

## **АНАЛІЗ ПРЯМОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОВУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДУКЦІЙНИХ СТРУМІВ**

***В. М. Головка, доктор технічних наук, професор***

***Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»***

***Інститут відновлюваної енергетики НАН України***

***В. І. Міхалін, аспірант***

***Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»***

***E-mail: [golovkovm@ukr.net](mailto:golovkovm@ukr.net)***

**Анотація.** У статті наведені результати експериментального дослідження роботи індукційного генератора теплової енергії, що реалізує перетворення механічної енергії обертання магнітного диска у теплову за допомогою вихрових струмів, які виникають у металевій провідній пластині під дією змінного магнітного поля. Об'єктом дослідження є процес прямого перетворення механічної енергії в теплову. Експериментальна установка складається із ротора, що містить розміщені за колом постійні магніти, який обертається над сталеву пластину. У результаті переміщення магнітного поля в провіднику індукуються вихрові струми, які спричиняють нагрівання за рахунок джоулевих втрат. Досліджено вплив конструктивних і магнітних параметрів установки на величину потужності теплових втрат, зокрема, частоти зміни магнітного поля, величини магнітної індукції та відстані до пластини. Для перевірки експериментально отриманих значень використано залежність для розрахунку потужності втрат від вихрових струмів, що враховує величину магнітної індукції, частоту зміни магнітного поля та електричні характеристики матеріалу. Порівняння теоретичних і експериментальних результатів показало, що похибка між ними становить менше 10 %. Отримані результати можуть бути використані в розробці безконтактних систем нагрівання, систем рекуперації енергії, а також в енергетичних установках з прямим перетворенням механічної енергії в теплоту, зокрема, для вітрових і гідравлічних турбін.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, енергія вітру, індукційне нагрівання, вихрові струми, постійні магніти, генератор теплової енергії, безконтактне нагрівання, пряме перетворення енергії, обертальний рух

**Актуальність.** У сучасних умовах глобального енергетичного переходу до відновлюваних джерел енергії особливої ваги набувають технології, що

забезпечують високу ефективність використання природних ресурсів. Одним із перспективних напрямів є пряме перетворення енергії вітру в теплову енергію без проміжного етапу електрогенерації. Традиційні вітроенергетичні установки перетворюють кінетичну енергію вітру спочатку в електричну, а потім у теплову, що супроводжується втратами енергії на кожному етапі. Пряме перетворення механічної енергії в теплову дає змогу підвищити загальний ККД установки за рахунок виключення проміжного етапу перетворення в електричну енергію. Це особливо важливо для систем локального теплозабезпечення, де електроенергія не є цільовим продуктом. Крім того, такі системи мають потенціал до широкого використання в автономних системах і для ізольованих споживачів. Дослідження індукційних генераторів теплової енергії спрямоване на вивчення механізмів прямого перетворення механічної енергії в теплову та створення інженерних рішень, які забезпечують ефективну, екологічно чисту та технологічно просту альтернативу традиційним підходам у вітроенергетиці.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Низка дослідників акцентує увагу на доцільності ширшого впровадження систем прямого перетворення вітрової енергії у теплоту, особливо в контексті забезпечення потреб домогосподарств у гарячій воді та опаленні. Наприклад, у країнах Європейського Союзу в 2022 році лише 26 % енергії було спожито у формі електроенергії, тоді як решта 74 % – у формі теплоти та механічної енергії. Аналогічна ситуація простежується і за показниками споживання природного газу: значна його частина використовується саме для побутового нагрівання води та опалення [1].

Крім того, важливою є економічна доцільність: обладнання для виробництва теплоти із використанням механічної енергії вітру є простішим і дешевшим порівняно з генераторами електроенергії. Також накопичення теплоти є значно ефективнішим – сучасні теплові акумулятори мають значно нижчу вартість, ніж електричні батареї еквівалентної ємності, при цьому строк їх експлуатації є тривалішим.

Окрему увагу дослідники приділяють ефективності використання вітрового потенціалу [2]. Потужність повітряного потоку зростає пропорційно третьому

ступеню швидкості вітру, однак реальна здатність вітрових електрогенераторів малої потужності (до 30 кВт) перетворювати енергію обмежується їхньою конструкцією, зокрема, характеристиками постійних магнітів та електротехнічних матеріалів. У результаті, замість теоретично можливого коефіцієнта перевантаження 5...6, більшість таких систем обмежені значенням 1,2...1,3.

Пряме перетворення механічної енергії, отриманої від вітрової турбіни, безпосередньо в теплову досліджено також в контексті порівняння механічних характеристик вітрової турбіни та індукційного генератора теплової енергії. У роботі [3] продемонстровано добру узгодженість механічних характеристик вітротурбіни та індукційного генератора теплової енергії. Кілька робіт, серед яких [4] зосередились на аналізі потужності тепловиділення в індукційному генераторі теплової енергії за допомогою числових методів розрахунку із використанням спеціалізованого програмного забезпечення для FEM-аналізу.

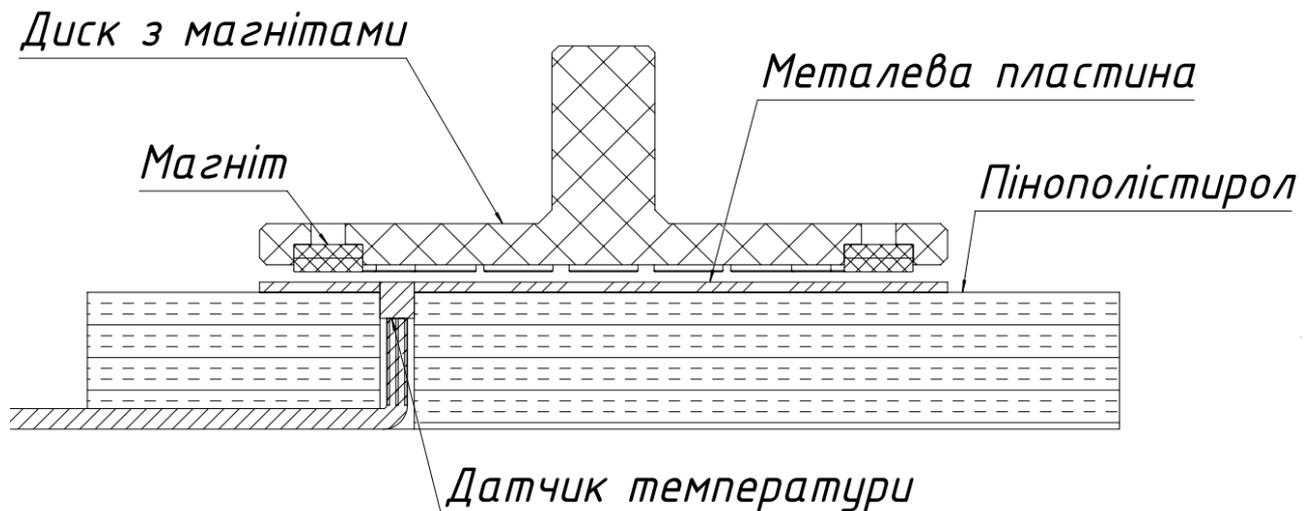
Отже, актуальність досліджень у сфері прямого перетворення вітрової енергії у теплову підтверджується як енергетичною структурою споживання, так і техніко-економічними перевагами даного підходу, що робить цю тему перспективною для подальших експериментальних і прикладних розробок.

**Мета дослідження** – аналіз процесу прямого перетворення механічної енергії обертання магнітного диску в теплову енергію за рахунок індукції вихрових струмів у феромагнітній пластині.

**Матеріали і методи дослідження.** Дослідження проводилося з використанням теоретичного та експериментального методів з подальшим порівнянням результатів, отриманих обома методами.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Порядок проведення досліду: на горизонтальній платформі закріплений лист теплоізоляційного матеріалу (пінополістирол), до якого в свою чергу закріплений металевий диск, в якому міститься отвір, через який до диску через шар термопасти приєднано датчик температури GY-21 HTU21D із похибкою вимірювання  $\pm 0,2\%$ . Датчик температури металевієї пластини в режимі реального часу передає інформацію на персональний комп'ютер. Водночас на комп'ютер надходить інформація з другого датчика

температури, розміщеного поблизу вимірювального стенду. Таким чином відбувається зчитування значення температури пластини, яке водночас порівнюється із температурою повітря в кімнаті. Пластиковий диск із розміщеними на ньому постійними магнітами, жорстко закріплений у патроні свердлильного верстата BOSCH PBD 40. Магніти циліндричної форми мають аксіальну намагніченість і розміщені на диску за колом із чередуванням полюсів S-N. Всього на диску розміщено 20 магнітів, які утворюють 10 пар полюсів. Диск знаходиться на відстані 1.5 мм від металевої пластини і розміщений концентрично із нею.



**Рис. 1. Схема установки для вимірювання теплової потужності індукційного струму**

Проведено серію досліджень, під час яких диск з магнітами обертався відносно металевої пластини зі швидкістю від 600 до 2400 об/хв. В ході кожного дослідження вимірювалась температура металевої пластини і температура повітря в кімнаті. Дослід завершувався, коли температура пластини досягала усталеного значення, що означало баланс між генерацією теплової енергії в пластині внаслідок протікання індукційних струмів та втратами теплоти у навколишнє середовище (через конвекцію, випромінювання і теплопередачу).

Обробка результатів починалася із визначення величини теплових втрат.

Втрати через конвекцію:

$$Q_{\text{конв.}} = h \cdot A \cdot (T_{\text{пл.}} - T_{\text{пов.}}) = 10 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0.1^2}{4} \right) \cdot (300.7 - 297.3) = 0.26 \text{ Дж}$$

де:  $h = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  – коефіцієнт теплопередачі від металевої пластини до повітря;

$A = \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) = \left( \frac{\pi \cdot 0.1^2}{4} \right) = 7.85 \times 10^{-3} \text{ м}^2$  – площа металевої пластини;  $T_{\text{пл.}} = 300.7 \text{ К}$  – температура пластини наприкінці досліду;  $T_{\text{пов.}} = 297.3 \text{ К}$  – температура повітря навколо пластини; Втрати через випромінювання:

$$\begin{aligned} Q_{\text{випр.}} &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{пл.}}^4 - T_{\text{пов.}}^4) = \\ &= 0.8 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0.1^2}{4} \right) \cdot (300.7^4 - 297.3^4) = 0.13 \text{ Дж} \end{aligned}$$

де:  $\varepsilon = 0.8$  – коефіцієнт випромінювання сталевий поверхні;

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  – стала Стефана-Больцмана; Втрати через теплопередачу:

$$\begin{aligned} Q_{\text{тп.}} &= \frac{\lambda \cdot A \cdot (T_{\text{пл.}} - T_{\text{пов.}})}{d} = \\ &= \frac{0.032 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0.1^2}{4} \right) \cdot (300.7 - 297.3)}{0.05} = 0.03 \text{ Дж} \end{aligned}$$

де:  $\lambda = 0.032 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  – теплопровідність пінополістиролу;  $d = 0,05 \text{ м}$  – товщина

шару пінополістиролу;

Сумарні втрати:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{конв.}} + Q_{\text{випр.}} + Q_{\text{тп.}} = 0.26 + 0.13 + 0.03 = 0.42 \text{ Дж}$$

Таким чином, теплова потужність, що генерується в металевій пластині від вихрових струмів становить **0.42 Вт**.

Для перевірки експериментально отриманого результату використано залежність для розрахунку потужності втрат від індукційних струмів [5]:

$$P_{\text{п}} = \frac{\pi^2 \cdot B_p^2 \cdot \delta^2 \cdot f^2}{6 \cdot k \cdot \rho \cdot S}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{п}}$  – питома потужність втрат від індукційних струмів,  $\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$ ;

$B_p = \frac{B_r}{2} \cdot \left( \frac{z + d_{\text{маг.}}/2}{\sqrt{(z + d_{\text{маг.}}/2)^2 + (D_{\text{маг.}}/2)^2}} - \frac{z - d_{\text{маг.}}/2}{\sqrt{(z - d_{\text{маг.}}/2)^2 + (D_{\text{маг.}}/2)^2}} \right)$  – магнітна індукція на відстані  $z$  від магніту;  $B_r = 0.75 \text{ Тл}$  – магнітна індукція на поверхні магніту;

$z = 0,0015$  м – відстань від магніта до металевого диска;  $d_{\text{маг.}} = 0,005$  м – товщина магніта;  $D_{\text{маг.}} = 0,01$  м – діаметр магніта;  
 $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 400 \cdot 1,88 \times 10^{-4} \cdot 7 \times 10^6}} = 7,77 \times 10^{-4}$  м – глибина проникнення вихрових струмів;  $\mu = 1,88 \times 10^{-4}$  Гн/м – магнітна проникність матеріалу пластини;  $\sigma = 7 \times 10^6$  См/м – питома електропровідність матеріалу пластини;  $f = 400$  Гц – частота зміни магнітного поля над точкою на диску;  $k = 1$  – коефіцієнт для металеві пластини;  $\rho = 1,43 \times 10^{-7}$  Ом·м – питома електропровідність матеріалу пластини;  $S = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – густина матеріалу пластини.

Магнітна індукція на поверхні металеві пластини:

$$B_p = \frac{0,75}{2} \cdot \left( \frac{0,0015 + 0,005/2}{\sqrt{(0,0015 + 0,005/2)^2 + (0,1/2)^2}} - \frac{0,0015 - 0,005/2}{\sqrt{(0,0015 - 0,005/2)^2 + (0,1/2)^2}} \right) = 0,308 \text{ Тл}$$

Втрати від індукційних струмів:

$$P_{\text{п}} = \frac{\pi^2 \cdot 0,308^2 \cdot 0,0015^2 \cdot 400^2}{6 \cdot 1 \cdot 1,43 \times 10^{-7} \cdot 7850} = 13,42 \text{ Вт/кг}$$

Враховуючи масу пластини, повна потужність втрат становить:

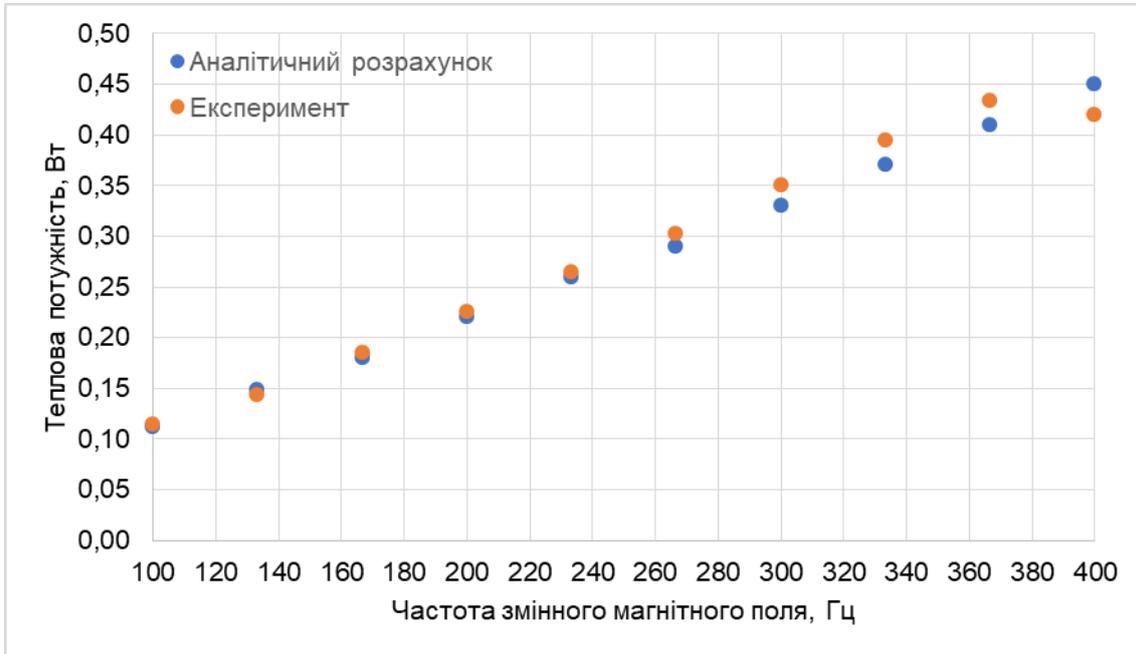
$$P = P_{\text{п}} \cdot m = P_{\text{п}} \cdot A \cdot d_{\text{пл.}} \cdot S = P_{\text{п}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot d_{\text{пл.}} \cdot S = 13,42 \cdot 7,85 \times 10^{-3} \cdot 0,0015 \cdot 7850 = 0,45 \text{ Вт}$$

Похибка між експериментальним і теоретичним значеннями потужності теплових втрат:

$$\Delta = \frac{P_e - P_{\text{т}}}{P_e} \cdot 100\% = \frac{|0,42 - 0,45|}{0,42} \cdot 100\% = 7\%$$

Як бачимо, результат, отриманий за аналітичною формулою, досить добре узгоджується із експериментальними даними. Нижче наведено графік експериментально отриманих значень потужності теплових втрат і аналітично розрахованих значень. Як видно з графіка, потужність зростає лінійно зі збільшенням частоти зміни магнітного поля, незважаючи на те, що в аналітичній формулі частота міститься в чисельнику у другому ступені. Це пояснюється тим, що

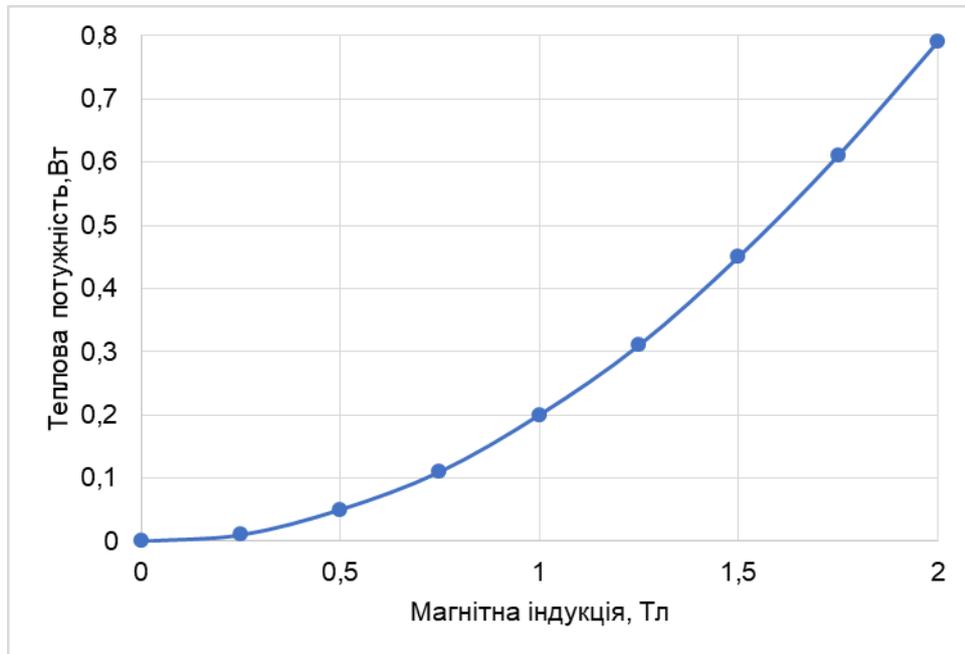
вихрові струми генеруються майже повністю у поверхневому шарі матеріалу, товщина якого зменшується зі збільшенням частоти зміни магнітного поля. Цей фактор компенсує зростання теплової потужності і надає графіку вигляду майже прямої лінії.



**Рис. 2. Залежність потужності теплових втрат від частоти зміни магнітного поля**

Додатковим способом оцінки впливу магнітної індукції на величину теплових втрат є порівняння їх добутку  $(B \cdot H)_{max}$ . Цифри в маркуванні магнітів NdFeB позначають максимальне значення добутку  $(B \cdot H)_{max}$  цього магніту в Мегагаус-Ерстедах. Наприклад, числа 38 і 52 у позначеннях N38 і N52 означають, що максимальний добуток  $(B \cdot H)_{max}$  становить відповідно 38 Мегагаус-Ерстед та 52 Мегагаус-Ерстед. Чим більше число, тим більшу енергію має магніт. Літера після числа вказує на клас внутрішньої коерцитивної сили: чим далі в алфавіті розміщена літера, тим вища коерцитивна сила магніту. Для магнітів SmCo, таких як SmCo16, SmCo18, SmCo24, SmCo26, SmCo28 тощо, числа також вказують на максимальне значення добутку  $(B \cdot H)_{max}$ . Таким чином, NdFeB магніт N52 дає змогу згенерувати приблизно на 40 % більше теплоти порівняно із N 38 за інших рівних умов через більше значення магнітної індукції. На рис. 3 представлено графік залежності теплової потужності, яка виділяється у провіднику внаслідок протікання

вихрових струмів, від величини магнітної індукції при сталій частоті зміни магнітного поля. Всі інші параметри, зокрема геометрія системи та фізичні характеристики матеріалу залишались незмінними.



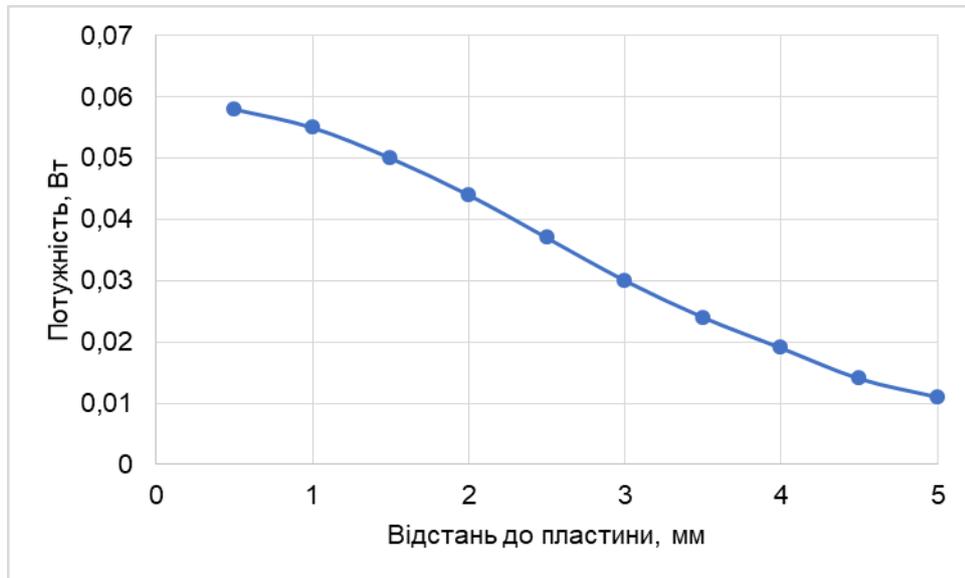
**Рис. 3. Залежність теплової потужності від величини магнітної індукції при сталій частоті зміни магнітного поля**

Згідно з аналітичним виразом, теплова потужність втрат на вихрові струми прямо пропорційна квадрату амплітудного значення магнітної індукції:

$$P \approx B_p^2. \quad (2)$$

Така залежність відображається у вигляді параболічного зростання на графіку: зі збільшенням магнітної індукції теплова потужність зростає квадратично. Це означає, що навіть невелике підвищення значення магнітної індукції призводить до суттєвого збільшення теплових втрат у провідному середовищі. Наприклад, при зростанні індукції від 1 Тл до 2 Тл потужність тепловиділення зростає майже вчетверо. Таким чином, вибір типу магніту для генератора теплової енергії суттєво впливає на його продуктивність. Отримані результати підтверджують доцільність використання високоефективних постійних магнітів для підвищення виходу теплової енергії в індукційних системах безконтактного нагрівання.

Повітряний проміжок між магнітами і пластиною також має значний вплив на величину теплової потужності. Як видно із графіка на рис. 4, при всіх інших рівних умовах, зі збільшенням відстані від магнітів до пластини, потужність падає.



**Рис. 4. Залежність теплової потужності від величини повітряного проміжку між магнітами та пластиною**

Наведений графік демонструє практично прямо пропорційну залежність потужності від відстані в діапазоні від 1,5 до 3,5 мм. При зменшенні відстані до нуля, потужність не зростає експоненційно, як очікувалось, а виходить на "плато". Аналогічна поведінка графіка спостерігається при відстані понад 3,5 мм. На практиці не вдалося зняти вимірювання на відстані менше 1,5 мм через недосконалість експериментального стенду. А на відстані понад 3 мм не вдалося зафіксувати достатнє нагрівання пластини. Тому таку поведінку графіка можна пояснити недосконалістю аналітичного методу розрахунку.

**Висновки і перспективи.** Проведено серію із десяти дослідів із визначення потужності теплових втрат індукційного нагрівача, що здійснює пряме перетворення механічної енергії в теплову. Проаналізовано вплив магнітної індукції на величину теплових втрат, а також вплив частоти зміни магнітного поля на товщину поверхневого шару, в якому наводяться вихрові струми.

Встановлено, що:

- для збільшення теплової потужності безконтактного нагрівача доцільніше нарощувати саме величину магнітної індукції, аніж частоту змінного магнітного

поля, оскільки збільшення частоти призводить до зменшення товщини зони генерації вихрових струмів, а це своєю чергою сповільнює зростання теплової потужності. Так, за отриманими графіками, збільшення величини магнітної індукції в 2 рази спричиняє ріст теплової потужності у 4 рази при всіх інших незмінних параметрах. На відміну від цього, збільшення частоти змінного магнітного поля у 2 рази дало приріст теплової потужності приблизно у 2 рази.

- переважаючий вплив величини магнітної індукції на теплову потужність приводить до висновку про доцільність застосування стаціонарних електромагнітів, у парі з обертовим феромагнітним диском, оскільки електромагніти можуть забезпечити значно вищі показники індукції.

- величина повітряного проміжку між магнітами і пластиною має практично лінійний вплив на генерацію теплової потужності.

## References

1. Eurostat. (n.d.). *Energy consumption in households*. Statistics Explained. Retrieved May 25, 2025, from [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households)
2. Sobor, I., Chiciuc, A., Ciuperca, R., & Rachier, V. (2011). Concerning the conversion efficiency increase of the available wind potential. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*, 35, 122-127.
3. Tudorache, T., Melcescu, L., & Predescu, M. (2015). Analysis of a permanent magnet eddy current heater driven by a wind turbine. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 15 (3), 95–102. Available at: <https://doi.org/10.4316/AECE.2015.03013>
4. Makarchuk, O., Rusek, A., Shchur, I., & Shchur, V. (2015). The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (1), 166–169. Available at: <https://doi.org/10.15199/48.2015.01.40>
5. Fiorillo, F. (2004). *Measurement and characterization of magnetic materials* (p. 31). Elsevier Academic Press. ISBN 0-12-257251-3

## ANALYSIS OF DIRECT MECHANICAL INTO THERMAL ENERGY CONVERSION USING EDDY CURRENTS

V. Golovko. V. Mikhalin

**Abstract.** *The article presents the results of an experimental study on the operation of an induction heat energy generator, which implements the conversion of mechanical energy from the rotation of a magnetic disk into thermal energy through eddy currents induced in a conductive metal plate by an alternating magnetic field. The object of the*

*research is the process of direct conversion of mechanical energy into heat. The experimental setup consists of a rotor with permanent magnets arranged in a circular pattern, rotating above a steel plate. As the magnetic field moves relative to the conductor, eddy currents are induced, resulting in heating due to Joule losses. The influence of the structural and magnetic parameters of the setup on the amount of thermal loss power is investigated, particularly the frequency of magnetic field variation, the magnetic flux density, and the distance to the plate. To verify the experimentally obtained values, a theoretical formula for calculating eddy current power loss was used, which accounts for the magnetic induction, frequency of field variation, and the electrical properties of the material. A comparison between theoretical and experimental results showed a discrepancy of less than 10%. The obtained results can be applied in the development of contactless heating systems, energy recovery systems, and power units with direct mechanical-to-thermal energy conversion, especially for wind and hydraulic turbines.*

**Key words:** *renewable energy sources, wind energy, induction heating, eddy currents, permanent magnets, heat energy generator, contactless heating, direct energy conversion, rotational motion*