови максимуму створюваної енергії у повітряному проміжку та мінімуму зубцевих моментів і переважно у 4–5 разів більша за повітряний проміжок, який, своєю чергою, вибирають значним. Тобто, визначення діаметра індуктора, фактично, можна розпочати з вибору індукції  $B_\delta$ , (а, отже, типу магніту та площі полюса  $S_m$ ) в повітряному проміжку для випадку, коли вісь полюса збігається з серединою зубця. Попередньо оцінку початкового значення індукції  $B_\delta$  здійснюють з використанням діаграми вибраного типу магніту [3], керуючись обраними критеріями оптимальності.

Для уточнення значень провідностей розсіяння ПМ, можна враховувати реальний розподіл магніторушійної сили (МРС) по висоті ПМ. Розподіл МРС ПМ і його потоків розсіяння можна знайти для конкретної конструкції з розв'язку диференціальних рівнянь магнітного поля числовими методами за допомогою комп'ютера. Часто в інженерній практиці умовно вважають, що МРС магніту змінюється лінійно. Для призматичного магніту, МРС якого змінюється по висоті від нейтрального перерізу  $S_m$  за лінійним законом, провідність розсіяння з бокової поверхні можна визначити:

$$A_{\sigma 2} = \frac{\Phi_{\sigma 2}}{F_m} = \mu_0 \frac{l_m}{h_m} \int_0^{h_m} \frac{y dy}{l_{y2}}, \quad (2)$$

де  $l_m$ ,  $h_m$ ,  $l_{y2}$ ,  $y$  – довжина і висота магніту, усереднена довжина умовної силової лінії розсіяння магніту і змінна координата за висотою магніту відповідно. Так само визначається приведена провідність розсіяння з торцевої поверхні магніту  $A_{\sigma 1}$  [3].

Провідність розсіяння між двома робочими поверхнями полюсів визначається як провідність між двома еквіпотенціальними поверхнями, оберненими в протилежні боки.

Сумарна приведена провідність розсіяння магніту у вільному стані:

$$A_{\sigma m} = 2A_{\sigma 1} + 2A_{\sigma 2} + A_{\sigma 3}. \quad (3)$$

Згідно з [1] струм секції можна виразити залежно від номінального моменту, а забезпечити необхідний електромагнітний момент генератора можна за різних комбінацій значень максимального потоку  $\Phi_{max}$  магніту, повного струму секції  $w_z I_c$  та коефіцієнта  $c_M$ , який залежить від геометрії зубцево-полюсної зони генератора і параметрів обраного постійного магніту.

Як вказано в [1], після визначення необхідного максимального потоку  $\Phi_{max} = S_m B_r$ , ширини  $a_m$  та довжини  $b_m$  вибраного постійного магніту, діаметр індуктора знаходять за формулою  $D = 2pb_m / \pi\alpha_m$ . Розміри U-подібних елементів магнітопроводу статора визначаються, залежно від необхідної площі поперечного перетину котушки секції, за відомими методиками.

Після попереднього вибору діаметра ротора, за методикою [1] уточнюють отримані значення основних величин та у випадку істотного розходження із заданими, повторюють розрахунки за уточненими даними.

Наведені міркування та співвідношення покладені в основу методики проектного розрахунку основних геометричних розмірів генераторів з ПМ та U-подібним статором, із використанням якої створено генератор з ПМ із такими даними: діаметр розточки статора  $D = 200$  мм; аксіальна дов-

жина ротора  $l = 40$  мм; номінальна швидкість обертання  $n = 400$  об/хв; напруга після випростувача  $U = 200$  В. На статорі розташовано 12 U-подібних елементів типу ШЛ (рис.1), шихтованих з електротехнічної сталі, з двома обмотками на кожному елементі.

Обмотка статора виконана з ізолюваного мідного провідника типу ПЭТВ. Аксіальна довжина магнітопроводу статора – 40 мм. На роторі розташовано 20 постійних магнітів (SmCo) розміром  $15 \times 40 \times 5$  мм. Вибрано магніт типу SmCo<sub>5</sub> з параметрами:  $\Phi_{max} = 250$  іА;  $B_r = 1,1$  Тл;  $H_{cf} = 600$  кА/м.

На рис. 3 наведено зовнішні характеристики для різних швидкостей обертання генератора. Зовнішні характеристики мають лінійний характер з помірною жорсткістю. Похибка отриманих результатів не перевищує 5 %.

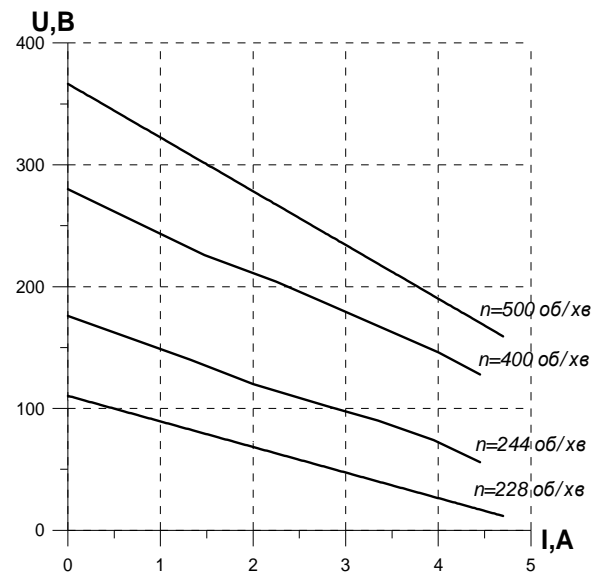


Рис. 3. Зовнішні характеристики генератора

### Висновки

Отримані залежності покладені в основу методики проектного розрахунку основних геометричних розмірів генераторів з постійними магнітами та U-подібним статором. Результати проведених досліджень створеного з використанням наведеної методики генератора свідчать про достатній рівень адекватності.

1. Ткачук В.І. Методика проектування вентильних двигунів з високоенергетичними постійними магнітами / Ткачук В.І., Біляковський І.С., Біловус Р.О. // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62) Ч. 2, Кременчук, 2012. – С. 79–82. 2. Щур І.З. Оптимальне керування електричним навантаженням синхронного генератора з постійними магнітами у вітроенергетиці / І.З. Щур, О.Р. Турленко // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» Науково-технічний журнал «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів, 2009. – С. 321–324. 3. Ткачук В.І. Математична модель вентильного двигуна з явноплюсним статором / В.І. Ткачук, Р.К. Василів // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Вип.1/200. – Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 57–60.