

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 620.92

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ
СИСТЕМИ ПРОТОЧНОГО ВІТРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО
НАГРІВАЧА**

Галько С. В., к.т.н. <https://orcid.org/0000-0001-7991-0311>

Вершков О. О., к.т.н. <https://orcid.org/0000-0002-5549-4701>

Леженкін О.М., д.т.н. <https://orcid.org/0000-0003-2822-8173>

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: galkosv@gmail.com

Анотація - в статті виконано аналіз вітчизняних і закордонних перетворювачів енергії вітру безпосередньо в теплову енергію з метою використання у системах побутового гарячого водопостачання та опалення. Розроблено проточний вітроелектромеханічний нагрівач, принцип дії якого заснований на збудженні вихрових струмів у магнітопроводі. Для дослідження електромагнітних процесів у магнітопроводі нагрівача, розроблено і експериментально досліджений макет магнітної системи. Отримані залежності зміни електромагнітних величин у повітряному прошарку зубцевої зони макету при регулюванні повітряного прошарку та взаємного розташування зубців. Результати досліджень, що отримані, рекомендується використанні при проектуванні і розрахунку малопотужних індукційних перетворювачів енергії вітру в теплову енергію для тепловодопостачання невеликих домогосподарств.

Ключові слова: поновлювані джерела енергії, вітрова енергія, вітроенергетична генерація, перетворення енергії, індуктивні перетворювачі, опалення.

Постановка проблеми. Головними завданнями світової політики у сфері альтернативних джерел енергії є збільшення виробництва і споживання енергії, яка виробляється відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), з метою економічного використання традиційних паливно-енергетичних ресурсів. Сучасна вітроенергетика - одна з найбільш розвинутих і перспективних галузей відновлюваної енергетики. Енергія вітру є одним з джерел відновлюваної енергії, яка найбільш швидко розвивається у продовж останнього десятиріччя, забезпечуючи біля 3% світового споживання електроенергії [1,2].

Специфіка аграрного виробництва і невеликих домогосподарств обумовлена відносно незначним споживанням електроенергії на одиницю земельної площі, вимагає широкомасштабного розвитку малої вітроенергетики, техніка для якої, виходячи з технічних вимог приєднання до енергосистем, обмежується потужністю до 20 кВт. Маркетингові дослідження ринку вітроенергетичного обладнання доводять, що невеликі споживачі мають наміри використовувати вітроустановки для забезпечення своїх потреб (наприклад, в якості джерел живлення виробничого і побутового обладнання, в системах гарячого і холодного водопостачання, опалення приміщень, освітлення, зарядки автотракторних акумуляторів і таке інше).

Дослідження в галузі малої вітроенергетики свідчить про те, що світовий ринок цієї галузі відновлюваної енергетики перебуває на початковій стадії розвитку. І, відповідно прогнозам Світової вітроенергетичної асоціації, приріст світового сектору малої вітроенергетики з 2015 року складає близько 125 МВт у рік.

Виробничники пристроїв для малої вітроенергетики зосереджені у п'яти країнах (Канада, Китай, Німеччина, Англія та США) і займають майже 50% світового ринку [3].

Не дивлячись на великий прогрес у розвитку вітроенергетики у світі, ще не налагоджений серійний випуск невеликих вітроагрегатів – електричних, механічних, млинів тощо [4,5]. Серед факторів такого стану треба відмітити наступне:

- недостатня увага з боку держав до розвитку малої вітроенергетики;
- відсутність державного стимулювання виробників і споживачів малої вітротехніки;
- значна нехватка спеціалістів з проектування і виготовлення вітродвигунів;
- недостатня реклама переваг вітроенергетичної техніки.

Актуальність і перспективність використання у світі вітроустановок невеликої потужності підсилилася внаслідок інтенсифікації дачного будівництва, розвитку фермерських господарств і великої чисельності споживачів, які віддалені від джерел електричної енергії [3].

Такий стан питання створює народногосподарську проблему забезпечення невеликих споживачів різними видами енергії та зниження споживання електроенергії, що отримана традиційними способами. Вирішення цієї проблеми неможливо без вирішення відповідної науково-технічної задачі, яка постає у розробці, дослідження, обґрунтуванні параметрів і режимів функціонування вітроелектромеханічних пристроїв для перетворення енергії вітру в

електричну або безпосередньо в теплову енергію.

Вирішення цієї науково-технічної задачі включає проведення експериментальних досліджень і побудову за їх результатами математичних моделей, моделювання технологічного процесу перетворення енергії вітру у теплову енергію з використанням наукової моделі, виробничу перевірку розробленого вітроелектромеханічного перетворювача.

У даній роботі приводиться частина досліджень, що включає експериментальні дослідження зміни електромагнітних величин у повітряному прошарку магнітної системи проточного індукційного вітроелектромеханічного нагрівача (для нагрівання води або антифризу. Розробка відноситься до галузі малої вітроенергетики. Прикладне значення - нагрівач призначений для прямого перетворення енергії вітру в теплову енергію і рекомендується для використання у системах гарячого водопостачання невеликих приватних домогосподарств, фермерських господарств і інших побутових перетворювачів з метою енергозбереження традиційних джерел енергії (електроенергії, природного газу тощо), що істотно відрізняє його від традиційних систем отримання теплової енергії (енергія вітру перетворюється в електричну, а потім за допомогою різноманітних електричних нагрівачів отримують теплову енергію [6-8]).

Для обґрунтування параметрів магнітної системи вітроелектромеханічного нагрівача розроблений макет зубчасті магнітної системи і приведені результати експериментальних досліджень зміни електромагнітних величин у повітряному прошарку системи.

Аналіз останніх досліджень. На даний час відомі способи і пристрої призначені для перетворення енергії вітру у теплову енергію. На о. Гримсей (біля північних берегів о. Ісландія) досліджувалася установка прямого перетворення енергії вітру в теплоту за допомогою водяного гальма. Недолік установки - громіздкість, що ускладнює її використання у фермерських господарствах [9].

Відома вітротеплова установка [10], яка запатентована у США, до складу якої входить електронагрівач, робота якого основана на збудженні вихрових струмів. Вертикально розташований ротор електронагрівача приводиться до обертання від горизонтального валу вітродвигуна через конічний редуктор, розташований на даху будівлі. Недоліком відомої вітротеплової установки [10] є її низька надійність і негативний вплив на самопочуття жителів, із-за розташування конструкції з конічним редуктором на даху будівлі.

У Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного запропонований індукційний спосіб

перетворення енергії вітру у теплову, який вигідно відрізняється від відомих [11] і установки для його реалізації, які основані на збудженні вихрових струмів у магнітопроводах [12]. В якості привідного двигуна використана повітряна турбіна з вертикальною віссю [13].

Формулювання цілей статті. Розробка та експериментальне дослідження макету магнітної системи індукційного проточного вітроелектромеханічного нагрівача.

Для досягнення поставленої цілі вирішені такі *задачі*:

- розроблений електромагнітний макет магнітної системи індукційного перетворювача енергії вітру у теплову енергію для проведення експериментальних досліджень;

- проведені експериментальні дослідження зміни магнітного потоку у повітряному прошарку магнітної системи при зміні його величини та положення зубців відносно один до одного;

- отримані залежності магнітної індукції у повітряному прошарку в межах полюсної поділки та магнітного потоку при переміщенні зубців якоря відносно зубців індуктора з метою розробки програмного продукту для розрахунку значення функції (магнітного потоку) декількох змінних (величина повітряного прошарку і переміщення зубців) у будь-якій точці факторного простору.

Основні матеріали дослідження. Проточний коаксіальний вітроелектромеханічний нагрівач (рис. 1) складається з вітродвигуна 1 з вихідним валом 2 та індукційного перетворювача енергії вітру у теплову енергію 3 у вигляді рухомого магнітопроводу 4 і нерухомого магнітопроводу 5 циліндричної форми. Магнітопроводи розташовані коаксіально і мають зубчасту форму прилеглих поверхонь. Для

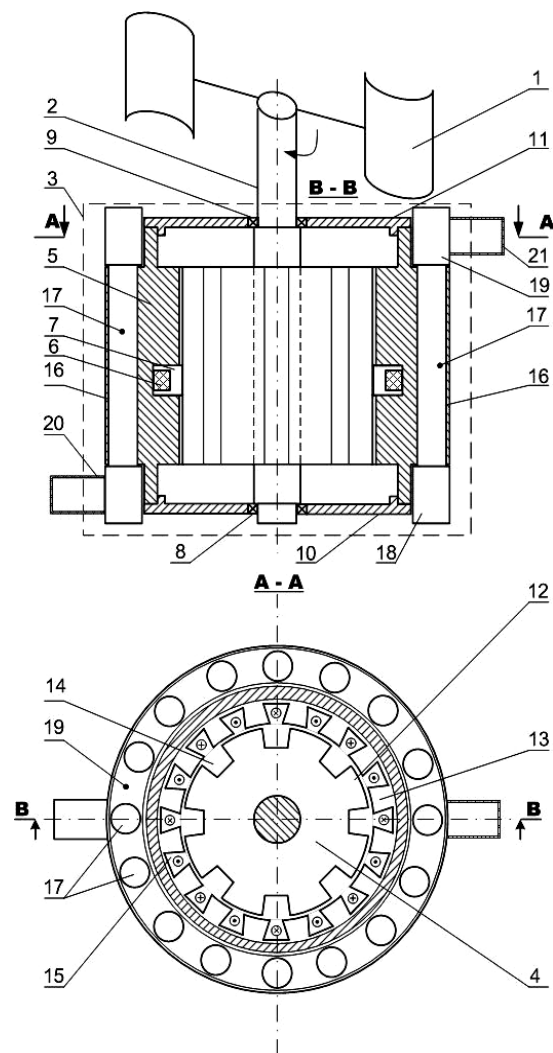


Рис. 1. Будова проточного коаксіального вітроелектромеханічного нагрівача

створення магнітного поля в кільцевій канавці 7 нерухомого магнітопроводу 5 закладена кільцева обмотка збудження 6. У підшипникових щитах 10 и 11 з немагнітного матеріалу закріплені підшипники 8 і 9. На прилеглих поверхнях магнітопроводів 4 і 5 розташовані уздовжні зубці 12 і 13, які створені уздовжніми пазами 14 і 15. По периферії нерухомого магнітопроводу 5 виконані вертикальні отвори 16, в яких розташовані охолоджуючі трубки 17 з антикорозійного матеріалу. Трубки 17 герметично з'єднані з нижнім 18 та верхнім 19 трубчастими колекторами прямокутного перетину з вхідним 20 і вихідним 21 патрубками холодної і нагрітої рідини (води). В пазах 15 нерухомого магнітопроводу 5 розташовані якірні котушки 23 (рис. 2), що з'єднані паралельно і через регулювальний випрямляч 24 під'єднані до обмотки збудження 6.

Проточний вітроелектромеханічний нагрівач працює наступним чином. Перед встановленням до експлуатації магнітопроводи 4 і 5 намагнічуються обмоткою збудження 6 від стороннього джерела живлення. Далі магнітопроводи залишаються у намагніченому стані за рахунок остаточного магнетизму. За рахунок енергії вітру вал 2 вітродвигуна 1 і рухомий магнітопровід 4 обертаються. Зубці 12 і 13 магнітопроводів 4, 5 намагнічуються магнітним полем збудження в одному напрямку одночасно.

Із-за зубчатої будови прилеглих поверхонь магнітопроводів 4 і 5 магнітний потік Φ , який замикається через них, розподіляється рівномірно. Більша його частина проходить через ділянки, де зубець 12 рухомого магнітопроводу 4 розташовується проти зубця 13 нерухомого магнітопроводу 5, а найменша - на ділянці, де зубець 12 магнітопроводу 4 розташовується напроти пазу 15

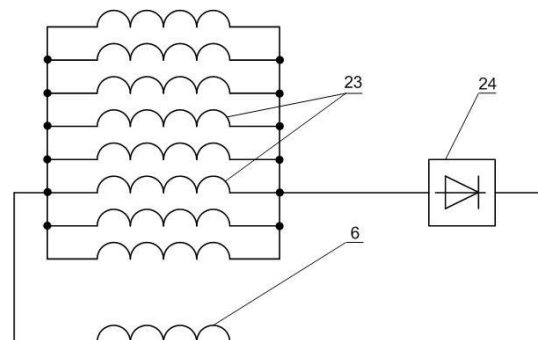


Рис. 2. Електрична схема з'єднання якірних обмоток збудження індукційного перетворювача енергії вітру у теплоту

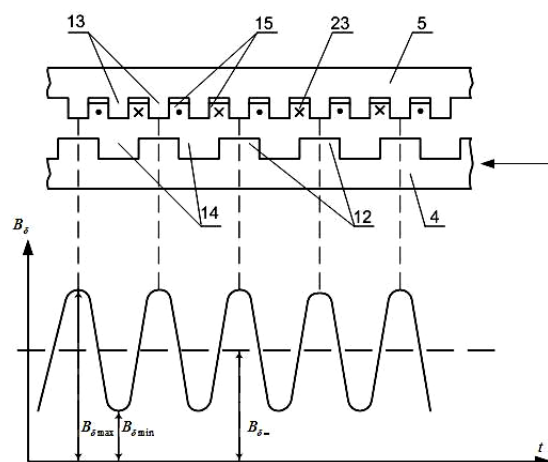


Рис. 3. Зміна магнітного потоку Φ у повітряному прошарку індукційного перетворювача енергії вітру у теплоту

нерухомого магнітопроводу 5. При цьому між зубцями 12 і 13 змінюється прошарок, а значить і магнітна індукція B у ньому. За рахунок цього крива розподілення магнітної індукції к прошарку між зубцями 12 і 13 має вигляд, представлений на рис. 3. Змінний магнітний потік Φ між зубцями магнітопроводів 4, 5 індукує в якірних обмотках 23 електрорухоому силу. В результаті чого сумарний випрямлений струм через регулювальний випрямляч 24 надходить на обмотку збудження 6 і додатково намагнічує магнітопроводи 4, 5.

З рис. 3 видно, що у прошарку під зубцем 13 індукція має максимальне значення $B_{\delta max}$. При обертанні рухомого магнітопроводу 4, коли проти його зубця 12 розташовується паз 15 нерухомого магнітопроводу 5, індукція зменшується до $B_{\delta min}$. Таким чином, при обертанні рухомого магнітопроводу 4, зв'язаного з валом 2 вітроподвигуна 1, індукція у прошарку пульсує, не змінюючи свій знак від $B_{\delta max}$ до $B_{\delta min}$. Її можна представити у вигляді двох складових:

- змінної, з амплітудою

$$B_{\delta \sim} = 0,5 (B_{\delta max} - B_{\delta min}), \quad (1)$$

- і постійної

$$B_{\delta =} = 0,5 (B_{\delta max} + B_{\delta min}). \quad (2)$$

Змінна складова магнітного поля індукує у магнітопроводах 4, 5 електрорухоому силу і вихрові струми частотою $f = Z \cdot n$ (де Z і n – кількість зубців і частота обертання рухомого магнітопроводу 4), які за законом Джоуля-Ленца нагрівають їх. Нерухомий магнітопровід 5 за рахунок конвекції передає теплоту охолоджуючим трубкам 17 с проточною рідиною (водою), яка може використовуватися для обігріву приміщень, миття посуду, для полива рослин тощо.

Постійна складова магнітного потоку ніякої електрорухоомої сили не індукує, тому ця частина магнітного потоку не приймає участі у перетворенні енергії вітру у теплоту. Виготовлення підшипникових щитів 10 і 11 з немагнітного матеріалу виключає можливість шунтування магнітного потоку.

Експериментальні дослідження.

Для обґрунтування параметрів розробленого індукційного перетворювача енергії вітру у теплову енергію проведені експериментальні дослідження зміни магнітного потоку Φ і магнітної індукції B у зубцях при різних параметрах магнітної системи. Дослідження проводилися для зубцевих зон, які мали співвідношення у межах:

$$\delta_o = \delta/\tau; b_{zo} = b_z/\tau = 0,5 \dots 1; h_{zo} = h_z/\tau = 0,3 \dots 1,5. \quad (3)$$

Для фізичного моделювання використовувався електромагнітний макет магнітної системи і з'ємні пакети зубцевих зон з різною конфігурацією зубців набраних з електротехнічної сталі (рис. 4).

Повітряний прошарок між верхнім і нижнім пакетами змінювався від 0 до 10,5 мм, що відповідає δ_0 від 0 до 0,3. Дослідження проведені для зубцевих зон, які мали відношення у межах: $\delta_0 = \delta/\tau = 0,04...0,3$.

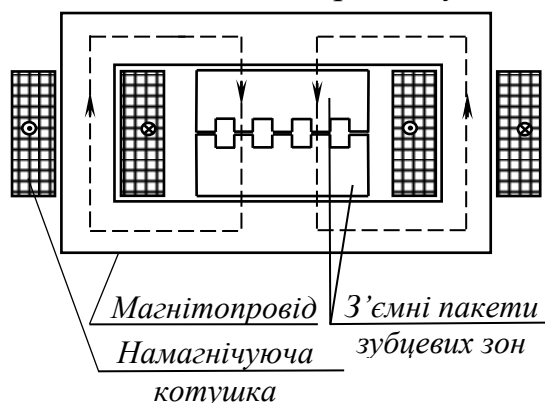


Рис. 4. Електромагнітний макет магнітної системи

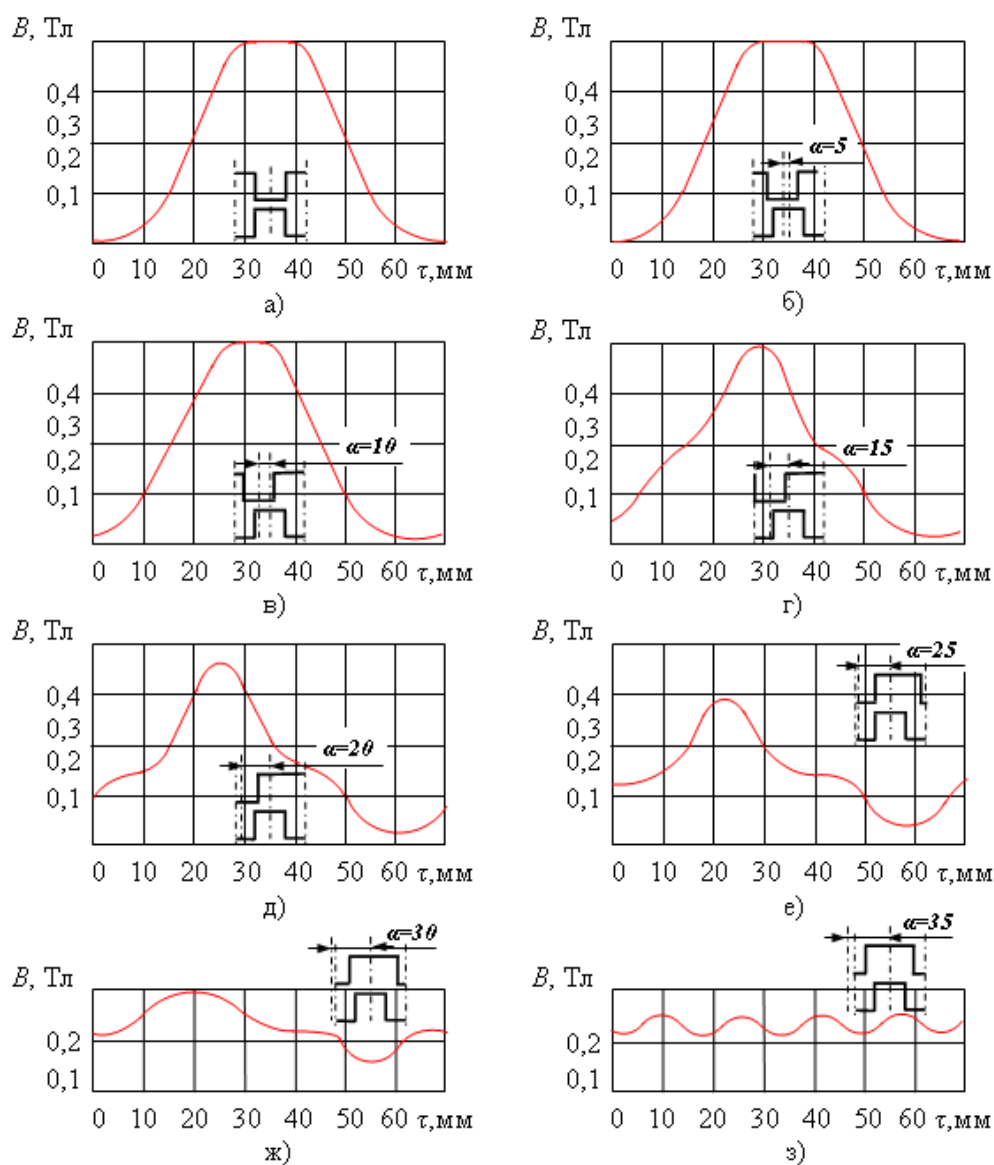


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції B у прошарку δ у межах полюсної поділки τ

Магнітний потік Φ у області, що визначається, створювався двома котушками при проходженні по ним струму. Індукція у повітряному прошарку на ділянці зубцевої поділки 2τ визначалася балістичним методом. Під час досліджень положення одного зубця відносно другого у межах однієї зубцевої поділки змінювалося з дискретним кроком. Для кожного положення проводилися заміри індукції.

На рис. 5 наведені зміни магнітної індукції B у прошарку для восьми положень зубців прямокутної форми шириною $b_{zo} = 0,715$, висотою $h_{zo} = 1$, при величині прошарку $\delta_o = 0,3$. З рис. 5 видно, що магнітна індукція B у прошарку пульсує від максимального значення $B_{max} = 0,5$ Тл, коли зубці магнітопроводів розташовані один проти одного (рис. 5,а), до мінімального значення $B_{min} \approx 0,23$ Тл, коли зубець якоря розташований проти паза індуктора (рис. 5,з).

Результати вимірювань залежності повного магнітного потоку Φ зубцевої поділки τ у прошарку δ від переміщення α зубців якоря відносно зубців індуктора при різних значеннях величини зазору приведені на рис. 6.

Висновки.

1. Для дослідження магнітних параметрів магнітної системи індукційного перетворювача енергії вітру в теплову енергію розроблено електромагнітний макет магнітної системи із з'ємними пакетами зубцевих зон з різною конфігурацією зубців.

2. Отримані залежності магнітної індукції у прошарку магнітної системи макету у межах полюсної поділки при зміні взаємного

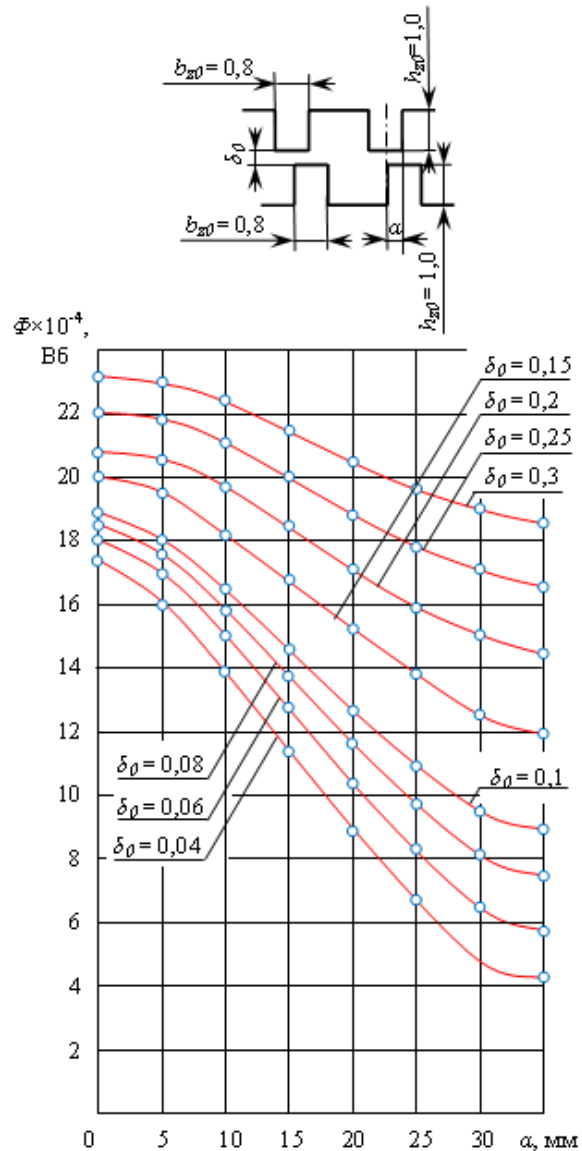


Рис. 6. Залежності магнітного потоку Φ у прошарку δ_o при переміщенні зубців якоря відносно зубців індуктора

розташування зубців, які мають прямокутну форму, при величині відносного прошарку $\delta_o = 0,3$.

3. Досліджені залежності магнітного потоку у прошарку магнітної системи при переміщенні зубців якоря відносно зубців індуктора.

4. Результати досліджень, що отримані, можуть бути використанні при проектуванні і розрахунку малопотужних індукційних перетворювачів енергії вітру в теплову енергію для тепловодопостачання невеликих домогосподарств.

Література:

1. *Gan, L. K., Echenique Subiabre, E.J.P.* (2019). A realistic laboratory development of an isolated wind-battery system. *Renewable Energy*. P. 645-656.

2. *Merizalde, Y., Hernández-Callejo, L., Duque-Perez, O., Alonso-Gómez, V.* (2019). Maintenance models applied to wind turbines. A comprehensive overview. *Energies*. Vol. 12, Issue 2, 11 January 2019, Article number 225.

3. *Галько С. В.* Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія / С. В. Галько, В. Я. Жарков, А. В. Жарков. – Мелітополь: Люкс, 2019. – 215 с.

4. *Галько С.В.* Розрахунок малопотужного вітроелектрогенератора для домогосподарств. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного [Електронний ресурс]. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. Вип. 10, т. 1. URL: <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik>. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-29>.

5. Електричний генератор для вітроенергетичних установок невеликої потужності домогосподарств / С. В. Галько, Б. С. Новах // Зб. наук. праць II Всеукраїнської науково-технічної конференції “Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем”. – Харків: НТУ “Харківський політехнічний інститут”, 03-06 грудня 2018 р. – С.34-35.

6. *Apt, J., Jaramillo, P.* (2014) Variable Renewable Energy and the Electricity Grid. P. 1-328.

7. *Yang, Z. Chai, Y.* (2016). A survey of fault diagnosis for onshore grid-connected converter in wind energy conversion systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 66, 1 December 2016, p. 345-359.

8. *Fu, Y., Hu, W., Xu, F., Zhang, C., Wang, X.* (2017). Clean Heating Scheduling Optimization with Wind Power in Northern China. *Journal of Energy Engineering*. Vol. 143, Issue 6, 1 December 2017, Article number 04017056.

9. *Haslach H. W.* A wind turbine driven heat conversion unit for maximal power extraction from the wind. “3rd ASME Wind Energy

Symp.: 7th Annu. Energy-Sour. Technol. Conf. And exhib., New Orleans, La, Febr. 12-16, 1984” - New York, N.Y., 1984. 111-119 (англ.).

10. Пат. 4421967 USA. Ветропелловая установка. Windmill driven eddy current heater. Birgel Warren J., Hajec Chester; опубл. 20.12.83.

11. Boubzizi, S., Abid, H., El hajjaji, A., Chaabane, M. (2018). Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system. *Protection and Control of Modern Power Systems*. Vol. 3, Issue 1, 1 December 2018, Article number 21.

12. Жарков В. Я., Жарков А. В., Галько С. В. Когенераційна технологія перетворення енергії вітру. *Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти*: колективна монографія / за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтава: ПП “Астрія”, 2019. С. 411-418.

13. Juangsa, F.B., Budiman, B.A., Aziz, M., Soelaiman, T.A.F. (2017). Design of an airborne vertical axis wind turbine for low electrical power demands. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. Vol. 8, Issue 4, 1 December 2017, P. 293-301.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОТОЧНОГО ВЕТРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Галько С. В., Вершков А. А., Леженкин А.М.

Аннотация - в статье проанализированы отечественные и зарубежные преобразователи энергии ветра непосредственно в тепловую энергию для использования в бытовых системах горячего водоснабжения и отопления. Разработан проточный ветроэлектромеханический нагреватель, принцип действия которого основан на возбуждении вихревых токов в магнитопроводе. Для исследования электромагнитных процессов в магнитопроводе нагревателя, разработан и экспериментально исследован макет магнитной системы. Получены зависимости изменения электромагнитных величин в воздушном зазоре зубцовой зоны макета при регулировании воздушного зазора и взаимного расположения зубцов. Результаты исследований рекомендуется использовать при проектировании и расчете маломощных индукционных преобразователей энергии ветра в тепловую энергию для тепловодоснабжения небольших домохозяйств.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, энергия ветра, ветроэнергетическая генерация, преобразование энергии, индуктивные преобразователи, отопление.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MAGNETIC SYSTEM OF A FLOW WIND ELECTROMECHANICAL HEATER

Halko S., Vershkov A., Lezhenkin A.

Summary - The article defines the relevance and prospects of using small-capacity wind turbines in the world for direct thermal power generation for small households. Analysis of domestic and foreign wind energy converters directly to thermal energy for use in domestic systems of hot water supply and heating has been carried out. Their advantages and disadvantages were considered. On the basis of the analysis, a flow wind electromechanical heater has been developed, the principle of action of which is based on the excitation of vortex currents in the magnetic circuit. The description of the device and the principle of the action of the developed heater is given.

To study electromagnetic processes in the magnetic circuit of the heater, a model of the magnetic system with removable packages of toothed zones with different configurations of teeth has been developed and experimentally investigated. The air gap between the top and bottom packets varied from 0 to 10.5 mm. Studies have been carried out for the toothed zones, which had the ratio of the air gap to the pole division in the range of 0.04 ... 0.3. The induction in the air gap was determined by the ballistic method. In the study, the position of the teeth relative to each other within the pole division varied from 0 to 35 mm with a discrete step of 5 mm.

The paper presents the dependences of the distribution of magnetic induction in an air gap within a pole division for eight teeth positions of a rectangular form and of modifying the magnetic flux in an air gap when the anchor teeth are moved relative to the inductor teeth. The results of the studies are recommended for use in the design and calculation of low-power induction converters of wind power to thermal power to supply small households.

Keywords: renewable energy sources, wind energy, wind power generation, energy conversion, inductive transducers, heating.