

УДК 621.313.84

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА КОРЕКЦІЇ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ

КОВАЛЕНКО
М.А.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: kovalenko_ma@i.ua;

КОВАЛЕНКО І.Я.

аспірант кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: 2048141@ukr.net;

ГОЛОВКО В.М.

доктор технічних наук, професор, професор кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: golovkovm@ukr.net;

ЧУМАК В.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: chumack_kpi@ukr.net;

СВЯТНЕНКО В.А.

старший викладач, кафедра теоретичної електротехніки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, e-mail: vadiksv@gmail.com.

Мета роботи. Провести оцінку ефективності регулювання вихідної активної потужності магнітоелектричного генератора у складі автономної вітроелектроустановки.

Методи дослідження. Аналіз існуючих методів корегування вихідних параметрів генераторів. Методи експериментального дослідження електрогенераторів. Чисельні методи обробки отриманих результатів.

Отримані результати. Розроблено експериментальний стенд для дослідження параметрів та характеристик автономного магнітоелектричного генератора у складі вітроелектроустановки з метою оцінки ефективності корекції вихідної потужності генератора. Проведено експериментальні дослідження магнітоелектричного генератора в режимі холостого ходу для двох випадків: характеристика холостого ходу при підмагнічуванні із застосуванням сторонньої ємності; характеристика холостого ходу при підмагнічуванні додатковою обмоткою (при подачі постійного струму). В даному досліді вихідна напруга збільшується від 26% (при швидкості обертання 200 об/хв) до 47% (при швидкості обертання 780 об/хв). Дослідження показали що використання методу корекції вихідної потужності шляхом присєднання додаткової ємності до обмотки якоря генератора є менш ефективним методом регулювання потужності ніж використання підмагнічування додатковою обмоткою. Проведено серію експериментальних досліджень генератора у складі автономної вітроустановки за різного значення активного навантаження та за різних методів корекції вихідної потужності. При цьому проведено наступні дослідження: дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при постійному активному навантаженні та за різної швидкості обертання (різної швидкості вітру); дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при підтримці постійної напруги на затискачах генератора 14,4 В. Глибина регулювання вихідної потужності залежить від швидкості обертання ротора вітроустановки і за результатами експериментальних досліджень, для навантаження $I=0,8$ А становить: 1,4% при 350 об/хв; 12,5% при 550 об/хв; 15,3% при 650 об/хв; 22,12% при 750 об/хв. Більш ефективним методом є використання додаткової підмагнічувальної обмотки. Проведено порівняльний аналіз вихідних параметрів магнітоелектричного електрогенератора отриманих шляхом експериментальних досліджень та імітаційного чисельного моделювання. Порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень показують схожість отриманих результатів в межах 7-10%, що підтверджує адекватність розроблених моделей та достовірність отриманих результатів.

Наукова новизна. Шляхом експериментальних досліджень магнітоелектричного генератора встановлено межі корекції вихідної потужності генератора у складі автономної вітроелектроустановки.

Практична цінність. Розроблено експериментальний стенд для дослідження магнітоелектричного генератора з осевим магнітним потоком для імітації його роботи у складі автономної вітроелектроустановки.

Ключові слова: експериментальне дослідження; магнітоелектричний генератор; автономна вітроелектроустановка; корекція вихідної потужності; межі регулювання.

I. ВСТУП

Перетворення механічної енергії вітру в електричну є актуальним науково-практичним завданням. Одним фіз. Прикладом таких систем є вітроелектроустановки, що перетворюють механічну енергію вітру в електричну. До складу такої системи входить ротор вітроустановки, що представляє собою вітрове колесо певного конструктивного виконання, редуктор та електрогенератор. Відомо, що механічна характеристика ротора вітроелектроустановки має нелінійний характер із явно вираженими максимумами активної потужності за різного значення швидкості вітру.

Традиційні вітроелектроустановки із мультиплікатором та без нього працюють на довільній точці механічної характеристики ротора вітроустановки при зміні навантаження та при зміні швидкості вітру. Для вітроелектроустановок із мультиплікатором використовуються класичні електрогенератори із постійними магнітами та радіальним основним магнітним потоком. Для безмультиплікаторних систем рекомендується використовувати електрогенератори із осьовим магнітним потоком. Вони мають ряд переваг в таких системах, що детально описано в літературних джерелах [1], [16].

Авторами в попередніх роботах [2], [3] проведено низку імітаційних чисельних моделювань вітроелектроустановки у складі із генератором із постійними магнітами. Попередні результати показують досить високу ефективність використання підмагнічування додатковою ємністю обмотки якоря генератора та використання підмагнічування додатковою обмоткою магнітоелектричного генератора. Використання додаткової ємності дозволяє підвищити величину вихідної активної потужності генератора на $\approx 7-16\%$. При підмагнічуванні додатковою обмоткою ефект підвищення активної потужності генератора складає $\approx 32-35\%$.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботі [4] автори представляють дослідження синхронного генератора із постійними магнітами із осьовим магнітним потоком. Конструкція генератора побудована із використанням модифікованої версії багатоцільового еволюційного алгоритму без домінуючого сортування генетичного алгоритму [10]. Оскільки процедура проектування корелює з розмірними та електромагнітними параметрами, можуть виникати невизначеності, що знижують ефективність генератора через неточності в конструкції та в розрахунках поля. Крім того, результати експериментальних досліджень показані нечітко, без опису необхідного обладнання та програми випробувань, що ставить під сумнів адекватність результатів.

У роботі [5] представлено дослідження нової синхронної машини зі збудженням від постійних магнітів та підмагнічування додатковою обмоткою за допомогою тривимірного скінченно-елементного аналі-

зу та експериментальних досліджень. Показано, що генератор справді здатен регулювати електромагнітне поле. У роботі показано принцип роботи та особливості конструкції цього генератора оригінальної конструкції. Також проводиться порівняння результатів тривимірного моделювання з експериментальним дослідженням, проведеним на прототипі, що має іншу конструкцію ротора [11]. Відповідно, результати таких досліджень важко використати та будувати на їх основі подібну концепцію.

В роботі [6] авторами представлено порівняння експериментальних та розрахункових даних малогабаритних генераторів із постійними магнітами. Недоліком запропонованої системи є підвищена вартість і складність системи, піддається сумніву і надійність таких систем. Завдання регулювання зовнішніх параметрів автори в роботі [7] вирішують за допомогою складної математичної моделі, обчислювальної машини з подальшим контролем поля якоря досліджуваного зразка. Порівняння розроблених моделей (які є програмним забезпеченням системи) з результатами експериментів показують досить високу збіжність.

У роботі [8], [9] розглядається синхронна машина з паралельним гібридним збудженням. Автори досліджують структурну топологію та принципи роботи гібридної машини збудження. Можливість управління потоком в умовах розімкнутого ланцюга та результати розроблених моделей підтверджені порівнянням з експериментальними вимірами [12], [14]. У роботі наведено порівняння різних підходів до розрахунку магнітної системи гібридних машин із експериментальними даними. Однак, у роботі відсутні висновки щодо ефективності роботи досліджуваного генератора та похибки представлених методів розрахунку магнітної системи.

Узагальнюючи результати літературного пошуку можливо зробити висновок, що основна мета наукових досліджень в даному напрямку полягає в стабілізації вихідної напруги досліджуваних магнітоелектричних генераторів, однак зовсім не приділяється увага можливості регулювання вихідної потужності [15].

Тому актуальним науково-практичним завданням є оцінка ефективності корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора експериментальним методом із подальшим порівнянням отриманих результатів із результатами моделювання. Оскільки саме величина корисної активної потужності, яку можливо акумулювати в результаті процесу перетворення механічної енергії вітру в електричну, є бажаною величиною для вітрогенеруючих систем.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є експериментальна перевірка результатів, що отримані при математичному та імітаційному моделюванні роботи генератора вітроустановки торцевого типу із збудженням від постійних магнітів та додатковою підмагнічувальною обмоткою для

оцінки ефективності корекції вихідної активної потужності автономної вітроелектроустановки. При цьому досліджувалися основні вихідні параметри та характеристики генератора: вихідна напруга; робочий струм якоря; вихідна активна потужність якоря генератора. Критерієм оцінки якості результатів є порівняння результатів експериментальних досліджень із результатами імітаційного математичного моделювання.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Експериментальні дослідження проведені із використанням виготовленого прототипу магнітоелектричного генератора із аксiальним магнітним потоком [1], [3], [9]. Порівняння результатів імітаційного моделювання та експериментальних досліджень проводиться із використанням параметрів електрогенератора, що наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Основні параметри та характеристики досліджуваного генератора

№	Параметр	Величина	Одиниці виміру
1	Повна номінальна потужність	50,0	В·А
2	Номінальна фазна напруга генератора	24,0	В
3	Число фаз	3	—
4	Синхронна частота обертання	750,0	об/хв
5	Кількість пар полюсів	4	—
6	Постійні магніти	NdFeB N38H: Br=1,21 Тл, Hc=939 кА	—
7	Розрахунковий коефіцієнт потужності	0,9	—
8	Величина осевого повітряного проміжку	0,5	мм
9	Розрахунковий ККД	82	%
10	Середнє значення магнітної індукції в повітряному проміжку	0,21	Тл
11	Активний фазний опір обмотки якоря генератора	8,8	Ом
12	Індуктивність фази обмотки якоря генератора	0,022	Гн

Для проведення достовірних експериментальних досліджень автономного електрогенератора необхідно провести розробку структурної схеми експериментального стенду. Головним критерієм при розробці такого стенду є простота його конструкції, доступність

та невисока вартість основних його складових, універсальність, широкий діапазон зміни швидкості обертання привідного двигуна, точність вимірювальних приладів. Структурна схема розробленого експериментального стенду показано на рис. 1.

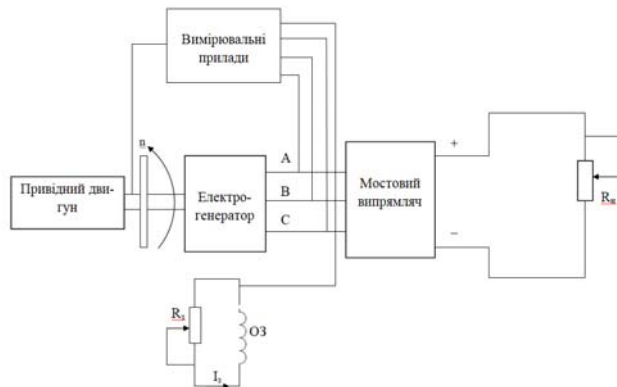


Рисунок 1. Структурна схема експериментального стенду

До складу стенду входить: привідний двигун постійного струму із незалежним збудженням (типу 2ПБ 90Л); цифровий вимірювач швидкості обертання вала ротора генератора (CF5135C-Z); трифазний торцевий магнітоелектричний генератор; комплект вимірювальних приладів, що здійснюють контроль електричних параметрів генератора, привідного двигуна, навантаження та додаткової обмотки, що підмагнічує (TENSE, DJ-A96T; DC 0-100В 10А 1000Вт Deekrobot); трифазного мостового випрямляча; навантаження; комплекту ємностей, що впливають на процес підмагнічування; систему керування струмом збудження привідного двигуна та додатковою підмагнічувальною обмоткою.

Загальний вигляд розробленого експериментального стенду із всіма його конструктивними елементами наведено на рис. 2.



1 – торцевий генератор; 2 – привідний двигун; 3 – реостат регулювання збудження; 4 – комплект із випрямлячами та фільтрами; 5 – комплект приладів вимірювання в колі привідного двигуна; 6 – комплект приладів вимірювання торцевого генератора; 7 – навантаження торцевого генератора; 8 – вимірювач швидкості обертання торцевого генератора.

Рисунок 2. Загальний вигляд експериментального стенду

В якості випрямлячів використовуються мости Ларіонова для симетричного приєднання трифазного навантаження. Коригування та зміна швидкості обертання ротора генератора здійснювалось за допомогою двозонного регулювання напругою на якірній обмотці привідного двигуна постійного струму та струму його збудження. Як вимірювач швидкості обертання ротора використовується система, що працює на основі датчика Холла. Оскільки номінальна швидкість обертання генератора значно нижча від номінальної швидкості обертання привідного двигуна, передача механічного зусилля від привідного двигуна до генератора здійснюється за рахунок пасової передачі та системи шківів із передавальним числом 1:5.

Аналіз ефективності корекції вихідної потужності досліджуваного електрогенератора у складі вітроустановки починається із аналізу характеристики холостого ходу. Не дивлячись на те, що в роботі використовується генератор, в якому основний магнітний потік утворюється постійними магнітами, досліджувалось три режими роботи магнітоелектричного генератора в режимі холостого ходу:

- характеристика холостого ходу без регулювання;
- характеристика холостого ходу при підмагнічуванні із застосуванням сторонньої ємності;
- характеристика холостого ходу при підмагнічуванні додатковою обмоткою (при подачі постійного струму).

На рис. 3 наведено експериментальну характеристику холостого ходу генератора за різних значень швидкості обертання валу генератора, що імітує різну швидкість вітру.

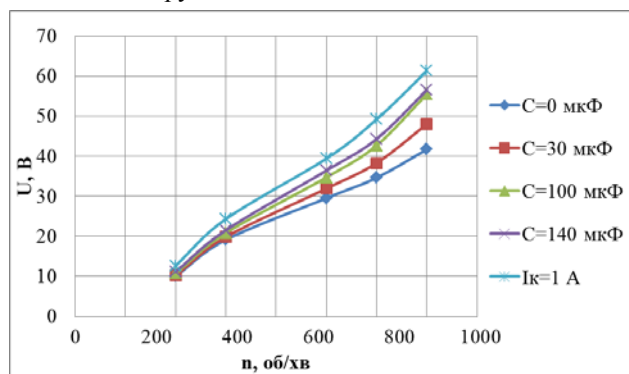


Рисунок 3. Характеристики холостого ходу генератора за різних значень швидкості обертання валу генератора

Очевидно, що характеристика генератора без регулювання має найнижчі значення величини вихідної напруги. При збільшенні швидкості обертання ротора генератора напруга на виході генератора збільшується лінійно (від 10 В до 42 В без регулювання) за рахунок збільшення ЕРС обертання, що наводиться в обмотці якоря генератора. При збільшенні величини підмагні-

чувальної ємності напруга починає зростати за рахунок збільшення основного магнітного потоку. Однак, при подальшому збільшенні величини підмагнічувальної ємності (при $C > 100$ мкФ) напруга збільшується незначно, що пояснюється насиченням магнітної системи, збільшенням реактивного струму в обмотці якоря та падіння напруги на активному та індуктивному опорах.

При подачі постійної напруги на додаткову обмотку підмагнічування спостерігається збільшення величини вихідної напруги генератора, що пояснюється підсиленням основного магнітного потоку генератора. Даний дослід проводиться при вимкненій додаткової ємності.

Відносна зміна величини напруги в режимі холостого ходу наведена на рис. 4.

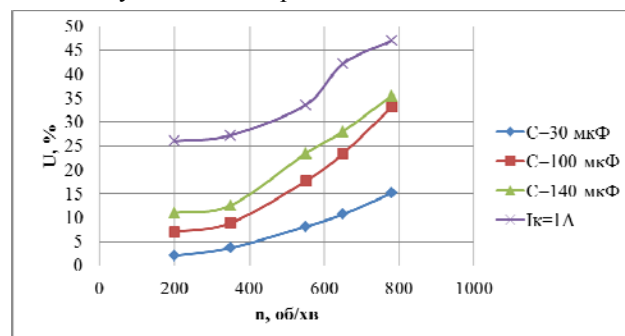


Рисунок 4. Відносна величина зміни напруги за холостого ходу

В залежності від способу підмагнічування (додатковою обмоткою чи приєднанням ємності) та швидкості обертання ротора генератора приріст вихідної напруги спостерігається від найменших 2% (при швидкості 200 об/хв та додаткової ємності $C=30$ мкФ) до 47 % (при швидкості 780 об/хв та подачі струму на додаткову обмотку $I_k=1$ А). Кожен із розглянутих способів підвищує свою ефективність при збільшенні швидкості обертання ротора, що пояснюється збільшенням ЕРС, що наводиться в обмотці якоря генератора.

Найбільш ефективним, з точки зору максимального значення напруги в режимі холостого ходу, є підмагнічування генератора за допомогою додаткової обмотки. При цьому вихідна напруга збільшується від 26% (при швидкості обертання 200 об/хв) до 47 % (при швидкості обертання 780 об/хв). Це пояснюється тим, що струм додаткової обмотки підмагнічування підсилює основний магнітний потік і не викликає в обмотці якоря на холостому ході додаткових електричних втрат (на активних та реактивних опорах).

Підмагнічування генератора сторонньою ємністю призводить до появи певного рівня активної потужності, що реєструється цифровим вимірювальним приладом. Це підтверджується відповідними результатами експериментальних досліджень, що показано на рис. 5.

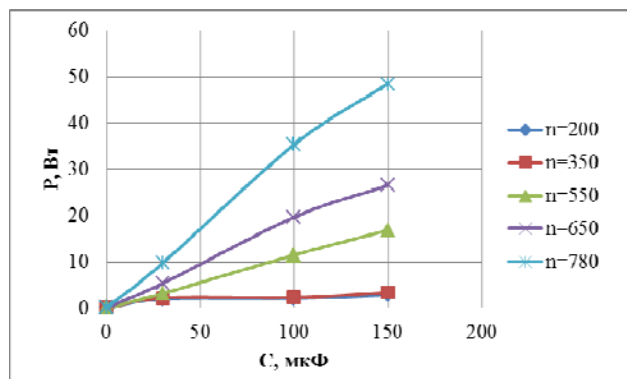


Рисунок 5. Потужність на затискачах генератора при підмагнічуванні сторонньою ємністю при холостому ході

За рис. 5 можливо зробити висновок: підмагнічування магнітоелектричного генератора сторонньою ємністю дійсно збільшує величину вихідної потужності генератора у складі вітроустановки та дозволяє керувати величиною вихідної потужності; підмагнічування генератора сторонньою ємністю у складі вітроустановки створює активне навантаження на валу вітроустановки навіть в режимі холостого ходу. Це можна віднести і до суттєвого недоліку такого методу корекції вихідної потужності.

Для оцінки ефективності корегування вихідної потужності досліджуваного генератора проведено серію експериментальних досліджень генератора при активному навантаженні: 0,2 А; 0,5 А та 1 А на кожну фазу.

На рис. 6 наведено експериментальну залежність вихідної потужності генератора при підмагнічуванні додатковою ємністю за різної швидкості обертання генератора: 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв та 750 об/хв. Дослід виконувався при постійному навантаженні генератора $I=0,8$ А.

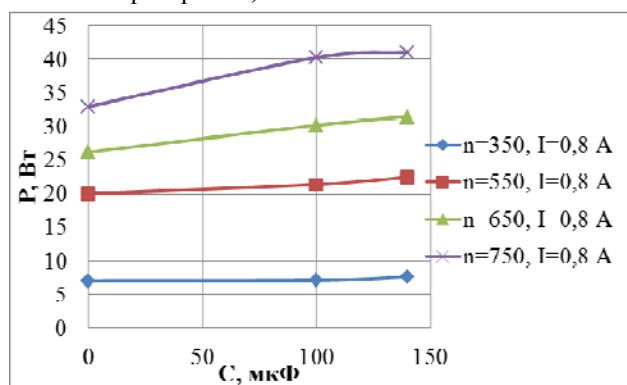


Рисунок 6. Залежність вихідної потужності від величини приєднаної ємності

З рис. 6 можливо зробити висновок, що при збільшенні швидкості обертання ≥ 350 об/хв., аналогічно із попередніми навантаженнями, глибина регулювання залежить від швидкості обертання ротора вітроу-

становки і за результатами експериментальних досліджень, для навантаження $I=0,8$ А становить: 1,4% при 350 об/хв; 12,5% при 550 об/хв; 15,3% при 650 об/хв; 22,12% при 750 об/хв. Отримані значення глибини регулювання менші значень, ніж при навантаженні $I=0,5$ А, що пояснюється збільшенням активних втрат в обмотці якоря генератора.

В табл. 2 наведено порівняння експериментальних значень глибини регулювання потужності генератора за різної величини активного навантаження генератора $I=0,2$ А; 0,5 А; 0,8 А.

Таблиця 2. Основні параметри та характеристики досліджуваного генератора

Навантаження, А	Глибина регулювання потужності, %			
	350 об/хв	550 об/хв	650 об/хв	750 об/хв
0,2	9,1	35,1	41,4	47
0,5	4,2	18,6	28,2	33,9
0,8	1,4	12,5	15,3	22,1

Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок, що використання додаткової приєднаної ємності як регулятора вихідної потужності генератора дозволяє підвищити маневрувальні можливості вітроустановки. Однак, використання додаткових приєднаних конденсаторів збільшує навантаження на ротор вітроустановки, збільшує втрати в генераторі, зменшує його загальний ККД та дозволяє ступінчасте регулювання вихідних параметрів.

Програма експериментальних досліджень передбачає перевірку ефективності використання додаткової обмотки підмагнічування і включає в себе наступне:

- дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при постійному активному навантаженні та за різної швидкості обертання (різної швидкості вітру);
- дослідження ефективності використання обмотки підмагнічування при підтримці постійної напруги на затискачах генератора 14,4 В.

На рис. 7 показано результати експериментальних досліджень магнітоелектричного генератора при використанні обмотки підмагнічування при постійному активному навантаженні та різній швидкості обертання.

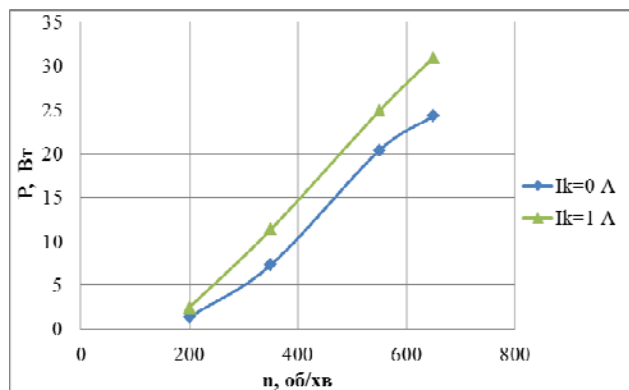


Рисунок 7. Залежність вихідної потужності від швидкості обертання при застосуванні обмотки підмагнічування

При проведенні дослідів, результати якого наведені на рис. 7, підтримувалась постійна величина струму в додатковій обмотці підмагнічування 1 А. При цьому вихідна напруга генератора змінювалась в широких межах. Струм в обмотці підмагнічування створює додаткову МРС, що направлена узгоджено із основним магнітним потоком, підсилює його і збільшує величину електромагнітного моменту та потужності. Це призводить до підвищення індукованої в обмотці якоря ЕРС та потужності на затискачах генератора. За рахунок цього вдається підвищити віддачу активної потужності в навантаження на: 44%, 35,5%, 18,07%, 21,6% при швидкості обертання 200 об/хв, 350 об/хв, 550 об/хв та 650 об/хв відповідно.

При збільшенні швидкості обертання збільшується величина потужності, струму в обмотці якоря, а отже і втрат в обмотці. Також збільшується вплив розмагнічуючої реакції якоря. Це призводить до зменшення глибини регулювання при збільшенні швидкості обертання ротора.

За підтримки постійної величини напруги на затискачах генератора (14,4 В), наприклад при живленні споживачів, для яких критичне стабільне значення вихідної напруги, залежність вихідної потужності від струму керування має вигляд, як наведено на рис. 8.

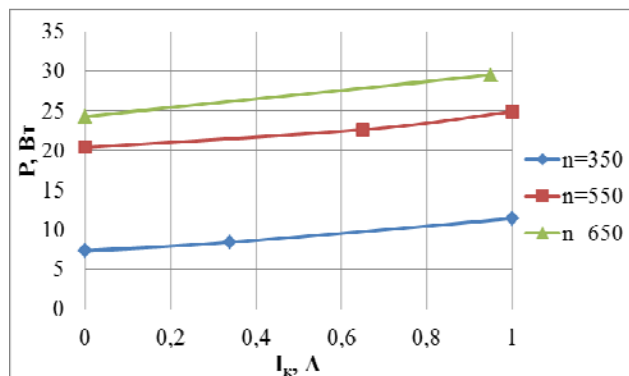


Рисунок 8. Залежність вихідної потужності від струму обмотки підмагнічування

Експериментальні дослідження, результати яких наведені на рис. 9, проводились для трьох значень швидкості обертання ротора, при цьому величина струму в обмотці змінювалась таким чином, щоб підтримувати $U_1=\text{const}$.

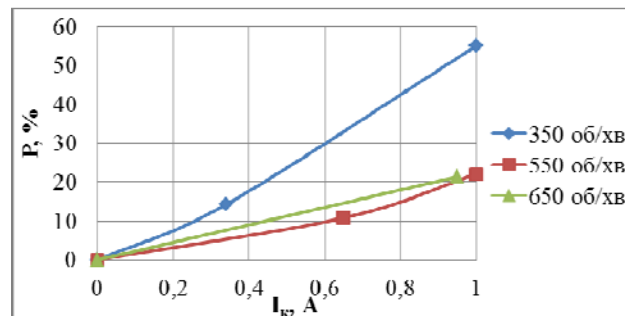


Рисунок 9. Глибина регулювання потужності при $U_1=\text{const}$

З рис. 9 видно, що максимальна глибина регулювання вихідної потужності при $U_1=\text{const}$ досягається за швидкості обертання $n=350$ об/хв і складає 55,1 % та при струмі керування $I_k=1$ А. При збільшенні швидкості обертання ротора генератора збільшуються втрати активної потужності на перемагнічування, механічні втрати та втрати в обмотці якоря. Тому при швидкостях обертання 550 об/хв та 650 об/хв глибина регулювання складає 22% та 21,4% відповідно при струмі додаткової обмотки $I_k=1$ А.

Навіть при підтримці постійної напруги $U_1=\text{const}$ на затискачах генератора вдається збільшити величину потужності, що приймається від ротора вітроустановки. При регулюванні струму додаткової обмотки за умови $U_1=14,4$ В= const збільшується вихідна потужність на затискачах генератора на 30 % при 200 об/хв, 12,5% при 350 об/хв, 9,7% при 550 об/хв та 17,6% при 650 об/хв.

Використання додаткової обмотки підмагнічування для регулювання вихідної потужності системи вітроагрегат-електрогенератор є більш ефективним методом ніж використання конденсаторів.

Порівняння результатів експерименту із результатами імітаційного моделювання проводиться з метою підтвердження адекватності розроблених математичних моделей та визначення похибки отриманих результатів.

На рис. 10 показано залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру для двох випадків: без регулювання (природна характеристика); при приєднанні до обмотки якоря генератора додаткової ємності $C=100$ мкФ.

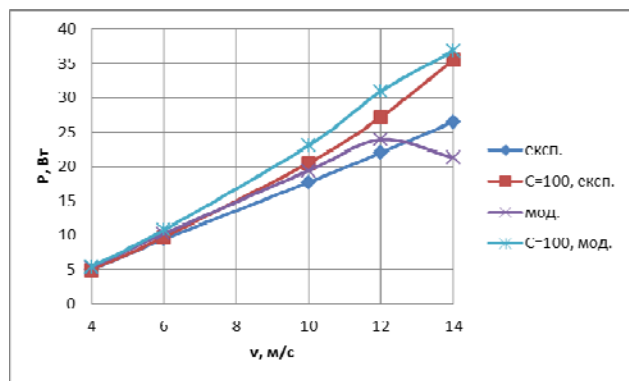


Рисунок 10. Залежність потужності від швидкості вітру при приєднанні додаткової ємності $C=100$ мкФ

По рис. 10 видно, що розбіжність між результатами імітаційного моделювання та експериментальних досліджень знаходиться в межах 8-10%, що підтверджує адекватність та достовірність отриманих раніше результатів. Експериментальна крива не має відповідного максимуму потужності в області швидкості вітру 12 м/с, оскільки для симуляції ротора установки використовувався привідний двигун постійного струму з незалежним збудженням.

На рис. 11 наведено залежність вихідної потужності від швидкості вітру при подачі постійної за величиною напруги на додаткову обмотку підмагнічування.

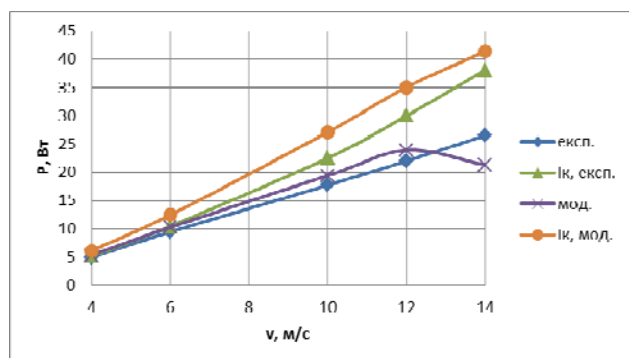


Рисунок 11. Залежність потужності генератора від швидкості вітру при подачі напруги на додаткову обмотку

По рис. 11 видно, що розбіжність між результатами імітаційного моделювання та експериментальних досліджень знаходиться в межах 7-10%, що підтверджує адекватність та достовірність отриманих результатів при використанні додаткової обмотки підмагнічування.

Ефективність використання запропонованих методів регулювання вихідної потужності системи можливо оцінити за аналізу глибини регулювання потужності. Залежність приросту потужності для кожного значення швидкості вітру наведено на рис. 12.

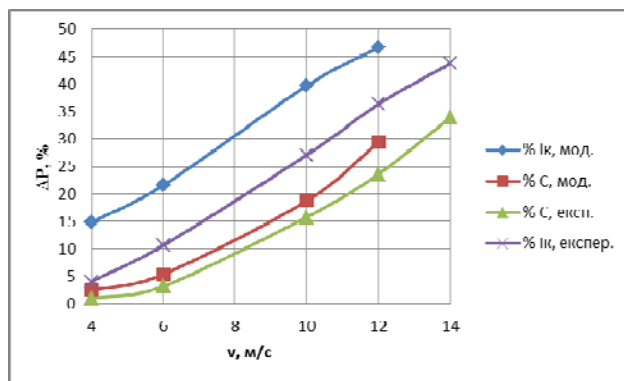


Рисунок 12. Глибина регулювання потужності при подачі напруги на додаткову обмотку та приєднанні додаткової ємності

З рис. 12 видно, що при збільшенні швидкості вітру та постійних значеннях параметрів глибина регулювання потужності досягає 40-45 %. За середньостатистичної швидкості вітру застосування підмагнічування дозволяє підвищити вихідну потужність генератора на 10-15% при підключенні додаткової ємності та 17-25% при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку. Використання додаткової обмотки підмагнічування є більш ефективним методом регулювання вихідної потужності генератора у складі вітроустановки. Розбіжність між експериментальними даними та результатами імітаційного моделювання пояснюється похибками вимірювальних приладів, не стабільністю мережі живлення привідного двигуна та втратами у пасовій передачі системи привідного двигуна та генератора.

Залежність вихідної потужності генератора за різної швидкості вітру та постійній напрузі на затискачах генератора наведено на рис. 13. В даному досліді струм додаткової обмотки регулюється таким чином, щоб отримати постійну за величиною напругу на затискачах генератора.

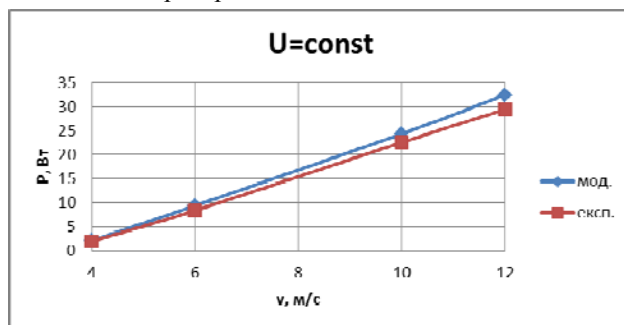


Рисунок 13. Залежність потужності генератора від швидкості вітру

За такого способу керування параметрами електрогенератора також спостерігається збільшення вихідної потужності генератора на $\approx 10-20\%$. Розбіжність між результатами експерименту та імітаційного моделювання також знаходяться в межах 7-10%. Потуж-

ність керування додатковою обмоткою за максимального струму керування при цьому становить до 15% від максимальної потужності генератора.

V. ВИСНОВКИ

Розроблено експериментальний стенд для дослідження параметрів та характеристик автономного магнітоелектричного генератора у складі вітроенергетичної установки. За допомогою розробленого стенду проведено оцінку можливості корекції вихідної активної потужності генератора за різних режимів його роботи.

Більш ефективним способом регулювання вихідної активної потужності є використання додаткової підмагнічувальної обмотки, оскільки даний метод не викликає додаткових втрат в режимі малих навантажень та є більш ефективним з точки зору збільшення вихідної потужності.

При постійній швидкості обертання генератора та збільшенні навантаження ефективність корегування вихідної активної потужності падає, що пояснюється збільшенням механічних та електричних втрат в генераторі.

Використання підмагнічування додатковою обмоткою дозволяє підвищити вихідну активну потужність на: 44%, 35,5%, 18,07%, 21,6% при швидкості обертання 200 об/хв, 350 об/хв, 550 об/хв та 650 об/хв відповідно.

Аналіз застосованих методів показує, що можливо підвищити вихідну потужність генератора на 10-15% при підключенні додаткової ємності та 17-25% при подачі напруги на додаткову обмотку.

За умови підтримки вихідної напруги генератора $U_1=14,4$ В також збільшується вихідна потужність на затискачах генератора на 30 % при 200 об/хв, 12,5% при 350 об/хв, 9,7% при 550 об/хв та 17,6% при 650 об/хв.

Порівняння результатів експериментальних досліджень із результатами імітаційного математичного моделювання показує збіжність результатів в межах 7-10%, що підтверджує адекватність розроблених моделей та достовірність отриманих результатів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В.М. Головка, Коваленко І.Я., Е.А. Монахов, О.І. Пономарьов (2018). Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двохсторонньою активною поверхнею для вітроустановок, Відновлювана енергетика, Київ, 2018, №2(53), С. 30-38.
- [2] В.М. Головка, М.А.Коваленко, Коваленко І.Я., І. Р.Галасун (2020). Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. Відновлювана енергетика, Київ.- 2020. - №4(63), с.50-58.
- [3] Коваленко І.Я. (2021). Робота синхронного генератора з постійними магнітами при підмагнічуванні сторонньою ємністю. Відновлювана енергетика, Київ.- 2021. - №1(64), с.50-58.
- [4] F. O. Ribeiro, João A. Vasconcelos Robust Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Many-Objective Optimization Approach // IEEE Transactions on Magnetics 2018. - № 54. – P. 12-22.
- [5] Nedjar, B.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Vido, L.; Gabsi, M.; Lécrivain, M. A new parallel double excitation synchronous machine. IEEE Trans. Magn. 2011, 47, 2252–2260.
- [6] Hua, H., Zhu, Z.Q., Zhan H. Novel Consequent-Pole Hybrid Excited Machine with Separated Excitation Stator // IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, 63, 4718–4728.
- [7] Wardach, M.; Paplicki, P.; Palka, R. Hybrid Excited Machine with Flux Barriers and Magnetic Bridges // Energies 2018, 11, 676.
- [8] Asfirane, S.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Gabsi, M. Study of a Hybrid Excitation Synchronous Machine: Modeling and Experimental Validation. Math. Comput. Appl. 2019, 24, 34.
- [9] Vadim Chumack, Serhii Tsyvinskyi, Mykhailo Kovalenko, Alexej Ponomarev, Ihor Tkachuk Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation // (2020) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (5 (103)), 30-36. doi 10.15587 / 1729-4061.2020.193495.
- [10] Wang W., H. Mi, Longbo M. Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. Energies, 2018, no.11, p. 3162. <https://doi.org/10.3390/en1113162>.
- [11] Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. Energies, 2020, no.13 (21), p. 5741. <https://doi.org/10.3390/en13215741>.
- [12] Eldoromi M. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2017, no. 26, pp. 3084-3099. <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-18-26-6/elk-26-6-25-1711-402.pdf>
- [13] Marek Goł, Ebiowski, Andrzej Smoleń, Lesław Gołebowski, Damian Mazur. Functional simulation model of the axial flux permanent magnet generator. Archives of Electrical Engineering. 2018. vol. 67(4). Pp. 857-868. <https://dx.doi.org/10.24425/aee.2018.124745>.
- [14] Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi. Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine.

Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2017. No. 26. Pp. 3084-3099. <https://doi.org/10.3906/elk-1711-402>.

- [15] Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Mueeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines. Engineering Optimization. 2017. Vol. 49. Pp. 815-827. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1208191>.

- [16] Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Зинченко Т.В. Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок. Відновлювана енергетика. 2016. № 2. С. 45-49.

Стаття надійшла до редакції 08.01.2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОРРЕКЦИИ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

- КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханики национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: kovalenko_ma@i.ua;
- КОВАЛЕНКО И.Я. аспирант кафедры возобновляемых источников энергии национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: 2048141@ukr.net;
- ГОЛОВКО В.М. доктор технических наук, профессор, профессор кафедры возобновляемых источников энергии национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: golovkovm@ukr.net;
- ЧУМАК В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханики национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: chumack_kpi@ukr.net;
- СВЯТНЕНКО В.А. старший преподаватель, кафедра теоретической электротехники национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" Киев, Украина, e-mail: vadiksv@gmail.com.

Цель работы. Провести оценку эффективности регулирования выходной активной мощности магнитоэлектрического генератора в составе автономной ветроэлектростанции.

Методы исследования. Анализ существующих методов коррекции выходных параметров генераторов. Методы экспериментального исследования электрогенераторов. Численные методы обработки полученных результатов.

Полученные результаты. Разработан экспериментальный стенд для исследования параметров и характеристик автономного магнитоэлектрического генератора в составе ветроэлектростанции с целью оценки эффективности коррекции исходной мощности генератора. Проведены экспериментальные исследования магнитоэлектрического генератора в режиме холостого хода для двух случаев: характеристика холостого хода при подмагничивании с применением сторонней емкости; характеристика холостого хода при подмагничивании дополнительной обмоткой (при подаче постоянного тока). В данном опыте выходное напряжение увеличивается от 26% (при скорости вращения 200 об/мин) до 47 % (при скорости вращения 780 об/мин). метода коррекции выходной мощности путем присоединения дополнительной емкости к обмотки якоря генератора является менее эффективным методом регулирования мощности, чем использование подмагничивания дополнительной обмоткой. проведены следующие исследования: исследование эффективности использования обмотки подмагничивания при постоянной активной нагрузке и при разной скорости вращения (разной скорости ветра); исследование эффективности использования обмотки подмагничивания при поддержании постоянного напряжения на зажимах генератора 14,4 В. Глубина регулирования выходной мощности зависит от скорости вращения ротора ветроустановки и по результатам экспериментальных исследований, для нагрузки $I=0,8$ А составляет: 1,4% при 350 об/мин; 12,5% при 550 об/мин; 15,3% при 650 об/мин; 22,12% при 750 об/мин. Более эффективным методом является использование дополнительной подмагничивающей обмотки. Проведен сравнительный анализ исходных параметров магнитоэлектрического электрогенератора, полученных путем экспериментальных исследований и имитационного численного моделирования. Сравнение результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований показывают схожесть полученных результатов в пределах 7-10%, что подтверждает адекватность разработанных моделей и достоверность полученных ре-

зультатов.

Научная новизна. Путем экспериментальных исследований магнитоэлектрического генератора установлены пределы коррекции выходной мощности генератора в составе автономной ветроэлектростанции.

Практическая ценность. Разработан экспериментальный стенд для исследования магнитоэлектрического генератора с осевым магнитным потоком для имитации его работы в составе автономной ветроэлектростанции.

Ключевые слова: экспериментальное исследование; магнитоэлектрический генератор; автономная ветроэлектростанция; коррекция выходной мощности; пределы регулирования.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF GENERATOR POWER CORRECTION OF AN AUTONOMOUS WIND ELECTRICAL INSTALLATIONS

KOVALENKO
M.A.

PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: kovalenko_ma@i.ua;

KOVALENKO I.Y.

Graduate Student Department of Renewable Energy Sources, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" e-mail: 2048141@ukr.net;

GOLOVKO V.M.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Renewable Energy Sources of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" Kyiv, Ukraine, e-mail: golovkovm@ukr.net;

CHUMACK V.V.

PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", chumack_kpi@ukr.net;

SVYATNENKO
V.A.

Senior Lecturer, Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky Kyiv, Ukraine, e-mail: vadiksv@gmail.com.

Purpose. To evaluate the efficiency of regulating the output active power of the magnetoelectric generator as part of an autonomous wind turbine.

Methodology. Analysis of existing methods of adjusting the output parameters of generators. Methods of experimental research of electric generators. Numerical processing methods of the obtained results.

Findings. An experimental stand was developed to study the parameters and characteristics of an autonomous magnetoelectric generator as part of a wind turbine in order to assess the effectiveness of correcting the output power of the generator. Experimental studies of the magnetoelectric generator in the idle mode for two cases are carried out: the characteristic of idling at magnetization with use of a third-party capacity and the idle characteristics when magnetized by an additional winding (with DC supply). In this experiment, the output voltage increases from 26% (at a speed of 200 rpm) to 47% (at a speed of 780 rpm). Studies have shown that the use of the method of correcting the output power by connecting additional capacity to the armature winding of the generator is a less effective method of power control than the use of magnetization by the additional winding. The following studies were conducted: study of the efficiency of the magnetizing winding at constant active load and at different speeds (different wind speeds), study of the efficiency of the magnetizing winding while maintaining a constant voltage at the generator terminals 14.4 V. Depth of the output power regulation depends on the rotation speed of the wind turbine rotor and according to the results of experimental studies, for a load of $I = 0.8$ A is: 1.4% at 350 rpm; 12.5% at 550 rpm; 15.3% at 650 rpm; 22.12% at 750 rpm. A more efficient method is to use an additional sub-magnetizing winding. A comparative analysis of the initial parameters of the magnetoelectric generator is obtained by experimental studies and numerical modeling simulation. Comparison of modeling results with the results of experimental studies shows the convergence of the obtained results within 7-10%, which confirms the adequacy of the developed models and the reliability of the obtained results.

Originality. By means of experimental researches of the magnetoelectric generator the limits of output power correction of the generator as a part of the independent wind electric installation are established.

Practical value. An experimental stand was developed for the study of a magnetoelectric generator with axial magnetic flux to simulate its operation as part of an autonomous wind turbine.

Keywords: experimental research; magnetoelectric generator; autonomous wind turbine; output power correction; limits of regulation.

REFERENCES

- [1] Holovko, V.M., Kovalenko, I.Ia., Monakhov, E.A., Ponomarov, O.I. (2018). Porivniannia tradytsiinoho he-neneratora iz postiinyim mahnitamy z tortsevim he-neneratom iz dvukhstoronnoiu aktyvnoiu poverkh-neiu dlia vitroustanovok, Vidnovliuvana enerhety-ka, Kyiv, No 2(53), S. 30-38.
- [2] Holovko, V.M., Kovalenko, M.A., Kovalenko, I.Ia., Halasun, I. R. (2020). Matematychni modeliuvannia av-tonomnoi vitroustanovky z synkhronnym henerato-rom mahnitoelektrychnoho typu. Vidnovliuvana enerhetyka, Kyiv. No 4(63), s.50-58.
- [3] Kovalenko, I.Ia. (2021). Robota synkhronnoho heneratora z postiinyim mahnitamy pry pidmahnichuvanni storonnoiu yemnistiu. Vidnovliuvana enerhetyka, Kyiv. No 1(64), s.50-58.
- [4] Ribeiro, F. O., João, A. (2018). Vasconcelos Robust Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Many-Objective Optimization Approach. *IEEE Transactions on Magnetics*. No 54, 12-22.
- [5] Nedjar, B.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Vido, L.; Gabsi, M.; Lécivain, M. (2011). A new parallel double excitation synchronous machine. *IEEE Trans. Magn.* 47, 2252–2260.
- [6] Hua, H., Zhu, Z.Q., Zhan, H. (2016). Novel Consequent-Pole Hybrid Excited Machine with Separated Excitation Stator. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 63, 4718–4728.
- [7] Wardach, M., Paplicki, P., Palka, R. (2018). Hybrid Excited Machine with Flux Barriers and Magnetic Bridges, *Energies* 11, 676.
- [8] Asfirane, S., Hlioui, S., Amara, Y., Gabsi, M. (2019). Study of a Hybrid Excitation Synchronous Machine: Modeling and Experimental Validation. *Math. Comput. Appl.* 24, 34.
- [9] Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev A. (2020). Ihor Tkachuk Mathematical modeling of a Synchronous generat. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* or with combined excitation, 1 (5 (103)), 30-36. doi 10.15587 / 1729-4061.2020.193495.
- [10] Wang, W., H. Mi, Longbo M. (2018). Study and Optimal Design of a Direct-Driven Stator Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Improved Dynamic Performance. *Energies*, No. 11, p. 3162. <https://doi.org/10.3390/en1113162>.
- [11] Radwan-Pragłowska, N., Wegiel, T., Borkowski, D. (2020). Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, No. 13 (21), p. 5741. <https://doi.org/10.3390/en13215741>.
- [12] Eldoromi, M. (2017). Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine / Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi//*Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, No. 26, pp. 3084-3099. <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-18-26-6/elk-26-6-25-1711-402.pdf>
- [13] Marek Goł, Ebiowski, Andrzej Smoleń, Lesław Golebiowski, Damian Mazur. Functional simulation model of the axial flux permanent magnet generator. *Archives of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 67(4). Rp. 857-868. <https://dx.doi.org/10.24425/aee.2018.124745>.
- [14] Mojtaba Eldoromi, Sajjad Tohidi, Mohammad Reza Feyzi, (2017). Improved design of axial flux permanent magnet generator for small-scale wind turbine. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. No. 26. Pp. 3084-3099. <https://doi.org/10.3906/elk-1711-402>.
- [15] Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Mueeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra. (2017) Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines. *Engineering Optimization*. Vol. 49. 815-827. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1208191>.
- [16] Permynov, Yu.N., Kokhanavych, V.P., Zynchenko, T.V. (2016). Alhorytm rascheta synkhronnykh heneratorov tor-tsevoi konstruktsyy s dvumia mahnytnymy systema-my, raspolozhenymy po tortsam statora, dlia vetroenerhetycheskykh ustanovok. *Vidnovliuvana enerhetyka*. No 2. S. 45-49.