

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА З ОБЕРТОВОЮ ПОЛОВИНОЮ ДЛЯ РІЗНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

© Щур І.З., Ковальчук А.І., 2014

Для запропонованої нетрадиційної конструкції автономної контрроторної вітроелектроустановки (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання (ВВО) з метою безконтактного передавання та регулювання виробленої електроенергії застосовується спеціальний трансформатор з обертовою половиною (ТЗОП). Використовуючи метод експертного оцінювання, визначено прогнозовану ринкову вартість нового пристрою. Проведено техніко-економічну оптимізацію параметрів конструкції трансформатора для низки потужностей автономних контрроторних ВЕУ з ВВО. Підтверджено доцільність застосування ТЗОП в автономній ВЕУ через його нижчу від прогнозованої собівартість.

*Ключові слова: автономна контрроторна вітроелектроустановка з вертикальною віссю обертання, трансформатор з обертовою половиною, метод експертного оцінювання, техніко-економічна оптимізація.*

For the proposed non-traditional design of autonomous contra-rotating wind turbine with vertical axis of rotation (VAWT) applies a special transformer with rotating half (TRH) for the purpose of noncontact transmission and regulation of electricity generated. The predicted market value of the new device is defined using the method of expert evaluation. Technical and economic optimization of design parameters of the transformer have been performed for a number of power of autonomous contra-rotating VAWT. Expediency of application of TRH in the autonomous wind turbine was confirmed by its lower cost compared with predicted.

*Key words: autonomous contra-rotating wind turbine with a vertical axis of rotation, a transformer with rotating half, method of expert evaluation, technical and economic optimization.*

### Вступ

Виснаження запасів викопного палива, а також тривожні сигнали глобального потепління у зв'язку зі збільшенням в атмосфері відсотку парникових газів поштовхнули інтерес світової спільноти в галузі поновлювальних джерел енергії, зокрема й енергії вітру.

Перетворення енергії в сучасних вітроелектроустановках (ВЕУ) відбувається в два етапи. Для першого перетворення – відбір потужності від рухомого повітряного потоку – застосовуються спеціальні аеромеханічні вітроколеса. Цей процес детально розглядається в аеродинаміці. Другий етап – перетворення механічної енергії в електричну – передбачає використання електричного генератора та інших перетворювачів параметрів електроенергії.

Використання у ВЕУ синхронних генераторів з постійними магнітами (СГПМ) підвищує електричну ефективність ВЕУ порівняно з генераторами з електромагнітним збудженням чи асинхронними генераторами [1]. Якщо розглядати генератори з постійними магнітами та великою кількістю полюсів, то вони можуть працювати на значно нижчих частотах обертання. У таких випадках ВЕУ не потребують мультиплікаторів – редукторів для підвищення частоти обертання генератора, що додатково скорочує капітальні затрати на ВЕУ, а також час і витрати на їх обслуговування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питома вартість генератора для ВЕУ (грн/кВт) обернено пропорційна до його номінальної кутової швидкості [2]. Пропонується використовувати контрроторну ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО), що складається з двох співвісних вітроколів та електрогенератора, індуктор (ротор) якого прикріплений до одного лопатевого колеса, а якір (контрротор) – до іншого. При цьому ротор і контрротор обертаються в різні сторони. За рахунок такої конструкції ВЕУ кутова швидкість генератора становить  $w_e = w_1 + w_2$ , де  $w_1$ ,  $w_2$  – кутові швидкості відповідно ротора та контрротора. Якщо  $w_1 = w_2$ , то застосування контрроторної системи вітроколеса дає змогу збільшити вдвічі кутову швидкість генератора. Це істотно зменшує розміри і вартість генератора [3].

Проте у контрроторній ВЕУ виникає проблема у передаванні виробленої електричної енергії з якоря генератора з постійними магнітами, який розміщений на рухомій частині ВЕУ (контрроторі). Стандартним вирішенням цієї проблеми є використання контактних кілець, проте вони знижують надійність роботи ВЕУ [4].

Для безконтактного передавання та регулювання виробленої електричної енергії з рухомих частин контрроторної ВЕУ з ВВО пропонується використати спеціальний трансформатор з обертовою половиною (ТзОП) [2, 5]. Відводи на його вторинній обмотці надають можливість регулювати напругу генератора за законом, необхідним для максимального відбору енергії від вітру та подальшого найраціональнішого використання генерованої електроенергії.

Проаналізувавши функціональні та конструктивні особливості, було прийнято варіант ТзОП, первинна та вторинна обмотки кожної з фаз якого вкладені в окремі пів-осердя, що можуть обертатися одне стосовно до іншого [3]. ТзОП можна зарахувати до нетипових об'єктів електромеханіки. За основу його проектного розрахунку було прийнято методику розрахунку традиційних трансформаторів малої потужності [6] з деякими особливостями, які враховують наявність повітряного проміжку та пов'язані з цим збільшення втрат, змінні за величиною частоту та напругу, що надходить від генератора, а також силу притягання між двома півосерддями [3].

За результатами розрахунку було виготовлено макетний взірець однієї фази для трифазного ТзОП потужністю 400 Вт. Проведені експериментальні дослідження загалом підтвердили та дали змогу уточнити застосовану методику проектування [3]. Отримані теоретичні та експериментальні результати можуть бути основою для оцінювання техніко-економічних показників ТзОП для низки автономних контрроторних ВЕУ з ВВО малої потужності.

### Мета статті

Проведення техніко-економічної оптимізації ТзОП для низки потужностей автономних контрроторних ВЕУ з ВВО.

### Матеріал і результати досліджень

Автономна контрроторна ВЕУ з ВВО, у якій присутній ТзОП, що здійснює безконтактне передавання та регулювання виробленої електроенергії, має нетрадиційну конструкцію. Тому для визначення вартісних часток основних складових ВЕУ (несуча конструкція з двома вітроколесами Н-типу; генератор – СГПМ; ТзОП; електронний блок регулювання, до якого входять симістори, логічний контролер, діодний випрямляч; акумуляторні батареї) було використано методику експертного оцінювання. До складу експертів було залучено 5 осіб, які мають певні теоретичні та практичні навички у напрямі вітроенергетики. Їм було доручено оцінити відносну вартість основних складових автономної контрроторної ВЕУ з ВВО (рис. 1). У табл. 1 наведено результати опитування експертів.

Основним завданням експертного оцінювання була побудова узагальненої оцінки об'єктів на основі індивідуальних оцінок експертів.

Визначають узгодженість думок експертів за допомогою обчислення числової міри, що характеризує ступінь близькості індивідуальних думок. Аналіз значення міри узгодження сприяє отриманню правильного судження про загальний рівень знань з вирішуваної проблеми й виявленню групових думок експертів [8].

Можливість одержання групової експертної оцінки підсумуванням індивідуальних оцінок з вагами компетентності й важливості ґрунтується на виконанні:

- аксіом теорії корисності Неймана-Моргенштерна для індивідуальних і групових оцінок [9];
- умов нерозрізненості об'єктів у груповому відношенні, якщо вони не розрізнені у всіх індивідуальних оцінках (частковий принцип Парето) [10].

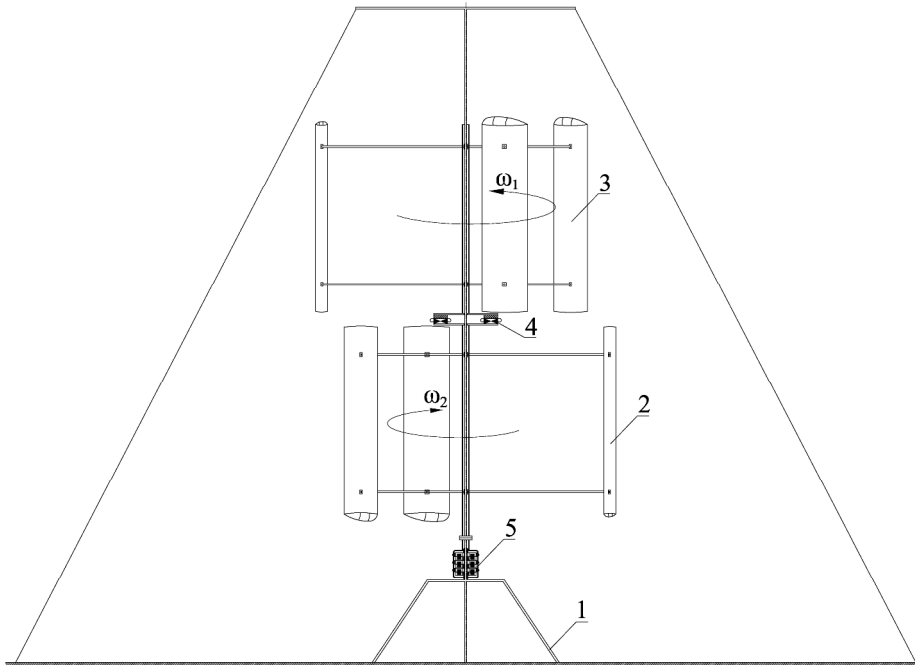


Рис. 1. Автономна контрроторна ВЕУ з ВВО:

1 – несуча конструкція; 2 – вітроколесо №1; 3 – вітроколесо №2; 4 – генератор; 5 – ТзОП

Таблиця 1

### Результати опитування експертів

Складові ВЕУ	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5
Несуча частина з вітроколесами	0,28	0,31	0,15	0,21	0,385
Генератор	0,27	0,31	0,35	0,3	0,2
ТзОП	0,15	0,19	0,18	0,12	0,15
Електронний блок регулювання	0,03	0,025	0,02	0,02	0,015
Акумуляторні батареї	0,27	0,165	0,3	0,35	0,25

Коефіцієнти компетентності експертів можна обчислити за апостеріорними даними, тобто за результатами оцінки об'єктів. Основною ідеєю цього обчислення є припущення про те, що компетентність експерта потрібно оцінювати за ступенем погодженості його оцінок із груповою оцінкою об'єктів.

Наведемо алгоритм обчислення групових оцінок і коефіцієнтів компетентності експертів:

1) початкове значення коефіцієнтів компетентності для всіх експертів:

$$k_j^0 = \frac{1}{m}, \quad (j = \overline{1, m}), \quad (1)$$

де  $j$  – номер експерта;  $m$  – кількість експертів.

Отже, початкові значення коефіцієнтів компетентності для всіх експертів приймаються однаковими;

2) рекурентні співвідношення для таких наближень:

- групова оцінка для  $i$ -го об'єкта на  $t$ -му кроці на основі індивідуальних оцінок  $x_{ij}$

$$x_i^t = \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j^{t-1}, \quad (i = \overline{1, n}); \quad (2)$$

- нормуючий коефіцієнт

$$I^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_i^t x_{ij}; \quad (3)$$

- коефіцієнт компетентності  $j$ -го експерта на  $t$ -му кроці

$$k_j^t = \frac{1}{I^t} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^t, \quad (j = \overline{1, m-1}); \quad (4)$$

- коефіцієнт компетентності  $m$ -го експерта за умови нормування

$$k_m^t = 1 - \sum_{j=1}^{m-1} k_j^t. \quad (5)$$

- 3) ітераційний процес закінчується у разі виконання умови збіжності

$$\max \left( \left| x_i^t - x_i^{t-1} \right| \right) \leq E, \quad (6)$$

де  $E$  – точність обчислення.

Групова оцінка на першому кроці для основних складових ВЕУ після опрацювання опитувань експертів (табл. 1) згідно з (1) та (2): несуча частина з вітроколесами – 0,267, генератор – 0,286, ТзОП – 0,158, електронний блок регулювання – 0,022, акумуляторні батареї – 0,267.

Нормуючий коефіцієнт  $\lambda$  на першому кроці 1,249.

Визначаємо коефіцієнти компетентності для кожного експерта: 1-го експерта – 0,199, 2-го експерта – 0,197, 3-го експерта – 0,199, 4-го експерта – 0,204, 5-го експерта – 0,201.

Визначаємо групову оцінку на другому кроці для основних складових ВЕУ: несуча частина з вітроколесами – 0,267, генератор – 0,286, ТзОП – 0,158, електронний блок регулювання – 0,022, акумуляторні батареї – 0,268.

Порівнюючи результати групової оцінки на першому та другому кроці, спостерігаємо, що справджується ознака закінчення ітераційного процесу (6), а отже, результати другої ітерації приймаються як результати опрацювання експертного оцінювання.

Проаналізувавши ринкову вартість автономної ВЕУ з ВВО різних виробників, а також результати експертної оцінки, визначаємо прогнозовану ринкову вартість трифазного ТзОП (табл. 2).

Таблиця 2

**Прогнозована вартість трифазного ТзОП**

Потужність автон. ВЕУ з ВВО, кВт	0,4	1	2	5	10
Вартість автон. ВЕУ з ВВО, грн.	7360	17600	33600	76000	120000
Питома вартість авт. ВЕУ з ВВО, грн./кВт	18400	17600	16800	15200	12000
Прогнозована ринкова вартість 3-ф ТзОП, грн.	1163	2781	5309	12008	18960

Розглянувши розроблену методику проектного розрахунку [3], проаналізовано, що для реалізації задачі визначення оптимальних техніко-економічних показників можна оперувати двома варіативними параметрами під час здійснення розрахункових операцій: внутрішній діаметр осердя та індукція в осерді. Під техніко-економічними показниками розуміємо коефіцієнт корисної дії та вартість ТзОП.

Зниження габаритів (внутрішнього діаметра осердя) призводить до зменшення середньої довжини витка обмотки, але, своєю чергою, зменшується і площа перерізу осердя  $S_0$ . Як наслідок – необхідно збільшити кількість витків:

$$w_1 = \frac{k_e \cdot U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot B_0 \cdot S_0}, \quad (7)$$

де  $U_1$  – номінальна фазна напруга первинної обмотки;  $k_e = 0,82$  – коефіцієнт, що враховує зменшення ЕРС обмотки під навантаженням;  $f_1$  – частота напруги живлення;  $B_0$  – індукція в осерді;  $S_0$  – площа перерізу в осерді.

Проаналізувавши вищенаведене, бачимо, що немає прямої залежності між габаритними розмірами та вартістю ТзОП. Індукція в осерді також впливає на техніко-економічні показники. Її збільшення приводить до зменшення площі перерізу осердя і, як наслідок, – до зниження вартості ТзОП. Але у разі збільшення індукції в осерді збільшуються втрати в сталі, а отже, погіршуються технічні показники через зниження ККД об'єкта. Зниження індукції в сталі призведе до підвищення вартості через збільшення маси електротехнічної сталі для виготовлення осердя.

Отже, технічні та економічні показники ТзОП залежно від різних факторів не є прогнозованими. Тому необхідно розв'язати оптимізаційну задачу для визначення найкращої конструкції ТзОП.

Маючи дві функції мети (вартість та ККД) та два аргументи (внутрішній діаметр осердя та індукція в осерді), отримуємо двопараметричну задачу визначення оптимальної технічно та економічно обгрунтованої конструкції ТзОП. Щоб спростити аналіз та підвищити наочність результатів, покажемо просторові залежності ізолініями на площинах. Використовуючи методика проектування розрахунку [3], обчислено маси активних матеріалів. Вартість трифазного трансформатора обчислювалася як вартість активних матеріалів та додаткові 30% від неї, які ідуть на опорно-поворотний вузол та корпус, а також 40% – на його виготовлення. Також розраховувалися параметри заступної схеми ТзОП, які потім підставляли в імітаційну комп'ютерну модель [6] для розрахунку втрат у ТзОП та його ККД.

На підставі вищенаведеної процедури, змінюючи внутрішній діаметр осердя в межах від 0,04 до 0,12 м, а індукцію в сталі – від 0,14 до 0,6 Тл, визначено вартість ТзОП потужністю 400 Вт та його ККД. На рис. 2 наведено результати дослідження.

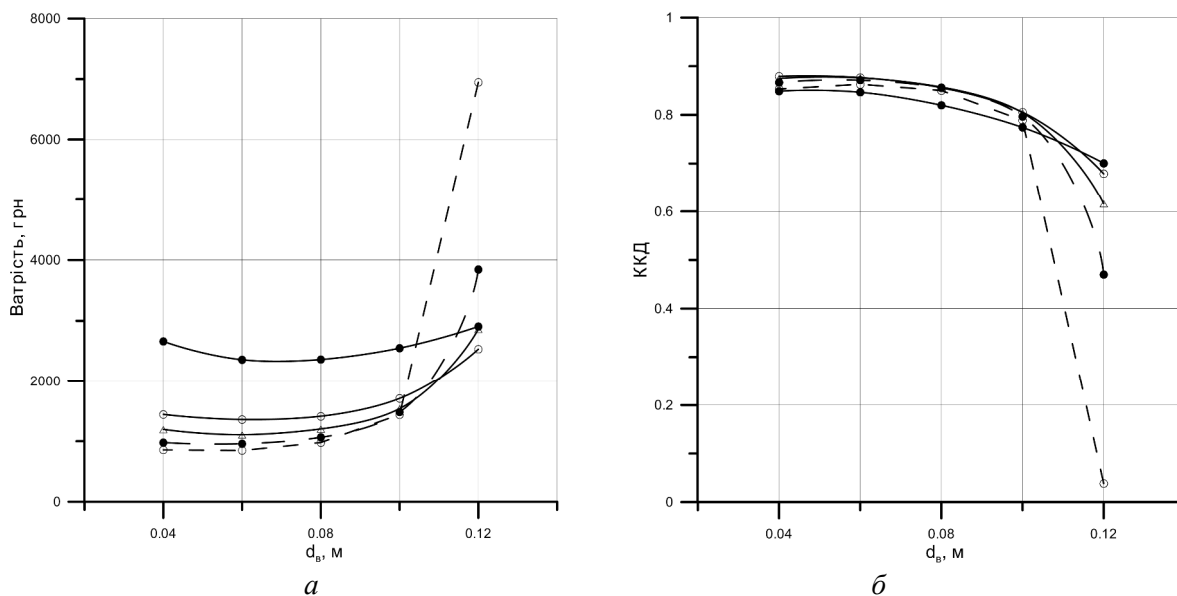


Рис. 2. Техніко-економічні показники ТзОП потужністю 400 Вт: а – вартість трифазного ТзОП; б – ККД (при індукції в сталі: ●●● – 0,14 Тл; ○○○ – 0,3 Тл; ▲▲▲ – 0,4 Тл; ●●● – 0,5 Тл; ○○○ – 0,6 Тл)

Проаналізувавши залежності на рис. 2, вибрано найкращий варіант конструкції ТзОП при внутрішньому діаметрі осердя 0,06 м та індукції в ньому – 0,5 Тл.

Процедуру визначення вартості та ККД проведено для низки потужностей ВЕУ: 1 кВт, 2 кВт, 5 кВт та 10 кВт. При цьому варіативною змінною залишається лише внутрішній діаметр осердя, а індукція в ньому фіксується на рівні 0,5 Тл, яка визначена з попередньої задачі як оптимальна. Отже, двопараметрична задача спрощується і перетворюється на дві однопараметричні залежності: вартість та ККД від внутрішнього діаметра осердя.

Для здійснення оптимізації техніко-економічних показників ТзОП вводиться узагальнений геометричний критерій  $\Gamma(\eta, B)$ , який залежить від ККД та вартості трифазного ТзОП:

$$\Gamma = k_1 \cdot \frac{1}{h} + k_2 \cdot B^* \quad (2)$$

де  $k_1$  – ваговий коефіцієнт впливу ККД на узагальнюючий критерій техніко-економічної оптимізації;  $h$  – ККД ТзОП;  $k_2$  – ваговий коефіцієнт впливу вартості на узагальнюючий критерій техніко-економічної оптимізації;  $B^* = B/B_c$  – відносна вартість ТзОП;  $B$  – вартість трифазного ТзОП;  $B_c$  – середня вартість ТзОП за різних значень внутрішнього діаметра осердя.

Найнижче значення критерію (2) означає найкращу конструкцію, враховуючи техніко-економічні міркування. Вагові коефіцієнти  $k_1$  та  $k_2$ , що визначають пріоритетність аргументів у геометричному критерії оптимізації, було прийнято такими:  $k_1 = k_2 = 0,5$ . Результати процедури оптимізації для низки потужностей наведено у табл. 3.

Таблиця 3

### Результати оптимізаційних досліджень

Потужність ТзОП, кВт	Внутрішній діаметр осердя, м	Вартість трифазного ТзОП, грн	ККД	Відносна вартість	Значення геометричного критерію оптимізації $\Gamma$
1	0,12	2618	0,85	1,24	1,208
	0,1	2094	0,83	0,99	1,095
	0,08	1884	0,81	0,89	1,058
	0,06	1877	0,80	0,89	1,069
2	0,12	3397	0,84	1,09	1,137
	0,1	3036	0,82	0,97	1,093
	0,08	2975	0,81	0,95	1,092
	0,06	3097	0,80	0,99	1,121
5	0,12	5824	0,91	0,97	1,036
	0,1	5862	0,91	0,98	1,037
	0,08	5926	0,91	0,99	1,043
	0,06	6392	0,91	1,07	1,083
10	0,16	10241	0,88	1,03	1,085
	0,14	9799	0,87	0,98	1,069
	0,12	9680	0,86	0,97	1,068
	0,1	9897	0,86	0,99	1,080
	0,08	10231	0,85	1,03	1,100

На рис. 3 наведено графічні залежності обчисленого узагальнюючого геометричного критерію  $\Gamma$  для ТзОП різної потужності.

Проаналізувавши залежності на рис. 3, визначаємо оптимальні варіанти конструкції ТзОП та їхні техніко-економічні показники. Вони наведені у табл. 4.

Таблиця 4

### Оптимальні варіанти конструкції ТзОП та їхні техніко-економічні показники

Потужність ТзОП $P$ , кВт	Індукція в осерді $B$ , Тл	Внутрішній діаметр осердя $d_{\text{вн}}$ , м	Вартість трифазного ТзОП, грн	Прогнозована ринкова вартість ТзОП, грн	ККД
0,4	0,5	0,06	959	1163	0,87
1	0,5	0,08	1884	2781	0,81
2	0,5	0,08	2975	5309	0,81
5	0,5	0,1	5862	12008	0,91
10	0,5	0,12	9680	18960	0,86

## Висновки

Проведено техніко-економічну оптимізацію ТЗОП для низки потужностей автономних контрроторних ВЕУ з ВВО. Технічним критерієм у задачі оптимізації розглядався ККД об'єкта, а економічним – його вартість. Використовуючи метод експертного оцінювання, визначили прогнозовану ринкову вартість трифазного ТЗОП. Проаналізувавши результати експертної оцінки та розрахованої вартості ТЗОП, можемо побачити, що реальна вартість ТЗОП для всіх потужностей автономних контрроторних ВЕУ з ВВО є нижчою, ніж прогнозована. Це підтверджує, що ТЗОП не призводить до здорожчення ВЕУ загалом. Причому, чим більша потужність ВЕУ, тим ефективнішим є застосування ТЗОП для безконтактного передавання та регулювання параметрів виробленої електроенергії за законом, необхідним для подальшого найраціональнішого її використання.

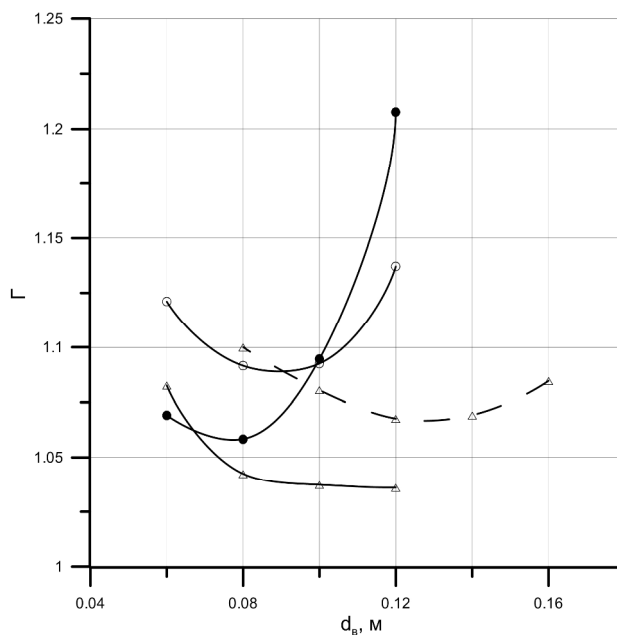


Рис. 3. Узагальнений геометричний критерій оптимізації конструкції ТЗОП:

●—●—●— 1кВт; ○—○—○— 2кВт; ▲—▲—▲— 5кВт;  
▲—▲—▲— 10кВт

1. Щур І.З. Енергетична ефективність різних способів відбору потужності від синхронного генератора з постійними магнітами у вітроенергоустановці / І.З. Щур, О.Р. Турленко // *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2009. – Вип. 654. – С. 55–57. 2. Ковальчук А.І. Обертвий трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання / А.І. Ковальчук // *Зб. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації»*, 28–29 березня 2012 р., Кременчук. – Кременчук: Кременч. нац. ун-т ім. Михайла Остроградського, 2012. – С. 122–123. 3. Ковальчук А.І. Трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання / А.І. Ковальчук // *Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. – № 736. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2012. – С. 59–63. 4. Яцун М. А. Електричні машини: підручник / М.А. Яцун. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2011. – 464 с. 5. Патент на корисну модель UA 80216 U, МПК F03D 3/02, F03D 7/04. Безконтактна контрроторна вітроустановка / О.В. Макарчук, І.З. Щур, А.І.Ковальчук; заявник і патентовласник Нац. ун-т «Львівська політехніка». – № u201207720, заявл. 25.06.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 10. 6. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности / Н.П. Ермолин – Л.: Энергия, 1969. – 192 с. 7. Щур І.З. Імітаційне моделювання трансформатора з обертвою половиною у складі контрроторної вітроелектроустановки / І.З. Щур, А.І. Ковальчук // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 330–335. 8. Орлов А.И. Теория принятия решений: учеб. пособ. / А.И.Орлов. – М.: Изд-во «Экзамен», 2005. – 656 с. 9. Дж.фон Нейман Теория игр и экономическое поведение / Дж.фон Нейман, О. Моргенштерн – М.: Наука, 1970. – 707 с. 10. Яблонский А.И. Стохастические модели научной деятельности / А.И. Яблонский Системные исследования. Ежегодник. – М.: Наука, 1975. – С. 5–43.