

В.Д. КОСЕНКОВ

Хмельницький національний університет

Д.А. ІВЛЕВ, В.В. БУЛГАР, С.М. ОГІНСЬКА, Т.М. МОСПАН

Одеський національний політехнічний університет

КОРЕГУВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сьогодні ринок найбільш популярних вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності 1–5 кВт поділяється на два нерівнозначні сегменти: великий сегмент дешевих, але енергонеефективних високообертових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 10–12 м/с; малий сегмент енергоефективних, але дорогих низькообертових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 8–9 м/с. Вартість низькообертової ВЕУ в середньому в 3–4 рази вище вартості високообертової ВЕУ однієї й тієї ж потужності, що багато в чому обумовлено вартістю постійних магнітів. Експериментальний зразок низькообертового енергонеефективного генератора постійного струму з безобмотковим ротором і електромагнітним збудженням коштує в 2,2 рази дешевше серійного аналога. Загальна вартість установки стає порівнянною з вартістю високообертових установок. Методика проектування даного генератора базувалася на теоретичному аналізі магнітних і теплових моделей. Результати фізичних випробувань експериментального зразка дозволили внести в його методику проектування ряд доповнень і уточнень. Теплові випробування підтвердили правильність вибору значень електромагнітних навантажень. Експеримент показав, що дана конструкція здатна витримувати 5-кратне перевантаження по струму без додаткових полюсів і компенсаційної обмотки. Отримані результати експерименту дозволили уточнити методику проектування й виробити додаткові рекомендації із проектування даного генератора: вибирати число полюсів, враховуючи величину частоти перемагнічування в центральному статорі; прийняти величину полюсного перекриття рівною $\alpha_\delta = 0,55\text{--}0,6$. Результати експериментів показують, що навіть із урахуванням виявлених особливостей конструкції даний генератор можна розглядати в якості вигідної альтернативи генераторам з магнітоелектричним збудженням.

Ключові слова: ротор, статор, обмотка, магнітна система, методика проектування.

V.D. KOSENKOV

Khmelnytsky National University

D.A. IVLEV, V.V. BULHAR, S.M. OGINSKA, T.M. MOSPAN

Odesa National Polytechnic University

THE ADJUSTMENT OF THE DC GENERATOR DESIGN TECHNIQUE WITH A WINDINGLESS ROTOR ACCORDING TO THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES

Today, the market of the most popular wind power plants of low power 1–5 kW is divided into two unequal segments: a large segment of cheap but non-energy-efficient high-speed wind turbines, designed for a nominal wind speed of 10–12 m / s; a small segment of energy-efficient, but expensive low-speed wind turbines, designed for a nominal wind speed of 8–9 m / s. The cost of low-speed wind turbines is on average 3–4 times higher than the price of high-speed wind turbines of the same power, which is mainly due to the cost of permanent magnets. An experimental sample of a low-speed, energy-efficient DC generator with a wind-free rotor and electromagnetic excitation costs 2.2 times less than a serial analogue. The total cost of installation becomes comparable to the cost of high-speed installations. The design technique of this generator was based on a theoretical analysis of magnetic and thermal models. The results of the physical tests of the experimental sample made it possible to add several additions and refinements to its design methodology. Thermal tests have confirmed the correctness of the choice of values of electromagnetic loads. The experiment showed that this design could withstand 5-fold current overload without commutating poles and a compensation winding. The results of the research showed the features of this generator that were not taken into account in the models: double frequency of magnetization reversal in the central stator; the presence of a parasitic magnetic flux of scattering between the poles in the inner stator. The results of the experiment allowed to clarify the design methodology and to develop additional recommendations for the design of this generator: choose the number of poles, taking into account the magnitude of the frequency of magnetization reversal in the central stator; accept the value of the pole overlap equal to $\alpha_\delta = 0,55\text{--}0,6$. The results of the experiments show that even taking into account the identified design features, this generator can be considered as an effective alternative to generators with magnetoelectric excitation.

Keywords: rotor, stator, armature winding, magnetic system, design technique.

Постановка проблеми

Сьогодні ринок найбільш популярних вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності 1–5 кВт [1] поділяється на два нерівнозначні сегменти: великий сегмент дешевих, але енергонеефективних високообертових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 10–12 м/с; малий сегмент енергоефективних, але дорогих низькообертових ВЕУ, розрахованих на номінальну швидкість вітру 8–9 м/с.

Слід зазначити, що поняття енергоефективності стосовно до ВЕУ має на увазі не величину ККД, а кількість енергії виробленої протягом місяця. Високообертовий синхронний генератор з магнітоелектричним збудженням, встановлюваний на всі малі ВЕУ, як правило, має ККД 91–95%, а низькообертовий 85–90%, однак низькообертова ВЕУ протягом місяця виробить більше енергії, ніж високообертова.

Величина виробітку електроенергії прямо залежить від швидкості вітру. В Україні тільки 5% території має середньорічну швидкість вітру 10 м/с, на всій іншій території ця цифра не перевищує 5 м/с, тому низькообертова ВЕУ більш підходить для нашої країни.

Повсюдне поширення таких ВЕУ стримується їхньою високою ціною, що багато в чому обумовлене вартістю постійних магнітів. За оцінкою експертів [2] вартість постійних магнітів у загальній ціні

синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням становить від 30% до 50%.

Синхронні генератори з електромагнітним збудженням постійні магніти не використовують, але мають свої недоліки, а саме наявність на роторі ковзаючого контакту для підведення напруги до обмоток збудження, високий момент інерції через масу обертових обмоток, технологічні проблеми створення багатополусної конструкції ротора з явно вираженими полюсами при малому діаметрі статора і т.і.

Використання генератора постійного струму з безобмотковим ротором (ГПСБР) і електромагнітним збудженням у складі *низькообертової* ВЕУ вирішує ці проблеми. Експериментальний зразок ГПСБР коштує в 2,2 рази дешевше серійного синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням аналогічної потужності й швидкості обертання. Загальна вартість такої *низькообертової енергоефективної* ВЕУ стає порівнянною з вартістю *високообертових* установок.

Методика проектування даного генератора базувалася на теоретичному аналізі магнітних і теплових моделей. Результати фізичних випробувань експериментального зразка дозволили внести в його методику проектування ряд доповнень і уточнень.

Основні результати

Конструкція ГПСБР. Магнітна система генератора (рис. 1, а) не має спільного ярма і складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців Ш-подібної форми 1, між якими укладено секції обмотки якоря 2, обмоток збудження 3, безобмоткових полюсів 4 і немагнітних дисків 5. Секції обмотки якоря укладаються із частковим зсувом на величину полюсного розподілу τ (рис. 1, б). Цим забезпечується односпрямованість результуючого магнітного потоку, що пронизує секцію й, відповідно, збереження електромагнітного моменту заданого знака.

ГПСБР належить до типу індукторних машин з двома обмотками на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора, у яких, як відомо, магнітна індукція в робочому повітряному проміжку змінюється тільки за величиною, залишаючись незмінною у напрямку. У індукторній машині класичної конструкції величина коефіцієнта використання $K_{вик}=0,26\div0,46$, тому маса активної частини й габарити індукторного генератора більші, ніж у звичайного синхронного генератора з тією ж наведеною ЕРС і потужністю. ГПСБР має $K_{вик}=0,66$ (рис. 1 б), що дозволяє зменшити його вагу і розміри в порівнянні із класичною індукторною машиною.

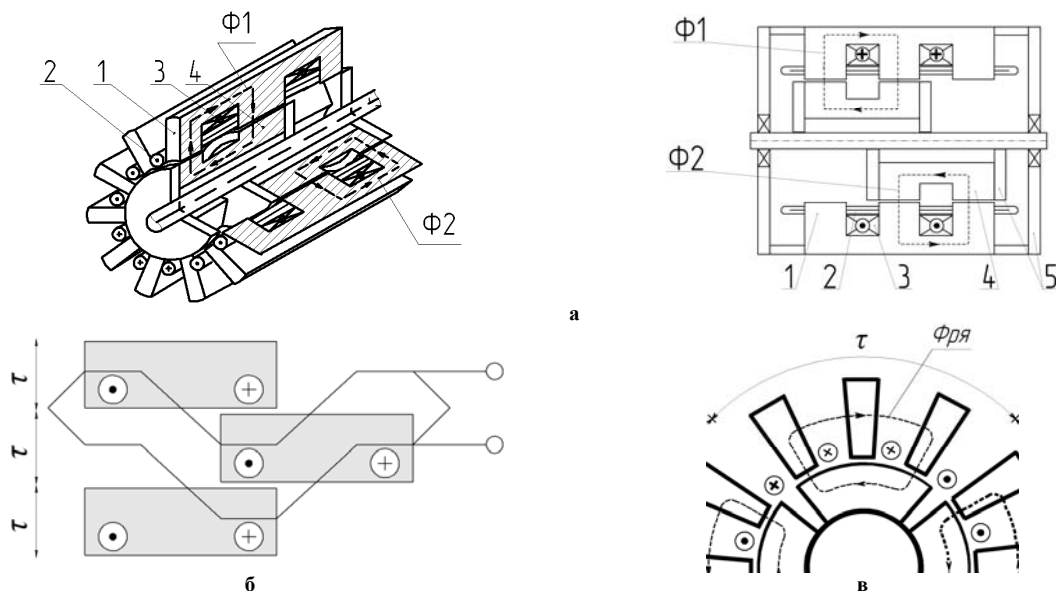


Рис. 1. ГПСБР: а – магнітна система; б – секція обмотки якоря; в – ослаблення поперечної реакції якоря

Наявність відкритих з обох сторін пазів між зубцями статора створює ряд повітряних проміжків, що призводить до зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку, що, у свою чергу, приводить до послаблення поперечної реакції якоря (рис. 1 в).

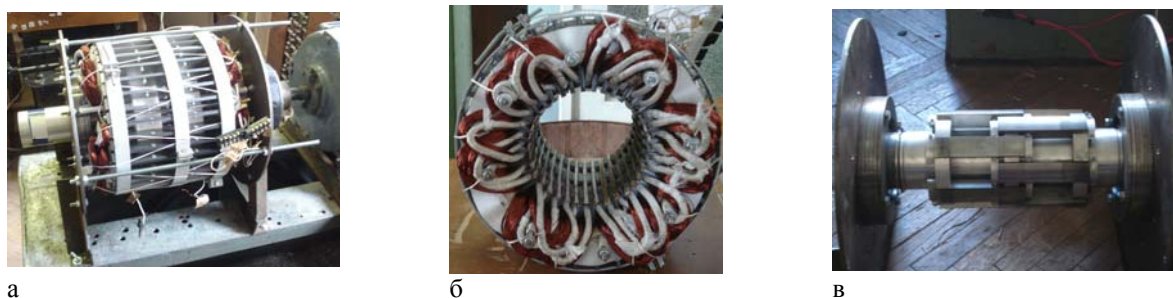


Рис. 2. ГПСБР: а – зовнішній вигляд; б – статор; в – ротор

Результати дослідження експериментального зразка ГПСБР. Для підтвердження працездатності нової конструкції та теоретичних висновків про її високу переважувальну здатність було виготовлено експериментальний зразок (рис. 2) $P_n = 0,5$ кВт; $U_n = 230$ В; $I_n = 2,2$ А; $n_n = 600$ об/хв для

роботи в складі ВЕУ. Швидкість вітру для отримання номінальної потужності 8 м/с. Випробування проводилися за стандартною методикою, прийнятою для машин постійного струму [3].

Випробування експериментально довели працездатність нової конструкції. Зовнішній вигляд характеристик повністю відповідає характеристикам класичної машини постійного струму (рис. 3).

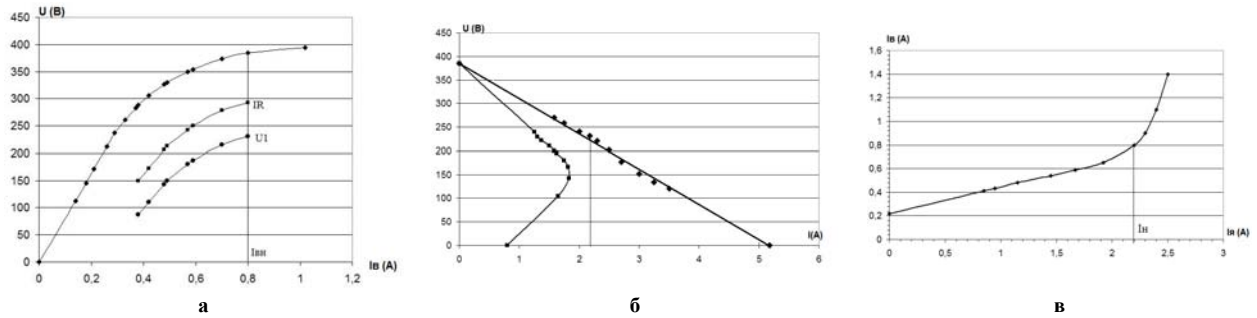


Рис. 3. ГПСБР: а – навантажувальна характеристика; б – зовнішні характеристики; в – регульовальна характеристика

Генератор має дві паралельні гілки по три укрупнені секції в кожній гілці (H1-K18) і (H1* -K18*), які через діодні мости за схемою на рис. 4 підключені до навантаження.

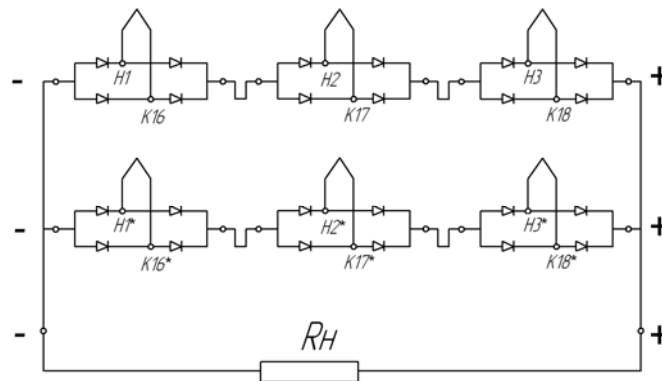


Рис. 4. Схема випрямлення

Результати випробувань показали, що в генераторі через відсутність комутатора відбувається 30% недобір потужності. Характеристика навантаження зміщена вниз на 90 В, що пов'язано не з реакцією якоря, а з недобором потужності (рис. 3, а). Даний недолік може бути усунено при підключенні секцій до напівпровідникового комутатора.

Як відомо [4], на вигляд зовнішньої характеристики (рис. 3, б) генератора впливають два фактори: поле реакції якоря і падіння напруги в ланцюзі якоря. За відсутності першого фактора дана залежність набуває лінійний вигляд і залежить тільки від струму навантаження. Те ж саме можна сказати і про вигляд регульовальної характеристики (рис. 3 в).

Теплові випробування (рис. 5) проводились при природному охолодженні, температурі навколишнього середовища 11 °С і струмі якоря $I_a = 3,3$ А, тобто $1,5 I_{ном}$. Однак генератор пропрацював в цьому режимі 100 хв (замість 1 хв за ДСТУ) і вийшов на усталені значення температури, що не перевищують 100 °С при класі ізоляції обмоток Н.

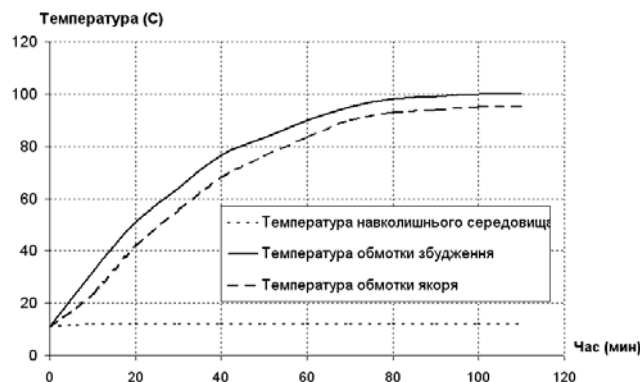
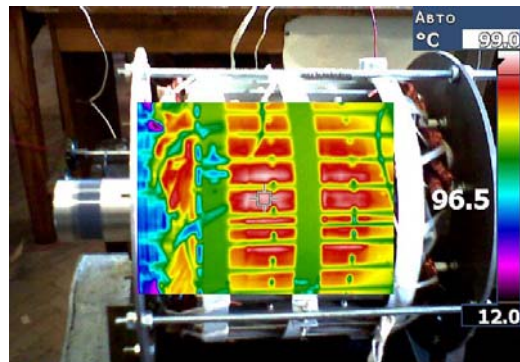


Рис. 5. Теплові випробування



Результати теплових випробувань підтвердили правильність вибору значень електромагнітних навантажень. Експериментальне підтвердження отримав теоретичний висновок про високу перевантажувальну здатність ГПСБР. Перехід до магнітної системи, що складається з ряду магнітно-

незв'язаних контурів, дозволяє істотно послабити поле поперечної реакції якоря, відмовитися від компенсаційної обмотки та обмотки додаткових полюсів і зменшити робочий повітряний проміжок до мінімально технологічно можливої величини.

На (рис. 6а) показано результуюче магнітне поле для $I_H = 2,2$ А. Як видно з рис. 6б, відмова від загального ярма дозволяє ГПСБР витримувати 5-кратне перевантаження по струму.

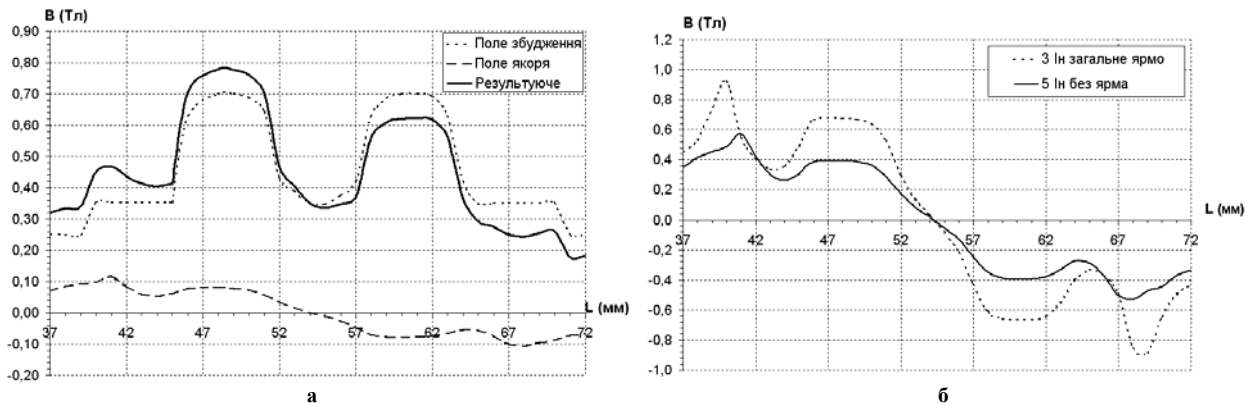


Рис. 6. Розподіл магнітної індукції в робочому повітряному проміжку ГПСБР: а – результуюче магнітне поле для $I=I_H$; б – порівняння розподілу для $5I_H$ в конструкції без загального ярма та $3I_H$ в конструкції із загальним ярмом

Виявлені недоліки. Електромеханічне перетворення енергії в ГПСБР пов'язане зі зміною взаємної індуктивності між обмоткою якоря та обмоткою збудження, яке відбувається при переміщенні полюсів ротора відносно зубців магнітопроводу статора (рис. 7) при цьому під центральним зубцем частота перемагнічування подвоюється $f = V/\tau$ (рис. 7 б) що необхідно враховувати при проектуванні ГПТБР.

Також експеримент показав наявність паразитного магнітного потоку розсіювання Φ_s між полюсами у центральному статорі (рис. 8), у результаті чого послаблюється основний магнітний потік Φ_0 .

Отримані результати дозволили виробити додаткові рекомендації із проектування даного генератора:

- вибирати число полюсів, виходячи з максимально можливої величини частоти перемагнічування в центральному статорі 50 Гц;
- прийняти величину полюсного перекриття рівної $\alpha_\delta = 0,5 \div 0,6$.

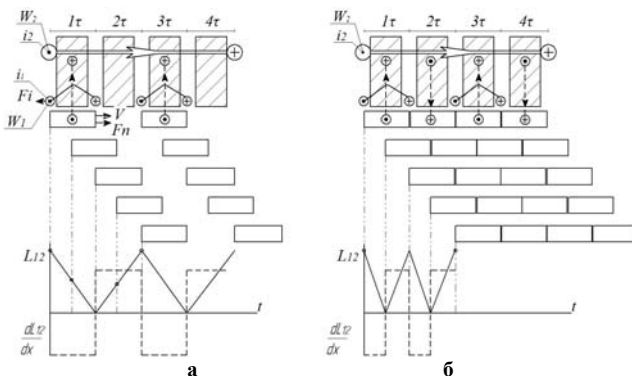


Рис. 7. Зміна потокозчеплення в часі: а – під крайніми зубцями статора; б – під центральним зубцем статора

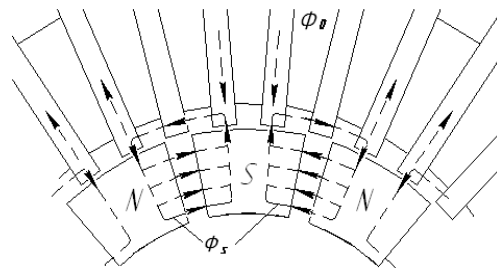


Рис. 8. Потік розсіювання між полюсами

Методика проектування. Отримані результати експериментів дозволили уточнити методику проектування ГПСБР і внести в неї ряд доповнень, що усувають виявлені недоліки. Зокрема, були заново проведені розрахунки по оптимізації ГПСБР, у які були внесені обмеження по величині частоти перемагнічування й величині полюсного перекриття.

Частина етапів розрахунків класичного генератора постійного струму може бути застосована й при розрахунках ГПСБР. Загальний порядок розрахунків *низькообертових* 250–300 об/хв ГПСБР малої потужності 1–5 кВт представлений нижче. Початковими даними для проектування є:

- номінальна потужність генератора P_H (Вт);
- номінальна вихідна напруга U_H (В);
- номінальна швидкість обертання n_H (об/хв).

Вибір головних розмірів.

1. прийняти ККД $\eta = 70\%$;

2. за відомою формулою $I_H = \frac{P_H}{U_H}$ визначити струм генератора [5];

3. за формулою $P_\Sigma = \frac{1+\eta}{2 \cdot \eta} \cdot P_H$ визначити електромагнітну потужність [5];

4. за співвідношенням $\frac{P_e}{n_n}$ знаходимо D_n (рис. 9)
5. прийняти значення лінійного струмового навантаження A : для природного охолодження $A=200 \div 250$ А/см; для самовентиляції $A=300 \div 400$ А/см;
6. прийняти індукцію в робочому повітряному проміжку $B_\delta = 0,8$ Тл;
7. прийняти значення індукції в зубцях $B_z = 1,5 \div 1,7$ Тл;
8. прийняти коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha_\delta = 0,5 \div 0,6$;
9. прийняти співвідношення $\lambda = 0,5$;
10. за залежністю $2p=f(D_n)$ знаходимо $2p$ (рис. 10);
11. прийняти значення щільності струму j :
- для природного охолодження $j=4 \div 5$ А/мм²;
- для самовентиляції $j=5 \div 6$ А/мм².
12. робочий повітряний проміжок δ приймають мінімально технологічно можливої величини.

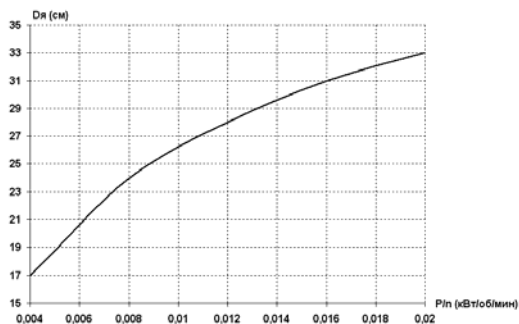


Рис. 9. Залежність $D_n = f\left(\frac{P_n}{n}\right)$

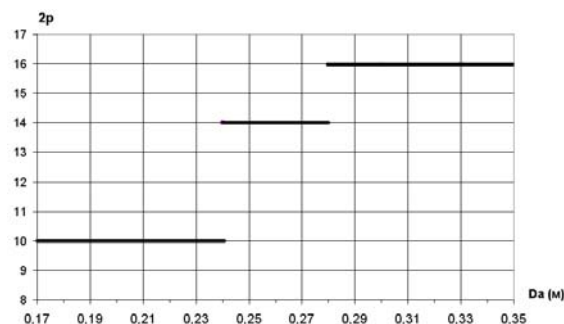


Рис. 10. Залежність $2p=f(D_n)$

Подальший електромагнітний розрахунок проводиться за традиційною методикою проектування машин постійного струму. Ряд стандартних етапів розрахунків класичної МПТ при проектуванні даної машини не потрібні. Так, у ГПСБР не потрібні розрахунки колектора, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки, що суттєво зменшує обсяг обчислювальної роботи при виконанні електромагнітного розрахунку.

Висновки. Результати експериментів показують, що даний генератор можна розглядати в якості альтернативи генераторам ВЕУ з магнітоелектричним збудженням.

Література

1. Pitteloud J. 2017 Small Wind World Report Summary [Електронний ресурс] / J. Pitteloud, S. Gsänger // WWEA. – 2017. – Режим доступу : <https://wwindea.org/blog/2017/06/02/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics>
2. Burruss T. Non-Rare Earth Motor Development [Електронний ресурс] / Tim Burruss // Oak Ridge National Laboratory. – 2015. – Режим доступу : https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062_burruss_2015_o.pdf.
3. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
5. Морозов А. Г. Расчет электрических машин постоянного тока / А. Г. Морозов. – М. : Высш. школа, 1972. – 227 с.

References

1. Pitteloud J. 2017 Small Wind World Report Summary / J. Pitteloud, S. Gsänger // WWEA. – 2017. URL: <https://wwindea.org/blog/2017/06/02/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics>
2. Burruss T. Non-Rare Earth Motor Development / Tim Burruss // Oak Ridge National Laboratory. – 2015. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062_burruss_2015_o.pdf.
3. Zherve G. K. Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin / G. K. Zherve. – L. : Energoatomizdat, 1984. – 408 s.
4. Voldek A. I. Elektricheskie mashiny / A. I. Voldek. – L. : Energiya, 1974. – 840 s.
5. Morozov A. G. Raschet elektricheskikh mashin postoyannogo toka / A. G. Morozov. – M. : Vyssh. shkola, 1972. – 227 s.

Рецензія/Peer review : 21.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Горошко А.В.