

**І. З. Щур, О. В. Макарчук, В. І. Щур, П. Й. Голубовський**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електроприводу і комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
кафедра електричних машин і апаратів,  
СКБ електромеханічних систем

## **ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ГЕНЕРАТОР ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ВІТРОЕНЕРГОУСТАНОВОК З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ**

© Щур І. З., Макарчук О. В., Щур В. І., Голубовський П. Й., 2015

З метою зниження вартості автономних вітроустановок з вертикальною віссю обертання та розширення їх функціональних можливостей запропоновано акумулювати енергію вітру також у вигляді теплоти. Для цього запропоновано спеціальний електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплоту (ЕПМЕТ). Розроблено методику розрахунку електромагнітних і теплових полів у робочих елементах ЕПМЕТ. За результатами розрахунків виготовлено макетний взірець ЕПМЕТ та проведено його експериментальні дослідження.

*Ключові слова: генератор теплової енергії, електромагнітний перетворювач механічної енергії в теплоту, математичне моделювання електромагнітних і теплових полів, вітроустановка з вертикальною віссю обертання.*

In order to reduce the cost of stand-alone wind turbines with a vertical axis of rotation and expand their functionality was offered to accumulate wind energy also as heat. For this purpose a special electromagnetic transformer of mechanical energy into heat (ETMEH) was created. The method of calculation of electromagnetic and thermal fields in the working elements of ETMEH was developed. After project calculations the model of ETMEH was made and his experimental research were held.

*Key words: heat generator, electromagnetic transducer of mechanical energy into heat, mathematical modeling of electromagnetic and thermal fields, wind turbines with a vertical axis of rotation, VAWT.*

### **Постановка задачі**

Останнім часом збільшується попит на вітроустановки (ВЕУ) малої потужності, які розміщуються безпосередньо біля споживачів та працюють переважно на вітрах з малою швидкістю [1,2]. У таких умовах найвищу ефективність мають ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО), які не під’єднуються до загальної електромережі, а працюють в автономному режимі [3–5]. Для узгодження випадкових графіків генерування та споживання електроенергії в автономних ВЕУ застосовують електрохімічні акумуляторні батареї, що істотно підвищує сумарну вартість ВЕУ. Проте в побуті, де переважно використовуються автономні ВЕУ, крім електричної, завжди є потреба й у тепловій енергії. Тому за допомогою гібридизації нагромаджувачів енергії – електричного і теплового – можна істотно знизити загальну ємність електрохімічних акумуляторів, здешевивши вартість ВЕУ й одночасно розширивши її функціональні можливості. Теплову енергію у ВЕУ традиційно отримують з електричної, увімкнувши до електричного генератора термоелектричні нагрівачі (ТЕН) [6]. Проте варто розглянути й інший варіант – застосування у ВЕУ двох генераторів, під’єднаних до осі обертання ВЕУ, – електричного і теплового [7]. Така автономна когенераційна ВЕУ має ширші можливості:

- 1) генерує теплову енергію безпосередньо з механічної, виключаючи проміжну електричну ланку, що знижує втрати енергії;
- 2) завдяки практично необмеженій ємності теплового акумулятора уся доступна ВЕУ механічна енергія вітру корисно використовується;
- 3) максимально використовується також енергія вітру за його швидкостей, що значно перевищують номінальне значення, яке в традиційних ВЕУ обмежується потужністю електричного генератора, тобто істотно зростає максимальна потужність ВЕУ при тому ж вітророторі (ВР);
- 4) можна значно зменшити (аж до повного виключення) встановлену ємність електрохімічних акумуляторних батарей, що знизить вартість ВЕУ.

### Аналіз останніх досліджень

Найдоцільніше перетворити енергію обертового руху в теплоту через посередництво електромагнітного поля. У запропонованому [8] обертовому електромагнітному перетворювачі механічної енергії в теплоту (ЕПМЕТ) (рис. 1) нерухомий індуктор 1 має розміщені по колу сталеві зубці 2, на які одягнуті котушки 3. Для збільшення площі перерізу магнітопроводу в робочому проміжку зубці обладнані сталевими наконечниками 4. На мінімальній віддалі від наконечників розміщено сталевий диск 5, який зв'язаний з валом 6 обертання ВР. На поверхню диска 5 нанесено тонкий шар 7 із неферомагнітного матеріалу з високою електропровідністю (мідь, алюміній). Якщо котушки з'єднати послідовно, вивернувши їх кінці через одну, то під час протікання по них постійного електричного струму через тіло диска буде замикатися постійний магнітний потік з перемінною по колу полярністю. У разі обертання диска цей потік у кожній точці тіла диска уже буде змінним, що супроводжуватиметься генеруванням у диску ЕРС та, відповідно, вихрових струмів. Особливо значними вони будуть у неферомагнітному шарі диска. Джоулева теплота від вихрових струмів є позитивним ефектом роботи ЕПМЕТ. Для її використання диск повинен мати добрий тепловий контакт з рідким теплоносієм 8, що відводить теплоту до бойлера. Величина генерованого теплового потоку залежатиме від намагнічувальної сили індуктора, частоти обертання диска і структури його шарів. ЕПМЕТ поміщається в кожух 9, який добре теплоізолюється.

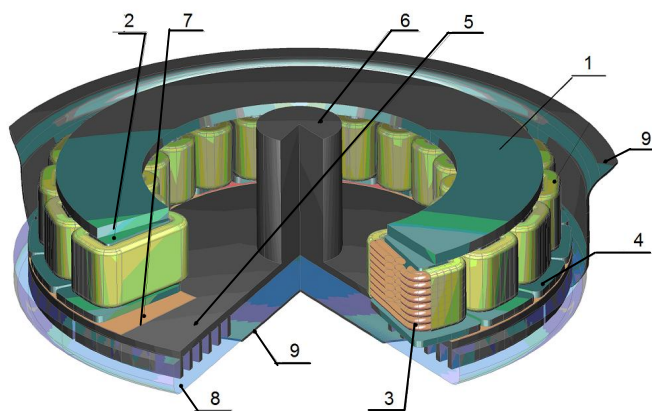


Рис. 1. Ескіз конструкції ЕПМЕТ

### Ціль статті

Метою роботи є: розроблення методики математичного моделювання змінного в середовищі магнітного поля, породженого ним поля вихрових струмів та відповідного теплового поля, а також проектування на основі цієї методики, створення та експериментальні дослідження роботи макетного взірця ЕПМЕТ як теплового генератора для малих ВЕУ.

### Виклад основного матеріалу

#### Методика моделювання магнітного і теплового полів

Проектування такого електромагнітного ЕПМЕТ та оптимізація його конструкції можливі лише комп'ютерним моделюванням змінного електромагнітного і створюваного ним теплового полів. Проте це пов'язано з непростим завданням моделювання вихрових струмів. Для цього розроблено таку методику.

Як уже зазначалося в [9], для будь-якої струмопровідної ділянки з електричною провідністю  $S$  та магнітною проникністю  $m$  вектор повної густини струму  $\bar{J}$  умовно складається з трьох складових, зумовлених: стороннім електричним полем, зміною магнітного поля в часі та рухом середовища в магнітному полі:

$$\bar{J} = S \left( -\nabla V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + [\bar{v} \times \bar{B}] \right), \quad (1)$$

де  $V$  – скалярний електричний потенціал зовнішнього поля;  $\bar{A}$  – векторний магнітний потенціал;  $\bar{v}$  – вектор швидкості руху середовища;  $\bar{B}$  – вектор індукції магнітного поля.

Беручи до уваги закон повного струму, можемо стверджувати, що магнітне поле у струмопровідних ділянках описується рівнянням

$$\nabla \left( S \nabla V + S \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - S [\bar{v} \times [\nabla \times \bar{A}]] \right) = 0, \quad (2)$$

де  $\nabla$  – диференціальний оператор Гамільтона.

Рівняння (2) разом з граничними умовами становить зміст математичного формулювання задачі розрахунку нестационарного магнітного поля з урахуванням навантажень електромагнітного та механічного походження, а поле густини струму визначатиметься виразом (1). Розв'язання (2) в загальному випадку вимагає інтегрування і за просторовими, і за часовою координатами.

Розрахунок магнітного поля в ЕПМЕТ можна розглядати як частковий випадок цієї задачі – прямолінійний рівномірний рух струмопровідного тіла у стаціонарному магнітному полі. При цьому: по-перше, у рівняннях (1) і (2) залишається лише третій доданок; по-друге, якщо звести задачу до двовимірної й сумістити з напрямом руху одну з координатних осей ортогональної системи координат, стає можливим істотно спрощення процедури розв'язання рівняння (2).

Прийmemo, що струмопровідне рухоме тіло має сталий переріз та безмежну довжину вздовж осі  $x$ , в напрямі якої здійснюватиметься рух з постійною лінійною швидкістю  $v_x$ . Також прийmemo незмінність магнітної проникності  $m$  тіла в усіх напрямках. Тоді рівняння (2) перетвориться на

$$-u_s \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + u_s \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} - v_x S_s \frac{\partial A_z}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

де  $A_z$  – проекція вектора  $\bar{A}$  на вісь  $z$ ;  $u_s = (m m_0)^{-1}$  – інверсна магнітна проникність середовища (нижній індекс « $s$ » означає приналежність до ділянки з ізотропними магнітними та електричними властивостями).

Рівняння (3) містить лише просторові похідні, що дає змогу розрахувати поле густини струму  $J_z$  не здійснюючи інтегрування за часом. Використовуючи метод скінченних елементів, ця задача зведеться до розв'язання системи нелінійних рівнянь. Середня кількість арифметичних операцій для запропонованого підходу є такою самою, як і для аналогічної задачі магнітостатики ( $v_x = 0$ ).

Отримавши поле густини струму, втрати потужності на одиницю довжини в двовимірних струмопровідних ділянках  $S$  знаходимо як

$$P = S^{-1} \int_0^S |\bar{J}|^2 dS, \quad (4)$$

де  $S^{-1}$  – матриця питомого електричного опору струмопровідного середовища;  $dS$  – площа елементарної ділянки.

З метою перевірки запропонованого методу був проведений фізичний експеримент, результати якого підтвердили адекватність розробленої методики математичного моделювання (розбіжність між результатами моделювання та експериментом не перевищували 15 %) [8].

У відповідності до прийнятих допущень та розробленої методики, створена математична модель розрахунку електромагнітних процесів у ЕПМЕТ, яка дає змогу визначити потужність

тепловиділення у немагнітному шарі та сталевому диску ротора ЕПМЕТ, а також забезпечує проведення оптимізаційних досліджень. Програмна реалізація цієї моделі виконана мовою APDL (ANSYS Parametric Design Language).

### Проектування та створення макетного взірця ЕПМЕТ

Завдання дослідження полягало в такому: спроектувати ЕПМЕТ, розрахований на номінальну теплову потужність 500 Вт, за частоти обертання 250 об/хв. Потужність, що витратиться на збудження, не повинна перевищувати 25 Вт. ККД у номінальному режимі, враховуючи також механічні втрати у ЕПМЕТ, повинен бути не нижчий, ніж 0,92. Максимальний діаметр конструкції не повинен перевищувати  $d_{\max} = 500$  мм.

Складність розроблення такого нового технічного об'єкта полягає у відсутності методик чи рекомендацій, що містили би попередній досвід проектування подібних пристроїв. Тому було вирішено за допомогою польового комп'ютерного моделювання оптимізувати конструкцію за кількома визначальними проектними параметрами. Для оптимізації обрано метод покоординатного спуску. Оптимізацію конструкції проводили послідовно, за кількома функціями мети.

На початковому етапі проекту визначали такі розміри конструкції, які за певних габаритних обмежень  $d_{\max}$  та фіксованої частоти обертання забезпечують необхідний рівень теплової потужності, що виділятиметься в роторі ЕПМЕТ. Незалежними змінними проекту обрано такі 7 величин (див. рис. 2): лінійна швидкість руху точки, що належить середньому діаметру  $d_{\text{ср}}$  тепловиділяючого диска ротора –  $v_{\text{л}}$ ; кількість зубців індуктора –  $z$ ; ширина паза індуктора –  $b_{\text{п}}$ ; повна площа перерізу котушки обмотки збудження –  $S_{\text{кт}}$ ; ширина шліца –  $b_{\text{шл}}$ ; висота шліца –  $h_{\text{шл}}$ ; товщина тепловиділяючого диска ротора –  $\delta_{\text{д}}$ . Залежними змінними були відповідно: висота котушки –  $h_{\text{кт}}$ ; середній діаметр тепловиділяючого диска ротора –  $d_{\text{ср}}$ ; середня ширина зубця індуктора –  $b_{\text{зс}}$ ; зовнішній діаметр ярма індуктора –  $d_{\text{зв}}$ ; середня довжина витка котушки обмотки збудження –  $l_{\text{вс}}$ ; кількість витків однієї котушки обмотки збудження –  $w_{\text{кт}}$ ; діаметр провідника котушки обмотки збудження –  $d_{\text{пр}}$ . Усі залежні змінні визначаються через незалежні та вимоги технічного завдання.

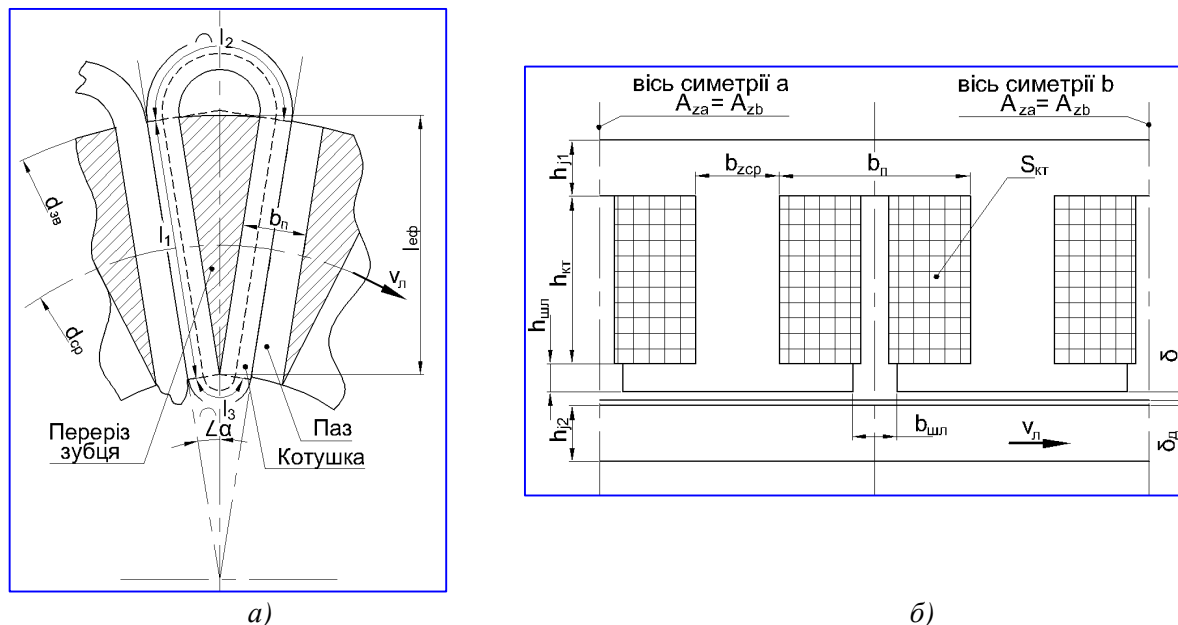


Рис. 2. Розрізи конструкції ЕПМЕТ з основними параметрами двовимірної моделі:  
 а – індуктора площиною, перпендикулярною до осі обертання;  
 б – індуктора і ротора циліндричною поверхнею за діаметром  $d_{\text{ср}}$

Отримавши початкові уявлення про залежність діаметра  $d_{зв}$  від незалежних змінних та звузивши діапазон їх зміни, вирішено ввести остаточну функцію мети. З огляду на зменшення теплової сталої часу ТМЕН, а також на його вартість, за таку функцію обрана сумарна маса магнітопровідних елементів конструкції: ярмо статора та ротора, а також зубців статора. Змінюючи по чергово незалежні змінні та аналізуючи обмеження, проводилася мінімізація функції мети. Результати пошуку оптимуму спричинили таку комбінацію розмірів:  $z = 20$ ,  $d_{сп} = 260$  мм,  $d_{зв} = 340$  мм,  $b_{зсс} = 17$  мм,  $b_{п} = 28$  мм,  $h_{кт} = 42$  мм,  $w_{кт} = 138$ ,  $d_{пр} = 1,7$  мм.

На рис. 3 наведено приклад скінченно-елементної моделі розрахункового сектора ЕПМЕТ, а також отримані в результаті розрахунку поля температури у частинах конструкції.

Іншим завданням було визначення оптимальної товщини  $\delta_d$  (рис. 2, б) електропровідного неферомагнітного шару в робочому проміжку – на поверхні феромагнітного диска, що обертається. Результати математичного моделювання [8] показали, що за товщини мідного шару 0,3–0,4 мм, нанесеного на поверхні сталевго диска товщиною 6 мм, у разі його обертання з номінальною частотою понад 90 % загального теплового потоку величиною 500 Вт виділяється у тонкому мідному шарі. Без цього шару в самому сталевому диску за тих самих параметрів генерувалося б лише 130 Вт теплового потоку.

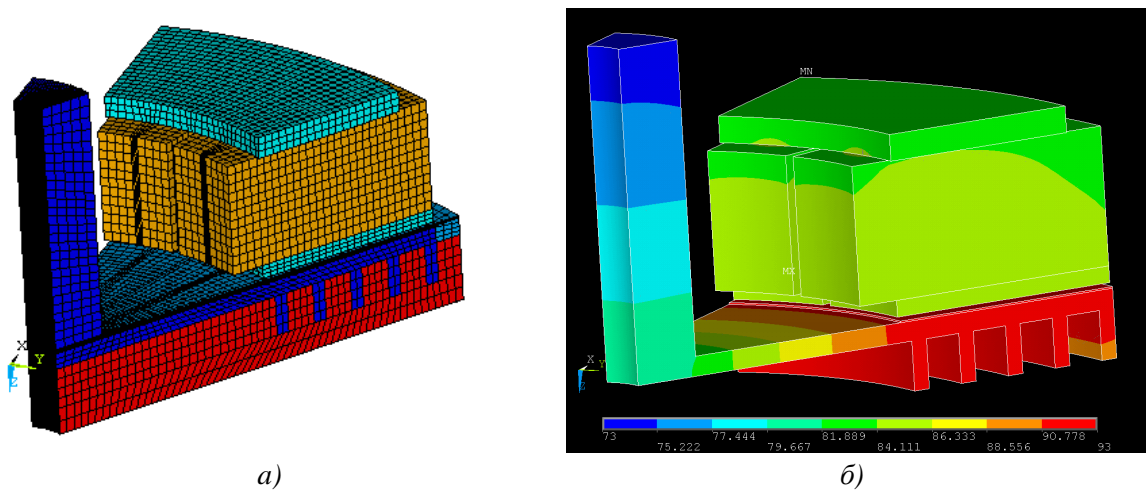
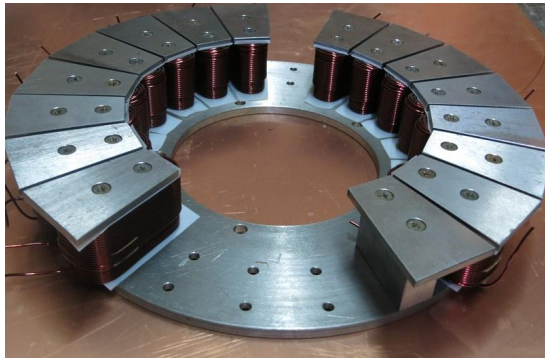


Рис. 3. Скінченно-елементна модель ЕПМЕТ (а) та результати розрахунку полів температури в окремих частинах ЕПМЕТ,  $^{\circ}\text{C}$  (б)

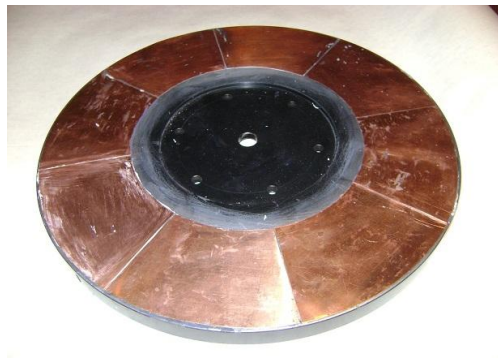
### Створення макетного взірця ЕПМЕТ та результати експериментальних досліджень його роботи

Відповідно до результатів розрахунку за розробленою методикою, спроектовано і виготовлено макетний взірець ЕПМЕТ з номінальною потужністю 500 Вт, яку досягають за частоти обертання ротора 250 об/хв та струму збудження 2 А і напруги обмотки збудження 12 В. Основні елементи конструкції макетного взірця показано на рис. 4.

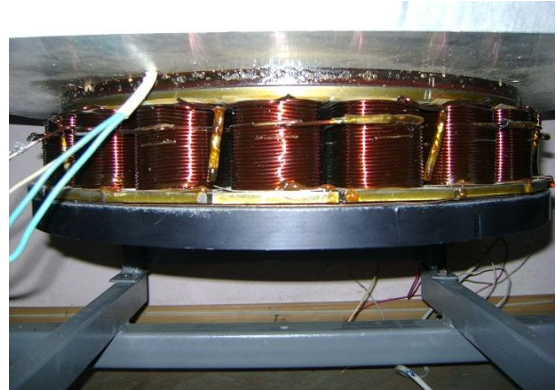
ЕПМЕТ разом з макетним взірцем електричного генератора – двохякірного синхронного генератора з постійними магнітами потужністю 300 Вт – виконано у вигляді одного блока генераторів. Останній 1 на створеному експериментальному стенді (рис. 5) приводить у рух двигун постійного струму 2 через черв'ячний редуктор 3. На цьому стенді проведено цикл експериментальних досліджень роботи ЕПМЕТ на різних частотах обертання з різними струмами збудження. Генеровану в роторі ЕПМЕТ теплову потужність розраховували як різницю між потужністю, споживаною приводним двигуном, і потужністю його електричних втрат, втрат неробочого ходу та механічних втрат стенда. Результати досліджень (рис. 6) підтвердили працездатність ЕПМЕТ та непогане узгодження його робочих характеристик із розрахунковими проектними.



a)



б)



в)

Рис. 4. Основні елементи конструкції макетного взірця ЕПМЕТ:  
а – індуктор з 20 полюсами; б – ротор з мідним поверхневим шаром;  
в – макетний взірець у зібраному вигляді

Рис. 5. Експериментальний стенд для дослідження блока генераторів ВЕУ з ВВО:  
1 – макетний взірець блока генераторів;  
2 – привідний двигун; 3 – редуктор

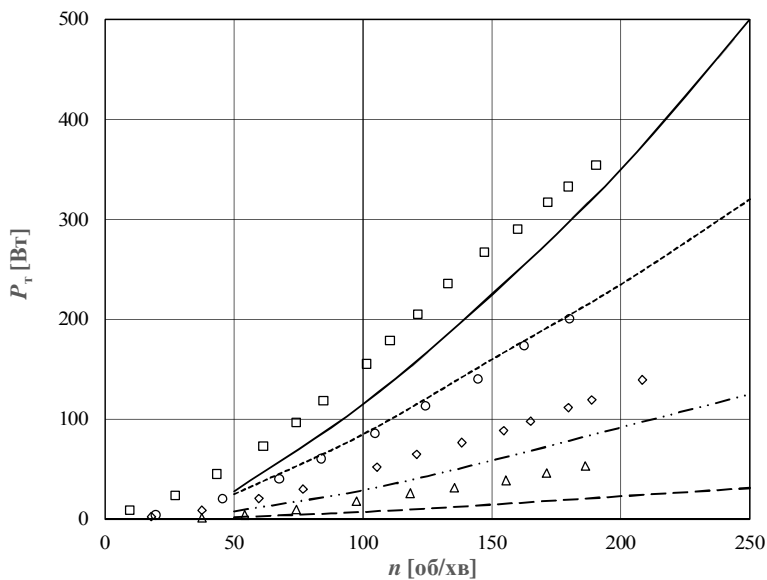


Рис. 6. Залежності теплового потоку в роторі ЕПМЕТ  $P_T$  від його частоти обертання  $n$  за різних значень струму збудження  $I_f$

## Висновки

1. Створена параметризована за розмірами математична модель для розрахунку тепловиділення в роторі ЕПМЕТ, яка ґрунтується на теорії електромагнітного поля, та відповідна методика проектування таких теплогенераторів, що містить елементи оптимізаційного аналізу конструкції.

2. Адекватність проектного розрахунку ЕПМЕТ потужністю 500 Вт підтверджена результатами експериментальних досліджень на стенді з виготовленим макетним взірцем цього пристрою.

1. Simic Z. *Small Wind Turbines – a Unique Segment of the Wind Power Market* / Z.Simic, J.Havelka, M.Vrhovcak // *Renewable Energy*. – 2014. – No. 50. – P. 1027–1036.
2. Mirecki A. *Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines* / A.Mirecki, X.Roboam, F.Richardeau // *IEEE Trans. Ind. Electr.* – 2007. – V. 54. – No. 1. – P. 660–669.
3. Bhutta M. *Vertical Axis Wind Turbine – a Review of Various Configurations and Design Techniques* / M.Bhutta, N.Hayat, A.Farooq, Z.Ali, S.Jamil, Z. Hussain // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – No. 16. – P. 1926–1939.
4. Goude A. *Robust VAWT Control System Evaluation by Coupled Aerodynamic and Electrical Simulations* / A.Goude, F.Bölou // *Renewable Energy*. – 2013. – No. 59. – P. 193–201.
5. Горелов Д. Н. *Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения* / Д. Н. Горелов, Омский филиал института математики им. С.Л.Соболева СО РАН. – Омск: Полиграфический центр КАН, 2012. – 68 с.
6. Лукутин Б.В. *Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. Монография* / Б. В. Лукутин, О. А.Суржикова, Е. Б.Шандарова. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
7. Патент UA 105743. МПК F03D 9/02, H05B 6/10. *Вітрова теплоелектростанція* / І. З. Щур, О. В. Макарчук, В. І. Щур, В. І. Климко. – Заявл. 15.07.2013, Опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.
8. Makarchuk O. *The Electromagnetic Transformer of Mechanical Energy into Heat for Wind Turbine* / O.Makarchuk, A.Rusek, I.Shchur, V.Shchur // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2015. – No. 1. – P. 179–182.
9. Макарчук О. В. *Втрати потужності від вихрових струмів в роторі високошвидкісного генератора зі збудженням від постійних магнітів* / О. В. Макарчук // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – № 1. – С. 56–61.