

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Коваленко Ірина Яківна

УДК 621.548

## ДИСЕРТАЦІЯ

Автономна безмультимедійна вітроелектрична установка на базі генератора  
торцевого типу

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
в галузі знань 14 «Електрична інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело \_\_\_\_\_ І.Я. Коваленко

Науковий керівник Головка Володимир Михайлович, доктор технічних наук,  
професор.

Київ – 2023

## АНОТАЦІЯ

**Коваленко І. Я. Автономна безмультіплікаційна вітроелектрична установка на базі генератора торцевого типу.** - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в галузі знань 14 «Електрична інженерія». - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2022.

Дисертаційне дослідження присвячене дослідженню та вирішенню актуального наукового завдання, що полягає в обґрунтуванні методів регулювання вихідної потужності та розробці математичної моделі генераторного обладнання безмультіплікаційної автономної вітроелектроустановки, з урахуванням даних методів, шляхом імітаційного моделювання за змінної частоти обертання ротора вітроустановки.

В роботі проведено літературно-патентний пошук за темою дисертаційного дослідження. Проведено оцінку загального стану вітроенергетики в регіональному контексті та в цілому оцінено світові тенденції розвитку даної галузі. Розглянуто типи безмультіплікаційних вітроелектричних установок, проаналізовано їх переваги та недоліки, характерні області застосування. За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що безмультіплікаційні системи наразі складають  $\approx 20\%$  від загальної кількості вітрогенераторів на ринку агрегатів малої потужності. Вони успішно розвиваються і конкурують із редукторними системами, оскільки мають ряд принципових переваг, таких як простота конструкції, більш висока надійність та ефективність. Для оцінки існуючих методів та засобів регулювання вихідних параметрів автономних вітроустановок проведено аналіз способів стабілізації вихідних параметрів вітроелектроустановок, проаналізовано їх переваги та недоліки. Предметом регулювання вітроелектричних установок є: вихідна напруга, вихідна частота та вихідна потужність. Аналіз показав, що практично відсутні засоби для регулювання вихідної потужності безмультіплікаційних вітроелектричних установок у складі з магнітоелектричними генераторами з

аксіальним магнітним потоком. Для автономних безмультіплікаційних вітроустановок використовується специфічний тип електромеханічних перетворювачів енергії. Вимога до регулювання вихідних параметрів такої системи потребує використання електрогенераторів спеціальної конструкції. Проведено порівняльний аналіз генератора торцевого типу з традиційним циліндричним генератором зі збудженням від постійних магнітів малої потужності. З огляду на переваги генератора торцевого типу, в роботі обрано за основу саме цей тип генератора. В роботі проведено розрахунок параметрів та характеристик магнітоелектричного генератора з аксіальним магнітним потоком та подвійним статором.

В роботі проведено порівняльний аналіз аеродинамічних характеристик роторів ВЕУ для відомих профілів – традиційних (P-II, A-6, BS-10, BS-10, p-11-18), профілів серії GA(W)-1 та ламінованих FX. При розрахунку енергетичних характеристик генератора вітроустановки встановлено, що ротори вітроустановок з профілями лопатей групи традиційних, дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності 91,8...93,3 Вт/м<sup>2</sup>, при значеннях коефіцієнтів використання енергії вітру  $\xi=0,33...0,44$  в діапазоні швидкості  $z=4...5$ . Ротори з профілями групи 2 дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності 114,3...115,7 Вт/м<sup>2</sup> при  $\xi=0,54...0,55$  в діапазоні швидкості  $z=6...7$ . Проведено узгодження аеродинамічних характеристик ротора вітротурбіни з механічною характеристикою електрогенератора, що дало можливість встановити межі корекції його за моментом та потужністю за різних значень номінальної швидкості вітру. Так для профілю лопаті серії GA(W) вона складає за моментом 22%, а за потужністю 9,5%, (за номінальної швидкості 5м/с відносно верхньої межі діапазона номінальних значень 8м/с). Для реалізації поставленої задачі, пропонується проаналізувати два методи корекції: приєднання додаткових конденсаторів до обмотки статора генератора та застосування додаткової обмотки підмагнічування статора генератора.

В результаті дослідження отримав подальший розвиток метод порівняльного аналізу аеродинамічних характеристик роторів вітроустановок шляхом урахування

раціонального взаємовпливу коефіцієнта використання енергії вітру і модуля швидкості, що дозволив провести узгодження аеродинамічних характеристик ротора вітротурбіни з механічною характеристикою електрогенератора та встановлювати межі корекції його за моментом та потужністю за різних значень номінальної швидкості вітру.

Для оцінки можливості корекції вихідної потужності автономної вітроустановки в дисертаційному дослідженні розроблені чисельні імітаційні моделі. На основі розробленої моделі досліджувались варіанти стабілізації вихідної потужності та напруги при: використанні генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора; корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних значеннях швидкості вітру; корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних значеннях швидкості вітру; використанні магнітоелектричного генератора з аксіальним магнітним потоком автономної вітроелектроустановки з двостороннім розташуванням магнітів ротора. За результатами математичного моделювання проведено: порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру; порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру.

В дисертаційному дослідженні уточнено математичну модель безмультіплікаційної вітроелектроустановки у складі з магнітоелектричним генератором з одностороннім та двостороннім розташуванням магнітів ротора, яка, на відміну від відомої, враховує наявність впливу параметрів подвійного статора та додаткової обмотки для підмагнічування магнітної системи, що дозволило визначити межі корегування вихідної потужності генератора. Обґрунтовано, шляхом структурного імітаційного моделювання та експериментально підтверджено, характер впливу корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора з аксіальним магнітним потоком за допомогою введення статичних конденсаторів та додаткового збудження статора генератора, що дозволило

провести оцінку величини корегування вихідної потужності за випадкової зміни швидкості вітру. При підключенні конденсаторів до затискачів генератора спостерігається збільшення вихідної потужності на  $\approx 5-10\%$ . Водночас, напруга на затискачах, при цьому, зменшується в 1,8 рази, що пояснюється падінням напруги на внутрішніх опорах генератора та ростом активної та реактивної складової струму якоря генератора  $\approx 2,2$  рази. Більш ефективним способом корекції вихідної потужності є використання додаткової підмагнічуючої обмотки магнітоелектричного генератора. При подачі напруги на обмотку збудження  $U_f=8$  В спостерігається приріст вихідної потужності генератора  $\approx 30-40\%$  ніж без регулювання. Встановлено, що величина ємності залежить від параметрів обмотки якоря електрогенератора, величини взаємодукції, характеру та величини навантаження. Для досліджуваного генератора значення ємності лежать в межах від 4,3 – 32,1 мкФ для чисто активного навантаження та для діапазону потужності 0 – 87 Вт.

В дисертаційному дослідженні розроблено експериментальний стенд для дослідження параметрів і характеристик автономного магнітоелектричного генератора у складі без мультиплікаційної вітроелектроустановки. За допомогою розробленого стенду оцінено можливість корекції вихідної активної потужності генератора в різних режимах його роботи, а саме: проведено аналіз структурної схеми автономної роботи вітроелектроустановки з корекцією потужності генератора додатковою обмоткою підмагнічування; проведено наліз експериментальних результатів корекції потужності генератора додатковою обмоткою підмагнічування; порівняльний аналіз результатів експерименту та імітаційного моделювання корекції потужності генератора збіжність результатів в межах 7-10%, що підтверджує адекватність розроблених моделей та достовірність отриманих результатів. 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. 6.

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.

**Ключові слова.** Відновлювані джерела енергії, вітроелектрична установка, безмультимплікаційна вітроустановка, автономна вітроустановка, локальна система, вітроелектрична станція, вітротурбіна, генератор вітроустановки, синхронний генератор, магнітоелектричний генератор з аксіальним магнітним потоком, електрична мережа, надійність, автономна система, асинхронний генератор, автономне джерело живлення.

**Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. В.М. Головка, І.Я. Коваленко, Е.А. Монахов, О.І. Пономарьов. Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двосторонньою активною поверхнею для вітроустановок. Відновлювана енергетика. - 2018. - № 2 (53). - С. 30-38 (<https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/146/98>)

2. В. В. Чумак, М. А. Коваленко, І. Я Коваленко. Аналітичний огляд електромеханічних перетворювачів енергії для вітрової енергетики. Екологічні науки. - 2018. - №2 (21). – С. 36-39 (<http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/2/8.pdf> ).

3. В. М. Головка, В. П. Коханєвич, М. О. Шихайлов, І. Я. Коваленко. Вплив аеродинамічних характеристик профілю лопаті на енергетичні характеристики ротора вітроустановки. Відновлювана енергетика. 2019. - № 4 (59), С. 49-55. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59)).

4. В. М. Головка, М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, І. Р. Галасун. Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. Відновлювана енергетика. 2020. - № 4 (63), С. 50-58. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63))

5. І. Я. Коваленко Робота синхронного генератора з постійними магнітами при підмагнічуванні сторонньою ємністю. Відновлювана

енергетика. 2021. - № 1 (64), С. 50-58. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1\(64\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1(64))

6. Коваленко М. А., Коваленко І.Я., Головка В.М., Чумак В.В., Святненко, В.А. Експериментальна оцінка корекції потужності генератора автономної вітроелектроустановки. Електротехніка та електроенергетика, (1), 2022, с.8–18. DOI:<https://doi.org/10.15588/1607-6761-202-1-1>

7. Коваленко М. А., Коваленко І.Я., Головка В.М., Чумак В.В., Островерхов М.Я. Корекція вихідної потужності генератора безмультіплікаторної вітроелектроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (8), 2022, 39–46. DOI:<https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.07>

8. Чумак В.В., Коваленко М.А., Коваленко І.Я., Ткачук І.В., . Порівняння синхронних генераторів для автономної бензинової установки. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (8), 2022, 32–38. DOI:<https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06>

9. Чумак В.В., Коваленко М.А., Коваленко І.Я., Ткачук І.В. Математичне моделювання гібридного магнітного редуктора для автономної вітроустановки малої потужності. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9), 2023, 45–51. DOI:<https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.07>

10. Чумак В.В., Коваленко М.А., Коваленко І.Я., Ткачук І.В. Експериментальне дослідження універсального високошвидкісного колекторного двигуна змінного струму. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (9), 2023, с.39–44. DOI:<https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.06>

11. V. Chumack, V. Bazenov, Oks. Tymoshchuk, M. Kovalenko, S. Tsyvinskyi, Ih. Tkachuk. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation.

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 6(5 (114), 56–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246601> (SCOPUS, Q3)

12. M.Ostroverkhov, V.Chumack, M.Kovalenko & I.Kovalenko. Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, (2022), 4(2(118), 67–78. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432> (SCOPUS, Q3)

13. Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. / V. M. Golovko, M.Ya.Ostroverkhov, M.A.Kovalenko, I. Ya Kovalenko, D.V.Tsyplenkov./ Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2022, Peer-reviewed journal no 5(191), pp.74-79. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074> (SCOPUS, Q3)

14. Коваленко М. А., Коваленко І.Я., Вівчаренко О.О. Дослідження параметрів та характеристик торцевого електрогенератора для вітроустановки. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики" КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ. - 2018. Розділ 4.

15. Коваленко М. А., Коваленко І.Я., Рябуха А.І. Вплив швидкості вітру на зовнішню характеристику торцевого генератора із постійними магнітами. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики" КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ. - 2018.

16. Головка В.М., Коваленко І.Я. Порівняльні характеристики безмультіплікаційних вітроелектричних установок. Матеріали XX Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, 2019, С.415-419.

17. Коваленко І.Я., Головка В.М. Визначення напрямку корекції енергетичних характеристик синхронного генератора із постійними магнітами вітроустановки. Матеріали XXI Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, 2020, С.439-442.



18. Коваленко М. А., Коваленко І.Я., Перепелиця О.С., Тітов Є.О. Математичне моделювання трифазного синхронного генератора із постійними магнітами малої потужності. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики" КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ. - 2021., С.307 – 311.

19. Коваленко М. А., Коваленко І.Я., Перепелиця О.С., Тітов Є.О. Аналіз конструктивних виконань ГЕС для побудови моделі-прототипу. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики" КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ. – 2021. С.297 – 300.

20. Коваленко М. А., Коваленко І.Я., Перепелиця О.С., Тітов Є.О. Математичне моделювання мікрогенератора постійного струму. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики" КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ. – 2021. С.301 – 306.

21. Чумак В. В., Коваленко М. А., Святненко В.А., Коваленко І.Я., Кришньов О.О. Електромеханічний перетворювач нетрадиційного типу. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – с. 246-248.

22. Чумак В. В., Коваленко М. А., Святненко В.А., Коваленко І.Я., Ткачук І.В. Магнітно-редукторний генератор для вітрової енергії. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, с. 249-253

23. Чумак В.В., Коваленко М.А., Реуцький М.О., Коваленко І.Я., Ткачук І.В. Математична модель корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних значеннях швидкості вітру. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми

електроенерготехніки та автоматики". – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – с. 254-257.

## SUMMARY

Kovalenko I.Ya. Autonomous non-multiplication wind power installation with axial-flux generator. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics in the field of knowledge 14 "Electrical engineering". - National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2023.

The dissertation study is dedicated to the research and solution of an actual scientific task, which consists in substantiating the methods of regulating the output power and developing a mathematical model of the generator equipment of a multiplier-less autonomous wind power plant, taking into account these methods, by means of simulation modeling with variable rotation frequency of the wind turbine rotor.

In this work was performed literature and patent search on the topic of the dissertation research. An assessment of the general state of wind energy in the regional context was carried out, and global trends in the development of this industry were generally assessed. The types of non-multiplication wind power plants are considered, their advantages and disadvantages, typical areas of application are analyzed. According to the results of the analysis of literary sources, it was established that the multiplierless systems currently make up  $\approx 20\%$  of the total number of wind generators on the market of small power units. They are successfully developed and compete with gear systems, as they have a number of fundamental advantages, such as simplicity of design, higher reliability and efficiency. In order to assess the existing methods and means of regulating the initial parameters of autonomous wind turbines, an analysis of methods of stabilizing the initial parameters of wind turbines was carried out, their advantages and disadvantages were analyzed. The subject of regulation of wind power plants is: output voltage, output frequency and output power. The analysis showed that there are practically no means for regulating the output power of multiplicative wind turbines combined with magnetoelectric generators with axial magnetic flux. A specific type of electromechanical energy converters is used for autonomous non-multiplication wind turbines. The requirement to adjust the output parameters of such a system requires the use of specially

designed electric generators. A comparative analysis of the end-type generator with a traditional cylindrical generator with excitation from low-power permanent magnets was carried out. Given the advantages of the end-type generator, this type of generator was chosen as the basis for the work. The paper calculates the parameters and characteristics of a magnetoelectric generator with an axial magnetic flux and a double stator.

In the work, a comparative analysis of the aerodynamic characteristics of wind turbine rotors for known profiles - traditional (P-II, A-6, BS-10, BS-10, p-11-18), profiles of the GA(W)-1 series and laminated FX is carried out. When calculating the energy characteristics of the generator of the wind turbine, it was established that the rotors of wind turbines with blade profiles of the traditional group allow to obtain the maximum values of mechanical power of 91.8...93.3 W/m<sup>2</sup>, with the values of wind energy utilization coefficients  $\xi=0.33...0.44$  in the speed range  $z=4...5$ . Rotors with profiles of group 2 allow to obtain maximum values of mechanical power of 114.3...115.7 W/m<sup>2</sup> at  $\xi=0.54...0.55$  in the speed range  $z=6...7$ . The aerodynamic characteristics of the wind turbine rotor were reconciled with the mechanical characteristics of the electric generator, which made it possible to set the limits of its correction in terms of moment and power at different values of the nominal wind speed. Thus, for the blade profile of the GA(W) series, it is 22% in terms of moment, and 9.5% in terms of power (at a nominal speed of 5 m/s relative to the upper limit of the range of nominal values of 8 m/s). To implement the given task, it is proposed to analyze two correction methods: connecting additional capacitors to the generator stator winding and using an additional generator stator magnetization winding

As a result of the study, the method of comparative analysis of the aerodynamic characteristics of the rotors of wind turbines was further developed by taking into account the rational interaction of the coefficient of wind energy utilization and the speed module, which made it possible to reconcile the aerodynamic characteristics of the rotor of the wind turbine with the mechanical characteristics of the electric generator and set the limits of its correction in terms of torque and power for different values of the nominal wind speed

Numerical simulation models were developed in the dissertation research to assess the possibility of correcting the output power of an autonomous wind turbine. On the basis of the developed model, options for stabilization of output power and voltage were investigated when: using a generator of a wind power plant with one-sided arrangement of rotor magnets; correction of the output power of the generator using the introduction of static capacitors at discrete values of the wind speed; correction of generator output power using additional excitation at discrete values of wind speed; using a magnetoelectric generator with an axial magnetic flux of an autonomous wind power plant with a bilateral arrangement of the rotor magnets. According to the results of mathematical modeling, the following was performed: a comparative analysis of the correction of the output power of the generator using the introduction of static capacitors at discrete and random values of the wind speed; comparative analysis of generator output power correction using additional excitation at discrete and random wind speed values.

In the dissertation research, the mathematical model of the multiplicationless wind power plant in the composition with the magnetoelectric generator with one-sided and two-sided arrangement of the rotor magnets was clarified, which, unlike the known one, takes into account the presence of the influence of the parameters of the double stator and an additional winding for magnetizing the magnetic system, which made it possible to determine the limits of the adjustment of the output power of the generator. The nature of the influence of the correction of the output power of a magnetoelectric generator with axial magnetic flux using the introduction of static capacitors and additional excitation of the generator stator was substantiated by means of structural simulation modeling and experimentally confirmed, which made it possible to estimate the amount of correction of the output power under random changes in wind speed. When connecting capacitors to the generator clamps, an increase in output power by  $\approx 5-10\%$  is observed. At the same time, the voltage on the clamps, in this case, decreases by 1.8 times, which is explained by the voltage drop on the internal resistances of the generator and the growth of the active and reactive components of the generator armature current by  $\approx 2.2$  times. A more effective way of correcting the output power is to use an additional magnetizing winding of the magnetoelectric generator. When applying a voltage to the excitation winding of  $U_f = 8 \text{ V}$ ,

an increase in the output power of the generator is observed by  $\approx 30\text{-}40\%$  compared to without regulation. It was established that the size of the capacity depends on the parameters of the generator armature winding, the amount of mutual inductance, the nature and size of the load. For the studied generator, the capacitance values range from 4.3 to 32.1  $\mu\text{F}$  for a purely active load and for a power range of 0 to 87 W.

In the dissertation study, an experimental stand was developed for the study of parameters and characteristics of an autonomous magnetoelectric generator in a composition without a multiplying wind power plant. With the help of the developed stand, the possibility of correcting the output active power of the generator in different modes of its operation was evaluated, namely: the structural diagram of the autonomous operation of the wind power plant with the correction of the generator power by an additional magnetizing winding was analyzed; an analysis of the experimental results of generator power correction with an additional magnetization winding was carried out; comparative analysis of the results of the experiment and simulation modeling of the generator power correction, the convergence of the results is within 7-10%, which confirms the adequacy of the developed models and the reliability of the obtained results. The use of magnetization with an additional winding allows you to increase the output active power by: 44%, 35.5%, 18.07%, 21.6% at rotation speeds of 200 rpm, 350 rpm, 550 rpm and 650 rpm in accordance. 6. Under the condition of maintaining the output voltage of the generator  $U_1=14.4\text{ V}$ , the output power at the generator terminals also increases by 30% at 200 rpm, 12.5% at 350 rpm, 9.7% at 550 rpm and 17.6% at 650 rpm.

**Keywords.** Renewable energy sources, wind power plant, multiplierless wind power plant, autonomous wind power plant, local system, wind power plant, wind turbine, wind power generator, synchronous generator, axial flux magnetoelectric generator, electric network, reliability, autonomous system, asynchronous generator, autonomous power source.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 Сучасний стан розвитку вітроенергетики.....	25
1.1 Загальний стан вітроенергетики.....	25
1.2 Безмультиплікаційні вітроелектричні установки .....	27
1.3 Способи стабілізації вихідних параметрів вітроелектроустановок.....	36
1.4 Типи електромеханічних перетворювачів енергії, що використовуються у складі вітроелектроустановок .....	38
1.5 Електрогенератор для роботи у складі безмультиплікаційної вітроелектроустановки.....	47
1.6 Мета та завдання дослідження. ....	48
Висновки до розділу 1. ....	49
РОЗДІЛ 2 Визначення впливу аеродинамічних характеристик ротора малопотужної вітроустановки при агрегуванні її з генераторним обладнанням .....	50
2.1 Аналіз аеродинамічних характеристик профілів лопаті ротора.....	50
2.2 Узгодження аеродинамічних характеристик ротора вітротурбіни з механічною характеристикою електрогенератора .....	57
Висновки до розділу 2. ....	62
РОЗДІЛ 3 Імітаційне моделювання безмультиплікаційної вітроелектроустановки ..	63
3.1 Аналіз вихідних положень для створення математичної моделі з визначення параметрів генератора безмультиплікаційної вітроелектроустановки.....	63
3.2 Математична модель генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора .....	70
3.2.1 Загальний опис математичної моделі генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора.....	70
3.2.2 Математична модель корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних значеннях швидкості вітру .....	79
3.2.3 Математична модель корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних значеннях швидкості вітру.....	81
3.3 Математична модель генератора вітроелектроустановки з двостороннім розташуванням магнітів ротора .....	83
3.4 Аналіз результатів математичного моделювання для визначення параметрів генератора безмультиплікаційної вітроелектроустановки .....	85

3.4.1 Порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру.....	85
3.4.2 Порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру .....	93
3.5 Робота синхронного генератора з постійними магнітами при підмагнічуванні сторонньою ємністю.....	97
Висновки до розділу 3 .....	107
РОЗДІЛ 4 Експериментальні дослідження генератора з двостороннім розташуванням магнітів ротора безмультіплікаційної вітроелектроустановки.....	109
4.1 Визначення параметрів та розробка стенду для експериментальних досліджень генератора безмультіплікаційної вітроелектроустановки .....	109
4.2 Аналіз структурної схеми автономної роботи вітроелектроустановки з ємнісною корекцією потужності генератора .....	111
4.2.1 Аналіз експериментальних результатів ємнісної корекції потужності генератора .....	111
4.2.1.1 Експериментальні дослідження характеристик торцевого магнітоелектричного генератора для вітроустановки в режимі холостого ходу.....	111
4.2.1.2 Експериментальні дослідження магнітоелектричного генератора при роботі під навантаженням.....	117
4.3 Аналіз структурної схеми автономної роботи вітроелектроустановки з корекцією потужності генератора додатковою обмоткою підмагнічування.....	124
4.3.1 Аналіз експериментальних результатів корекції потужності генератора додатковою обмоткою підмагнічування.....	124
4.3.2 Порівняльний аналіз результатів експерименту та імітаційного моделювання корекції потужності генератора .....	128
Висновки до розділу 4. ....	134
ВИСНОВКИ.....	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	138
ДОДАТКИ.....	151



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Різке підвищення цін на газ і складність його видобутку змушують багато держав задуматися про те, які джерела енергії могли б стати йому альтернативою. Аналіз показує, що за рахунок вітроенергетичних установок можна покрити до 40 - 50% потреби в електроенергії. Сучасна вітроустановка є одним з найбільш високотехнологічних агрегатів серед інших засобів нетрадиційної та відновлювальної енергетики.

Особливий інтерес до нетрадиційних джерел енергії проявляє населення, особливо та частка, що знаходиться в зонах, віддалених від центрального електропостачання, іншими словами в зонах без електрифікації. Енергію, що отримується при роботі альтернативних джерел енергії можна використовувати як для постійного енергопостачання, так і для резервного енергопостачання, що особливо зручно для котеджних селищ, невеликих населених пунктів, стратегічних або військових об'єктів.

Україна є однією з країн, що має значний потенціал відновлювальної енергетики. Дослідження енергії вітру останнім часом знаходить все більшого поширення, як в роботах вітчизняних, так і зарубіжних вчених.

Задача збільшення кількості утилізації енергії вітру завжди є актуальною. Традиційно вона вирішується за рахунок зміни аеродинамічних параметрів ротора вітротурбіни. Так для збільшення величини потужності на валу ротора збільшують його діаметр. Але підвищення потужності в два рази призводить до збільшення діаметра ротора в чотири рази. Такий результат викликає подальше зростання розмірів, а значить і маси інших складових вітроагрегата, тобто питома матеріалоемність конструкції зростає і знижується економічна доцільність

використання даної установки. Іншим шляхом є застосування більш досконалих профілів лопатей.

Одним із напрямків підвищення ефективності перетворення енергії вітру є удосконалення конструкції відомих генераторів або розробка принципово нових типів генераторів. Природа вітру носить мінливий характер, тому актуальною задачею є використання максимально можливого потенціалу вітру при електромеханічному перетворенні енергії. Жорстка залежність потужності на валу ротора вітротурбіни від аеродинамічних характеристик лопаті відомі і втілені в інженерні рішення, проте узгодження отриманої потужності з потужністю електричної машини, що під'єднана до ротора, вимагає додаткових досліджень. Застосування методів математичного моделювання дозволяють провести визначення параметрів генераторного обладнання з метою корекції вихідної потужності при сталих та змінних значеннях швидкості вітру. Розроблено числову математичну модель для дослідження параметрів та характеристик синхронного генератора із постійними магнітами, що враховує двосторонню активну зону статора та аеродинамічні параметри ротора вітротурбіни.

Активними дослідженнями в напрямку підвищення ефективності перетворення енергії вітру займаються як вітчизняні так і закордонні дослідники такі як: П.Ф. Васько, С.О. Кудря, В. М. Головкин, О. І. Яковлев, А. П., Голубенко, В.І. Будько, Олейников О.М., Зарицька Є.І., О.В. Остапчук та ін. [1-4, 6-10, 20, 21, 55, 69, 82, 89-91, 97, 119].

Одним із основних складових елементів вітроустановок є електричний генератор. Дослідженням та удосконаленням роботи генераторів займалися науковці - Л.М. Паластін, Д.А. Бут, А.А. Афонін, В.В. Гребенніков, Л. І. Мазуренко, Ю.Н. Кронеберг, Ю.М. Пермінов, В.В. Чумак, Ф. Кеніо, Jacek F.Gieras, Takayuki Mizuno, Kazutoshi Nagayama, Rita Mbayed, та ін., основні результати досліджень яких узагальнено у працях [16, 23-26, 35, 44, 51, 52, 61, 64, 74, 87, 110]. Досвід та розробки зарубіжних та вітчизняних вчених показав, що на даний момент найбільшу ефективність мають генератори малопотужних вітроустановок, що виконані на базі постійних магнітів із рідкоземельних елементів (SmCo, NdFeB). Підвищити

ефективність перетворення енергії вітру в електричну можливо за рахунок вдосконалення конструкції існуючих типів електрогенераторів, використання нових технологій та матеріалів або розробки нових конструктивних рішень електрогенераторів. Іншим актуальним питанням є керування параметрами автономної вітроелектроустановки, таких як: момент, потужність, напруга.

Існуючі методи та технічні рішення корекції вихідних параметрів малопотужних вітроелектроустановок призводять до підвищення їх вартості, масогабаритних показників, громісткості, зниження їх надійності, потребують проведення регулярних технічних оглядів [8, 34, 55, 62, 68, 77, 99, 105, 114].

Актуальність роботи полягає в тому, що на сьогоднішній день в секторі малої вітроенергетики, розроблені вітроустановки, які працюють з номінальною потужністю тільки при одному значенні робочої (номінальної) швидкості вітру, що не дозволяє в повній мірі утилізувати енергію вітру в широкому діапазоні його швидкості. З огляду на це, актуальною науковою задачею, яка має важливе практичне значення, є розроблення на основі результатів математичного і фізичного моделювання автономної безмультимплікаційної малопотужної вітроустановки. У порівнянні з відомими аналогами даний варіант наближається до максимального використання енергії вітру за будь-якого значення його швидкості. Актуальною задачею є аналіз аеродинамічних характеристик роторів вітроустановок та розробка числових імітаційних моделей для оцінки ефективності різних методів корекції вихідної потужності генератора безмультимплікаційної вітроустановки. Вирішенню зазначеної актуальної задачі присвячено дане дисертаційне дослідження.

Нові можливості для поглибленого вивчення електромеханічних процесів в безмультимплікаторних вітроустановках малої потужності та дослідження методів корекції вихідної потужності дає застосування сучасних засобів чисельного моделювання, які подані програмними пакетами MATLAB-Simulink, Comsol Multiphysics. Використання даних програмних засобів дозволяє підвищити точність розрахунків, врахувати конструктивні особливості, нелінійні властивості матеріалів генератора вітроустановки, проводити імітаційні моделювання робочих, перехідних та динамічних процесів та інші.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є обґрунтування методів регулювання вихідної потужності генераторного обладнання безмультимілікаційної автономної вітроелектроустановки шляхом математичного та імітаційного моделювання за змінної частоти обертання ротора вітроустановки. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- провести аналіз існуючих методів та засобів корекції вихідних параметрів автономних вітроелектричних систем;
- визначити вплив аеродинамічних характеристик ротора малопотужної вітроустановки на агрегування з її електрогенераторним обладнанням;
- розробити математичну модель генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора;
- розробити математичну модель генератора вітроелектроустановки з двостороннім розташуванням магнітів ротора;
- провести порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру;
- провести порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру;
- провести експериментальні дослідження генератора автономної безмультимілікаційної вітроустановки.

**Об'єкт дослідження** – процес узгодження аеродинамічних властивостей ротора вітротурбіни з електромагнітними показниками автономної безмультимілікаційної вітроустановки малої потужності на базі магнітоелектричного генератора з аксіальним магнітним потоком.

**Предмет дослідження** – методи регулювання вихідної потужності генераторного обладнання безмультимілікаційної автономної вітроелектроустановки за випадкової зміни швидкості вітру.

**Методи дослідження.** Вирішення поставлених у роботі задач здійснювалося з використанням: загальної теорії вітроелектричних установок, методів математичного моделювання, в основі яких лежить чисельне розв’язання нелінійних диференційних рівнянь для оцінки способів корекції вихідної потужності, методи теорії планування експерименту та фізичного моделювання при експериментальних дослідженнях, відомі методики розрахунку магнітоелектричних генераторів при розрахунку вихідних параметрів електрогенератора, метод скінченних елементів при розрахунку електромагнітного поля генератора та потокозчеплення.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Отримав подальший розвиток метод порівняльного аналізу аеродинамічних характеристик роторів вітроустановок шляхом урахування раціонального взаємовпливу коефіцієнта використання енергії вітру і модуля швидкохідності, що дозволив провести узгодження аеродинамічних характеристик ротора вітроустановки з механічною характеристикою електрогенератора та встановлювати межі корекції моменту і потужності за різних значень швидкості вітру.

2. Уточнена математична модель безмультиплікаційної вітроелектроустановки з магнітоелектричним генератором з одностороннім та двостороннім розташуванням магнітів ротора, яка, на відміну від відомої, враховує наявність впливу параметрів подвійного статора та додаткової обмотки для підмагнічування магнітної системи, що дозволило визначити межі корегування вихідної потужності генератора.

3. Обґрунтовано шляхом структурного імітаційного моделювання та експериментально підтверджено характер впливу корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора з аксіальним магнітним потоком за допомогою введення статичних конденсаторів та додаткового збудження статора генератора, що дозволило провести оцінку величини корегування вихідної потужності за випадкової зміни швидкості вітру.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблено методику побудови імітаційної моделі генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора;

- розроблено методику побудови імітаційної моделі генератора вітроелектроустановки з двостороннім розташуванням магнітів ротора;
- розроблено алгоритм визначення ємності додаткових конденсаторів для корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора з аксиальним магнітним потоком безмультиплікаційної вітроустановки;
- розроблено методику експериментального дослідження безмультиплікаційної вітроелектроустановки у складі з магнітоелектричними генераторами з аксіальним магнітним потоком для проведення досліджень ефективності корекції вихідної потужності у вигляді структурних алгоритмів;
- наукові та практичні результати дисертаційної роботи передано для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова ННІ енергетики, автоматики і енергозабезпечення Національного університету біоресурсів та природокористування України, на кафедру відновлюваних джерел енергії факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при виконанні НДР «Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання відновлюваних джерел енергії» та до Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи отримані автором самостійно. Безпосередньо дисертантом здійснено:

- за результатами літературно-патентного пошуку за темою дисертаційного дослідження проведено аналіз існуючих сучасних методів, способів та засобів для корекції вихідних параметрів вітроустановок. Проведено аналіз типів електрогенераторів, що використовуються у вітроустановках із мультиплікаторами та без них;
- обґрунтовано вибір електрогенератора для роботи у складі безмультиплікаційної вітроелектроустановки;

- розроблено методичні положення до розробки генератора для безмультиплікаційної вітроелектроустановки;
- досліджено вплив аеродинамічних характеристик профілю лопаті на енергетичні характеристики ротора вітротурбіни;
- розроблено числову імітаційну математичну модель бузмультиплікаторної вітроелектроустановки у складі з магнітоелектричним генератором з одностороннім та двостороннім розташуванням магнітів ротора;
- проведено аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру;
- участь у проведенні експериментальних досліджень, їх обробці та аналізі.

Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, спільно з якими проведені дослідження, а саме: Чумак В.В., Монахов Є.А., Коханевич В.П., Баженов В.А., Головка В.М., Тимошук О.Л., Пономарьов О.І., Коваленко М.А., Цивінський С.С., Ткачук І.В., Шихайлов М.О., Ципленков Д.В.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

Постановка мети та завдань проведені разом з науковим керівником. Наукові та практичні результати, які висвітлено у дисертаційній роботі, отримано здобувачем особисто під керівництвом професора кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, д.т.н. Головка В.М.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота безпосередньо пов'язана із науковою тематикою, яка виконувалась на кафедрі нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського. Результати роботи використані при виконанні дослідних робіт ІВЕ НАН України за темою «Розроблення математичних моделей прогнозу та оптимізації процесів перетворення енергії вітру в енергетичних системах (Державний реєстраційний

номер: 0119U001599) та передані для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова ННІ енергетики, автоматики і енергозабезпечення Національного університету біоресурсів та природокористування України.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: XXI міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті (Київ, 2019 р.); XXII міжнародній науково-практичній онлайн-конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м. Київ, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 р. р.);

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано у 23 друкованих працях, з них 13 – у наукових фахових виданнях, що входять до переліку ДАК України, з них 3 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, належать до третього квартилю (Q3), 10 тез доповідей на науково-практичних конференціях із публікацією результатів доповідей.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 150 сторінках машинописного тексту, складається із анотації, вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 120 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 74 рисунками та 7 таблицями. Список використаних джерел містить 119 найменувань, з них 34 кирилицею та 85 латиницею.



## **РОЗДІЛ 1**

### **СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ**

#### **1.1 Загальний стан вітроенергетики**

У зв'язку із виснаженням запасу традиційних джерел енергії, все більшого розвитку набувають енергоустановки з використанням нетрадиційних відновлюваних джерел енергії, значне місце серед яких займають вітроелектричні установки.

Принцип дії ВЕУ заснований на перетворенні енергії вітрового потоку за допомогою обертання ротора з лопатями в момент на валу генератора і в електричну енергію. Загалом, електромеханічна система складається з ротора, мультиплікатора, що узгоджує частоту обертання ротора вітротурбіни та генератора, перетворювача, який забезпечує узгодження параметрів електрогенератора з вимогами електросистеми споживача. Конструктивно розрізняють ВЕУ з горизонтальною та вертикальною осями обертання ротора вітротурбіни. В даний час для вироблення електроенергії в промислових умовах найбільшого поширення набули ВЕУ з горизонтальною віссю обертання ротора вітротурбіни [17, 21, 22, 27, 95, 97].

Структура, конструктивні та схемні особливості електромеханічних систем ВЕУ залежать від її потужності, конструктивно-допустимої швидкості вітру, висоти розташування осі ротора вітротурбіни, дальності розташування точки приєднання до енергосистеми або споживача.

Потужність ВЕУ залежить від розмірів (діаметра) лопатей ротора вітротурбіни, допустимої швидкості вітру та висоти установки, які визначають площу, рівномірність та кінетичну енергію вітрового потоку [76, 80, 98, 103].

Залежно від призначення та потужності, ВЕУ можуть працювати з постійною частотою обертання та змінною (ефективне використання кінетичної енергії вітрового потоку).

Провідними виробниками ВЕУ є Данія (Vestas), Німеччина (Enercon, Nordex, Siemens та ін.), США (GE), Іспанія (Gamesa, Ecotecnica), Японія (Mitsubishi) та ін [5, 14, 20, 21, 65, 108 ].

Різноманітність фірм, що випускають, викликає і різноманіття схем перетворення механічної енергії в електричну. До генераторів вітроустановок, які працюють у складі глобальних енергетичних систем, висуваються надзвичайно високі вимоги, дотримання яких контролюється міжнародними організаціями, такими як UCTE (Union for Coordination of Transmission of Electricity). Мережа UCTE представляє інтереси операторів магістральних систем електропередач у 20 європейських країнах, її основне завдання – безпечне функціонування об'єднаних енергосистем. Щорічне споживання електроенергії у мережах UCTE становить близько 2100 ТВт.год. Даною організацією вироблено вимоги до режимів роботи генераторів вітроустановок, і з 1 січня 2002 р. жодна ВЕУ, яка не відповідає цим вимогам, не може бути приєднана до мережі [27, 86].

Немає спеціальних стандартів, які регламентують вимоги до конструкції ВЕУ. При розробці перетворювачів генераторів вітроустановок зазвичай застосовуються принципи та вимоги, що використовуються в транспортних застосуваннях як найбільш складних.

При побудові сучасної ВЕУ використовуються новітні технології та останні досягнення механіки, електроніки, аеродинаміки. Відповідно до європейських стандартів до енергосистеми не може бути приєднаний генератор потужністю менше 1 МВт, а зниження вартості 1 кВт/год вітроенергії бажано, щоб потужність одиначної ВЕУ становила 5...10 МВт. Особливо це справедливо до найбільш популярних зараз офшорних (встановлених у морі) вітроелектростанцій, у яких вартість інфраструктури може перевищувати витрати на встановлення, монтаж та обслуговування. Для таких станцій можливості стандартних технологій практично вичерпані.

Генератори безмультиплікаторних установок з постійними магнітами, використання яких найбільш виправдано при низьких швидкостях обертання, мають простішу конструкцію і дозволяють отримати більшу потужність. Правда, на відміну від останніх, їхня робота неможлива без перетворювача відповідної потужності, і відносно висока вартість обмежує широке застосування машин такого типу.

Використання у вітроустановках з напругою до 1 кВ (LV напругою менше 1 кВ) генераторів змінної частоти стає проблематичним при струмах кілька кілоампер, а вартість 1 кВт·год енергії при цьому починає перевищувати допустимі межі.

Тому важливим моментом є побудова систем, що забезпечують максимальну віддачу електроенергії до споживача, а також підтримання необхідних параметрів системи: струму, напруги, потужності [13, 35, 38, 40, 67, 106].

Аналіз розвитку зарубіжної вітроенергетики показує, що класичні схеми ВЕУ зі змінними оборотами ротора вітротурбіни з мультиплікатором або тихохідним багатополюсним синхронним генератором в комплекті з перетворювачем і системою управління, має досить складну структуру перетворення механічної енергії вітру в електричну, що призводить до збільшення додаткових експлуатаційних витрат.

## **1.2 Безмультиплікаційні вітроелектричні установки**

Розроблено та побудовано різні концепції вітроустановок з метою максимізації використання енергії, мінімізації витрат та покращення якості електроенергії протягом останніх двох десятиліть [13, 14, 21, 33, 97, 113]. Такі концепції турбін можна класифікувати з погляду на швидкість обертання, регулювання потужності та типу генератора. При розгляді конструкції генераторної системи вітрової установки вони класифікуються на системи прямого приводу та редукторні. Орієнтуючись на тип генератора, система генератора класифікується на машини з електромагнітним збудженням і машини з постійними магнітами.

В той час, як інноваційні та високотехнологічні технології розвиваються конкуруючими підприємствами, науковими колективами чи групами одночасно розробляються кілька технологічних варіантів виконання. Наприклад, розроблялися перші вітроустановки, вітряні турбіни з горизонтальною віссю та з вертикальною віссю (це тривало близько десяти років) до тих пір, поки з горизонтальною віссю не стала домінуючою конструкцією. Процес, в якому розробляються більше одного варіанта і, зрештою, один із них виграс, називається «битва технологій», «боротьба за домінуючий дизайн» або «ринкова стандартизація». Одночасна розробка кількох варіантів неминуча, оскільки кілька компаній можуть одночасно працювати над конкуруючими технологіями. Це вартує додаткового часу та грошей.

Наукові групи, що досліджували та розробляли варіант, що не став передовим, починають роботу над іншими проектами або просувають свій варіант. Це передбачає так зване «перемикання», що веде за собою додаткові витрати. І політики, які субсидують розвиток сталого розвитку технології можуть виявити, що вони субсидували «неправильний варіант». Тому важливо на ранній стадії мати уявлення про те, який із конкуруючих варіантів, швидше за все, стануть домінуючими проектами та технологіями. Матеріал даного підрозділу зосереджений на порівнянні вітроагрегатів і з мультиплікатором та вітроагрегатів з прямим або безмультиплікаційним приводом.

Вітрова енергетика є перспективною технологією для видобутку та використання електроенергії, яка стрімко розвивається і швидко поширюється. Загальна кількість електроенергії, вироблена вітровими станціями в Європейському Союзі зросла в одинадцять разів за останні 15 років, з 13 ГВт у 2005 році до 153 ГВт у 2016 році. Загалом у 2017 році 11,6% від виробленої енергії в ЄС надходило з енергії вітру [21, 93, 97]. Тому частка потужності вітру постійно зростає і, швидше за все, буде зростати у майбутньому. В основному використовується два типи виконання приводів вітроустановок:

- із мультиплікатором (редуктором або коробкою передач);
- безмультиплікаторні (безредукторні чи із прямим приводом).

Мультиплікаційна вітроустановка має мультиплікатор між ротором і генератором. Це збільшує швидкість обертання до такої величини, щоб вона була близькою або рівною номінальній швидкості обертання ротора електрогенератора. Перші мультиплікаторні вітроагрегати стали доступними для споживачів та промисловості в 1970-х роках [46, 73, 81, 94, 104] і часто оснащувалися асинхронним короткозамкненим генератором і багатокаскадною коробкою передач. З 1990-х років більшість генераторів вітроустановок перейшли на багатоступеневу вітроустановку зі змінною швидкістю коробки передач [83, 88, 110]. В такому конструктивному варіанті виконання коробка передач приєднана до традиційного асинхронного генератора з подвійним живленням.

З 1991 року виробниками вітроустановок активно розробляються вітрові безмультиплікаторні турбіни. Цей тип вітрової турбіни відомий як вітроустановка з прямим приводом із змінною швидкістю. Головною перевагою, на початковому етапі розробки таких систем, було підвищення надійності системи та збільшення ККД за рахунок усунення втрат в мультиплікаторі та відсутності її поломок. В такій конструкції ротор вітротурбіни безпосередньо приєднаний до генератора, при цьому швидкість генератора дорівнює швидкості ротора. Завдяки відносно низькій швидкості обертання генератора, генератор потребує більшої кількості магнітних полюсів для досягнення достатньо високої вихідної частоти. Вітроустановки із прямим приводом містять два типи виконання електрогенераторів:

- генератори із постійними магнітами;
- генератори із електромагнітним збудженням.

У 1990-х роках безмультиплікаторні установки у складі з генераторами із електромагнітним збудженням використовувався досить часто, оскільки постійні магніти були дорогими та мали досить низьку питому потужність. Пізніше, коли ціни на постійні магніти впали, вони стали більш популярними. Однак у 2011 р. під час підвищення вартості постійних магнітів, інтерес до генераторів із електромагнітним збудженням знову зріс. В даний час обидва варіанти виконання успішно використовуються в промисловості та побуті.

У 2011 році функціонувало близько 83% мультиплікаторних вітрових установок [76, 99, 83], тоді як частка безмультиплікаторних вітрових установок становила близько 17%. Кілька вчених [21, 39, 47, 72] описали тенденції розвитку трансмісії вітроустановок і зробили висновок, що невідомо, до якої з цих технологій будуть спрямовані домінуючі розробки в найближчому майбутньому.

Безмультиплікаторні вітроустановки мають ряд принципових переваг перед мультиплікаторними системами [56, 57, 83]:

- робота при різній швидкості обертання;
- низька початкова швидкість, що дозволяє роботу при низьких швидкостях вітру;
- високий коефіцієнт потужності системи;
- вище значення ККД.

Розглянемо більш детально типи безмультиплікаційних вітроустановок.

Відомо, що 3000 об/хв – це швидкість обертання ротора дво полюсного трифазного генератора, 1500 об/хв – це швидкість обертання ротора чотири полюсного трифазного генератора змінного струму, однак швидкість ротора вітрової турбіни завжди низька, вітроустановка малої потужності має швидкість обертання кілька сотень об/хв. Кілька десятків обертів на хвилину характерні для вітроустановок середньої та високої (МВт) потужності, яким потрібен мультиплікатор, що збільшує швидкість, щоб привести швидкість генератора до номінальної.

Турбіна вітроустановки горизонтального типу з мультиплікатором зменшує ефективність вітроустановки за рахунок коробки передач, оскільки є швидкозношуваним обладнанням, особливо для високошвидкісної коробки передач. Також, обслуговування коробки передач ускладнено в корпусі вітрової турбіни, а регулярна заміна її є дуже дорогою процедурою.

За останні роки технологія вітроустановок розвивається від малої потужності до великої. На сьогоднішній день розроблено вітроустановку з прямим приводом на основі генератора із постійними магнітами потужністю 5 МВт.[30, 78, 95, 112]

Рідкоземельні постійні магніти NdFeB широко використовуються в безмультиплікаторних системах з прямим приводом генератора. Генератор прямого приводу на основі постійних магнітів має просту конструкцію та високий ККД.

Конструкція генератора вітроустановки з прямим приводом та з генератором із зовнішнім статором та постійними магнітами схожа на звичайний трифазний генератор. На зовнішній стороні статора розташований ротор, що складається з кількох постійних магнітів, закріплених на внутрішній поверхні зовнішнього магнітного ярма.

Для вітроустановки з прямим приводом на базі генератора із постійними магнітами існують конструкції з генератором з аксіальним магнітним потоком. Конструкція генератора може складатись з декількох аксіальних статорів та роторів, розділених аксіальним повітряним проміжком.

**Вітроагрегати із мультиплікаторами.** За останні кілька десятиліть у технології вітроустановок відбулися зміни, що призвели до появи вітрових турбін із змінною швидкістю та мультиплікатором. Цей тип турбіни має мультиплікатор між низькошвидкісним ротором і високошвидкісним електричним генератором (зазвичай це відносно стандартний асинхронний генератор з подвійним живленням). Мета мультиплікатора полягає в тому, щоб збільшити швидкість обертання вихідного валу. Наприклад, для виробництва електроенергії у вітроустановці потужністю 1 МВт мультиплікатор збільшує вхідну швидкість обертання з 15-20 обертів на хвилину до приблизно 1800 обертів на хвилину (рис. 1.1).

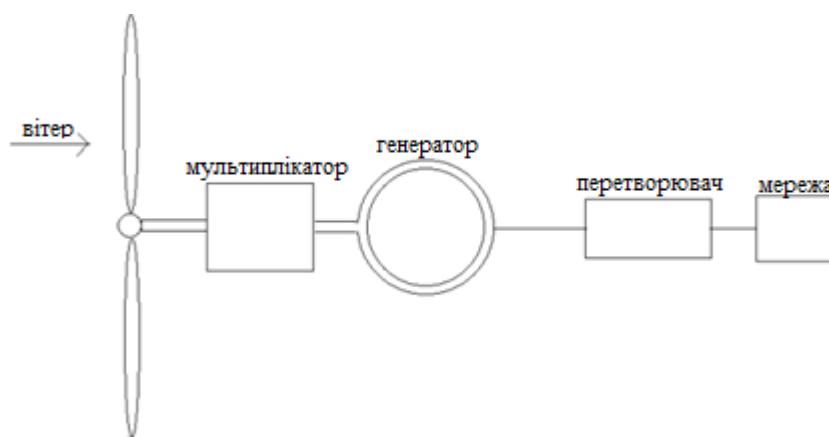


Рис. 1.1 Схема вітроелектричної установки з мультиплікатором

Цей тип вітроустановки ускладнює технічне завдання для проектувальників через навантаження та умови навколишнього середовища, до яких чутливий мультиплікатор. Потужність генерується через крутний момент від ротора, однак великі моменти та сили також прикладаються ротором до приводу вітроустановки. Щоб запобігти концентрації зусиль та збоєм, конструктори повинні налаштувати коробку передач, щоб витримувати навантаження та перевантаження. Ущільнення та системи змащування повинні стабільно працювати при значних коливаннях температури, інакше бруд і волога можуть накопичуватися всередині коробки передач.

**Вітроелектричні установки із прямим приводом.** Щоб уникнути поломок коробки передач і втрат потужності у трансмісії, виробники розробили вітрові турбіни без коробки передач. Цей тип вітрової турбіни став відомим у 1991 році та відомий як вітрова турбіна з прямим приводом із змінною швидкістю. Як показано на рис. 1.2, синхронний генератор має прямий привід від ротора. Швидкість генератора вітроустановки з прямим приводом еквівалентна швидкості ротора, оскільки ротор приєднаний безпосередньо до генератора. Оскільки швидкість обертання генератора низька, в генераторі розміщується кілька магнітних полюсів, щоб досягти відповідної високої вихідної частоти.

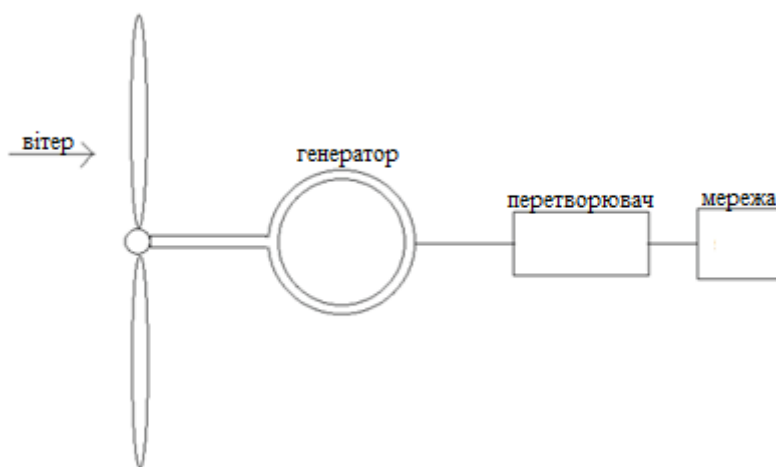


Рис. 1.2 Структура безмультиплікаційної вітроелектричної установки



Генератори із постійними магнітами зазвичай використовуються в невеликих вітроустановках, але також можуть використовуватися у системах на велику потужність.

Вітрові установки з прямим приводом потужністю до 7-10 МВт потребують значно більших і важчих генераторів. У цьому випадку краще використовувати одно- чи двоступеневу коробку передач, оскільки така система набагато менша, легша та забезпечує ті самі переваги, що й генератор із прямим приводом. Для видобутку електроенергії на низькій швидкості обертання, потрібно розробити генератори спеціального типу. Оскільки традиційні генератори мають циліндричну форму, синхронні генератори з постійними магнітами краще підходять для прямого приводу завдяки своїй конфігурації. Однак для досягнення необхідних високих крутних моментів та потужностей необхідно збільшити швидкість обертання такого ротора. Це призводить до збільшення габаритів (діаметру) самого генератора.

Перевагою безмультиплікаторних вітроустановок є високий ККД синхронних генераторів із постійними магнітами. Важливим фактом є те, що через непостійність вітру турбіни часто працюють при часткових навантаженнях. Генератор із постійними магнітами працює більш ефективно навіть у цих умовах, оскільки він продовжує працювати майже на номінальних значеннях швидкості обертання. Також, такими генераторами простіше керувати, сюди додається кілька переваг у розширених функціях керування, які забезпечують користувачам високу ефективність перетворення енергії, тиху роботу, надійність і доступність. Оскільки вітроустановки з прямим приводом не мають коробки передач, механічний шум зменшується, зменшення кількості обертових компонентів призводить до підвищення надійності та зниження вартості. Крім того, цей тип вітроустановки має єдиний корінний підшипник для вузла ротора та генератора, що додатково зменшує кількість рухомих частин, а також витрати на обслуговування та ремонт.

*Мультиплікаторні та безмультиплікаторні установки.* Що стосується вітроустановок з коробкою передач, турбулентність вітру може спричинити величезне навантаження на ротор вітротурбіни та підшипники в коробці передач, що, у свою чергу, може призвести до дефектів компонентів турбіни та, зрештою, до

зупинки механізму. Чим сильніший вітер, тим більш уразливі коробки передач. Мультиплікатор є частиною турбіни, яка потребує частого технічного обслуговування; отже, видалення коробки передач підвищує надійність вітроустановки. Коробка передач також є найважчим елементом у турбіні за масою, тому її відсутність також покращує надійність турбіни.

Виробники роками досліджували, як підвищити конкурентоспроможність турбін із прямим приводом порівняно з турбінами з коробкою передач [53, 96, 116]. Ось чому технологія першого покращилася як з точки зору складності, так і з точки зору обслуговування, що робить турбіни з прямим приводом практичними для вітрових установок. Однак недоліками генераторів вітроустановок із прямим приводом є вартість і маса турбін із прямим приводом. Ці недоліки донедавна не дозволяли їм становити серйозну конкуренцію турбінам із коробкою передач [31, 102, 109, 117].

Розвиток постійних магнітів і конструкцій генератора призвів до зменшення їх ціни, та зменшення їх маси. Ціна на постійні магніти, які використовуються в турбінах з прямим приводом, також значно впала, підвищивши популярність турбін з прямим приводом. З іншого боку, на ринку зараз доступні та використовуються тисячі турбін з коробкою передач, а це означає, що це тип турбіни не може раптово зникнути. Через це виробники вітроустановок продовжують розвивати технологію коробки передач, щоб зменшити простоту та підвищити її надійність. Як наслідок, системи перетворення механічної енергії вітру в електричну вітроустановок тепер легші та потребують менше затрат міді.

Факторами, що впливають на ефективність технології та визначають, який тип турбіни стане домінуючим на ринку, є:

- репутація бренду виробника та надійність;
- технологічні характеристики: загальна ефективність виходу енергії, вартість та надійність;
- ціна (кінцева ціна продукту, вартість обслуговування та технічного обслуговування);

- наявність дефіцитних матеріалів (наприклад, магнітів, які використовуються для генераторів з прямим приводом);
- гарантія виробника;
- кількість постачальників компонентів.

Найважливішими факторами для вибору відповідних вітроустановок є вартість і надійність технології. Вартість енергії є ключовим фактором, який впливає на стратегічне рішення щодо будівництва нових ВЕС. В ідеалі ціна повинна залишатися фіксованою протягом встановленого періоду, що дозволить перевірити технологію, яка забезпечує найнижчу вартість енергії, маючи перевагу над конкурентами. Другим важливим фактором є надійність вітроустановок. Вітроустановки повинні працювати в різних місцях, від легкодоступних полів до віддалених морських або гірських місць. Ремонт і позапланове технічне обслуговування внаслідок низької надійності можуть бути надзвичайно дорогими та тривалими. Такі технології, як розумний онлайн-моніторинг, можуть підвищити загальну надійність [37, 58].

Думки експертів ставлять обидві технології пліч-о-пліч. Це можна зробити одним із двох способів: або обидві технології продовжуватимуть розвиватися, поки одна не переможе, або обидва типи знайдуть достатньо користувачів для співіснування на ринку.

Інші експерти стверджують, що технологія безмультиплікаторного приводу з часом стане домінуючою. Стверджуючи це, вони наводять три аргументи:

- витрати на морську опорну конструкцію для вітроустановок з прямим приводом нижчі через її меншу масу;
- прямий привід має більше можливостей для подальшого вдосконалення. Експерти стверджують, що вітроустановка з мультиплікатором майже досягла максимальної ефективності, тоді як турбіни з прямим приводом мають більше можливостей для вдосконалення;
- прямий привід є більш ефективним, оскільки вітроустановки з мультиплікатором вимагають додаткових ступенів передач, що призводить до збільшення втрат у коробці передач.

Зрештою, технологія систем з мультиплікатором не зникне найближчим часом. Однак задіяні обертові частини повинні підвищити ефективність і ККД, оскільки витрати на технологію прямого приводу знижуються. Крім того, це також змусить технологію коробки передач підвищити її надійність. Існує також можливість для гібридної конструкції, що поєднує в собі елементи коробки передач і конструкції з прямим приводом.

### **1.3 Способи стабілізації вихідних параметрів вітроелектроустановок**

Стабільність вітроелектричної системи визначається її здатністю повертатися до нормальної роботи після фізичного збою. На стабільність системи може впливати кілька факторів, таких як збільшення кількості взаємозв'язків; використання нових технологій; транспортування великої кількості енергії на великі відстані; збільшення попиту на електроенергію в місцях із високим навантаженням; недоцільність або економічність встановлення нових електростанцій; та використання нових моделей навантаження внаслідок звільнення ринку електроенергії. В умовах нестабільності напруги та частоти стабільність енергосистеми може бути порушена.

Отже, нестабільність напруги та частоти стає основною темою досліджень у галузі електротехніки та систем управління потужністю через різні фактори нестабільності, які відбуваються у навколишньому середовищі та світі [41, 47, 70].

Для вітроустановки із фіксованою швидкістю обертання погіршення стабільності напруги відбувається головним чином через надлишок реактивної потужності, споживаної електрогенератором вітрової турбіни під час їх роботи, а також через несподівані збої. Існуючі вітроустановки поведуться по-різному залежно від типу генератора, коли піддаються збоям і збуренням. Асинхронні генератори споживають реактивну енергію, що призводить до нестабільності напруги локальної мережі [37, 111]. Вітроустановки зі змінною швидкістю все частіше використовуються через їх здатність брати участь у управлінні напругою мережі [99, 118]. Вітроустановки з асинхронними генераторами можуть споживати або генерувати реактивну потужність, і їх коефіцієнт потужності можна регулювати. Вплив потужності, виробленої вітровими електростанціями, на короткострокову та

довгострокову стабільність обговорюється в роботах [48, 120]. Результати показують, що стабільність напруги можна покращити за допомогою регулювання реактивної потужності. Вплив збільшення потужності вітру на стабільність частоти досліджено в роботах [42, 60]. В даних роботах авторами пропонується додатковий контур керування на основі синхронного генератора.

Стабільність напруги визначається як здатність системи підтримувати постійну напругу на всіх шинах у всій системі та забезпечувати підтримку або відновлення балансу між генерацією та попитом у прийнятних межах. Нестабільність може призвести до падіння або поступового підвищення напруги. Основною причиною нестабільності напруги є раптова втрата навантаження в зоні та відключення пристроїв за допомогою систем захисту, що може призвести до каскаду збоїв і відмов. Ці катастрофічні каскадні збої можуть призвести до втрати стабільності і падіння напруги, що спричиняє знеструмлення та збій виробництва. Падіння напруги часто спричинене простими або кількома малоймовірними аваріями.

Взагалі можливо виділити наступні основні параметри, які піддаються регулюванню в вітроелектричних установках:

- кут нахилу лопаті вітроагрегату при зміні швидкості та напрямку вітру;
- регулювання вихідної напруги генератора при зміні швидкості вітру;
- регулювання та стабілізація частоти при зміні швидкості вітру;
- регулювання вихідної потужності генератора

Детальний огляд технологій регулювання вихідних параметрів вітроустановки показує, що на сьогоднішній день практично відсутні методи та засоби для регулювання вихідної потужності генераторів із постійними магнітами.

Основними методами регулювання вихідних параметрів вітроелектричної установки є:

- регулювання куту нахилу лопаті вітроагрегату при зміні швидкості та напрямку вітру;
- навантаження генератора вітроагрегату реактивним навантаженням;
- підмагнічування генератора сторонньою (додатковою) ємністю;

- використання генераторів з електромагнітним збудженням;
- регулювання навантаження генератора за допомогою контролера (інвертора) акумуляторної батареї чи навантаження безпосередньо;
- використання спеціальних методів підмагнічування генератора: магнітоелектричні генератори з додатковою обмоткою, генератори з шунтуванням магнітного потоку і т.ін.

Існуючі методи регулювання куту нахилу лопаті вітроагрегату при зміні швидкості та напрямку вітру вимагають відповідної високої вартості системи регулювання та обладнання, що знижує надійність.

З іншого боку практично відсутні роботи, направлені на регулювання вихідною потужністю безмультіплікаційної вітроустановки з магнітоелектричним генератором з аксіальним магнітним потоком.

#### **1.4 Типи електромеханічних перетворювачів енергії, що використовуються у складі вітроелектроустановок**

Як показано у попередніх підрозділах потрібні більш прості, міцні та надійні генераторні системи з високою продуктивністю та низькою вартістю вітроустановки. Генератори з прямим приводом є актуальним з точки зору ефективності перетворення енергії, надійності та проблем з обслуговуванням. Генератори з прямим приводом працюють на низькій швидкості і їм потрібен високий крутний момент. Високий крутний момент вимагає високої тангенціальної сили і великого діаметру генератора. При збільшенні габаритів вітроустановки це проявляється більш сильно. Таким чином, генератор з прямим приводом є великим і важким. Існують різні думки про те, що найбільше підходить генераторна система серед існуючих технологій вітроустановок як концепції прямого приводу та генератора з мультіплікатором.

Порівняння генераторів для вітроустановок різної конструкції. Різні конструкції генераторів для вітроустановок, такі як прямий привід і привід з

мультиплікатором, наведені в роботах багатьох авторів [37, 67]. Переваги та недоліки концепції безмультиплікаторних систем узагальнено наступним чином:

Переваги:

- спрощена трансмісія за рахунок відсутності коробки передач;
- висока загальна надійність та сумарний ККД системи;
- низький рівень шуму системи.

Недоліки:

- значний зовнішній діаметр генератора, а відповідно і капсули вітроустановки;
- за рахунок великого діаметру велика маса;
- більш висока вартість за рахунок дороговизни генератора

На рис. 1.3 наведено порівняння різних типів генераторів для вітроустановок, що досліджено авторами в [15, 28, 49, 63, 71]. Критеріями порівняння є вихід енергії, вартість та маса.

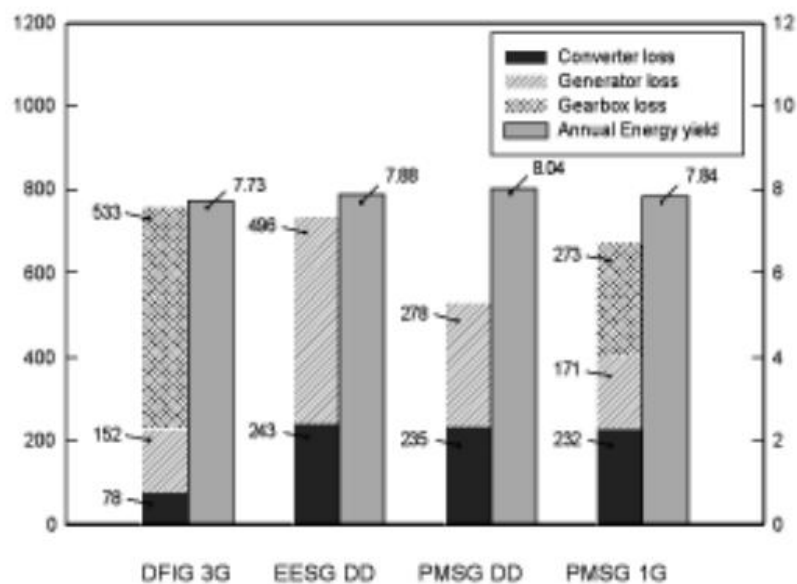


Рис. 1.3 Порівняння втрат та енергії генераторів різного типу [62]

Вартість розглянутих генераторів та вітроустановки в цілому показано на рис.

1.4.

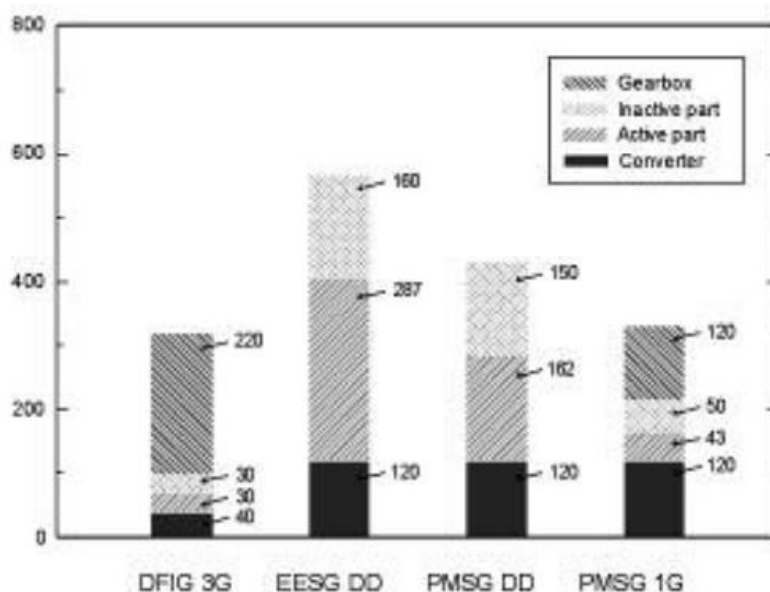


Рис. 1.4 Вартість генераторів різного типу [62]

Результати порівняння, що наведені в літературних джерелах [12, 17, 26, 76, 92] підсумовані таким чином:

- система на основі з асинхронним генератором з подвійним живленням і триступеневою коробкою передач (DFIG 3G) має найменшу масу і є недорогим технічним рішенням;
- з огляду на вихід енергії, генераторні системи з прямим приводом видаються кращими, ніж системи з редукторними генераторами;
- система на основі з синхронним генератором з постійними магнітами з прямим приводом (PMSG DD) є більш привабливою, ніж інші системи, з точки зору втрат і виходу енергії;
- система із синхронним генератором з постійними магнітами з одноступінчастим редуктором (PMSG 1G) має найвище співвідношення річного виходу енергії до вартості;
- вартість системи з синхронним генератором з постійними магнітами з прямим приводом на 32 % вища ніж вартість системи синхронного генератора з електромагнітним збудженням та прямим приводом (EESG DD) на 77 % вища, а вартість PMSG 1G на 4 % вища відповідно порівняно з DFIG 3G.



Якщо можливо зменшити вартість PMSG DD до вартості DFIG 3G або нижче, тоді PMSG DD може бути найбільш підходящою системою генератора. Тому зниження вартості генераторних систем з прямим приводом є актуальним питанням як для системи генератора, так і для механічної частини конструкції вітроустановки.

Концепція прямого приводу працює на низькій швидкості. Коли розміри вітроустановки збільшуються, швидкість обертання ще більше зменшується. Щоб збільшити потужність генератора  $P$  з прямим приводом, крутний момент  $T$  повинен змінитись відносно механічної кутової швидкості  $\omega_m$ :

$$P=T \cdot \omega_m \quad (1.1)$$

Крутний момент генератора  $T$  пропорційний тангенціальній силі  $F$  і діаметру повітряного проміжку  $D_g$ . Тангенціальна сила  $F$  може бути визначена як добуток щільності тангенціальної сили  $F_d$  і площі повітряного проміжку  $A_g$ . Таким чином, потужність генератора  $P$  також можна визначити як:

$$P=(\pi/2) \cdot F_d \cdot D_g^2 \cdot l_s \cdot \omega_m \quad (1.2)$$

де  $l_s$  – аксіальна довжина генератора.

Оскільки крутний момент пропорційний квадрату діаметра повітряного проміжку, генератор із прямим приводом має більший діаметр, щоб забезпечити вищий крутний момент. Збільшення діаметра повітряного проміжку призводить до збільшення кількості матеріалів для виготовлення генератора. Тому конструкція генератора з прямим приводом, що працює на низькій швидкості, має такі недоліки, як високий крутний момент, великий діаметр, велика маса та висока вартість.

На рис. 1.5(а) наведено механічну структуру генератора вітроустановки з прямим приводом, який був запропонований Спунером та ін. [12,17,84]. Пропонований генератор має пару спицевих коліс для перенесення ротора і статора повітряного проміжку обмотки машини з радіальним магнітним потоком. В роботі [69,76] проаналізовано, як велика кількість пар полюсів і радіус повітряного проміжку впливають на конструкцію великих низькошвидкісних генераторів з прямим приводом (див. рис. 1.5 (б) [86,89]. Показано та порівняно вихідний крутний момент із співвідношенням маси та структурної/активної частини різних генераторів.

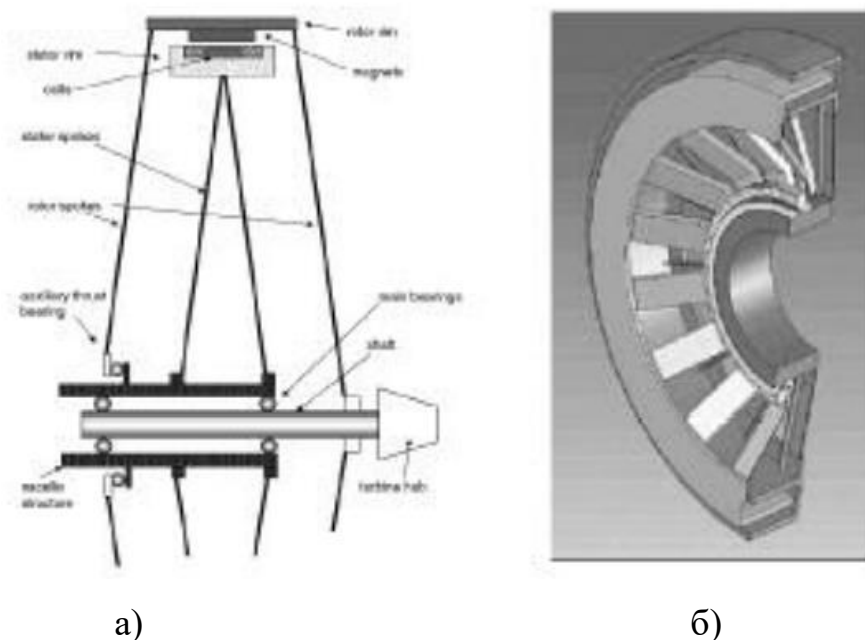


Рис 1.5 Конструкції для низькошвидкісних безмультіплікаторних приводів [27]

Порівняння генераторів з прямим приводом з різними рівнями потужності дає наступний підсумок:

- під час збільшення потужності установки загальна маса збільшується пропорційно крутному моменту;
- при збільшенні потужності установки неактивна становиться більш значною;
- машина радіального потоку в основному використовується у великих, потужних установках з прямим приводом.
- співвідношення  $m/T$  PMSG DD нижче, ніж EESG DD.
- для того, щоб знайти відповідний тип синхронного генератора із постійними магнітами для безмультіплікаторного приводу, необхідно провести дослідження різних типів генераторів з постійними магнітами, такі як генератор з радіальним магнітним потоком, машина з осьовим магнітним потоком і машина з поперечним потоком, що виходить за рамки даного дисертаційного дослідження.

Генератори із постійними магнітами мають такі позитивні сторони, як більш високе співвідношення потужності до маси, вище значення ККД, вищу надійність і вищу потужність, ніж генератори з електромагнітним збудженням. Тому генератори

із постійними магнітами обрані як перспективні машини для ВЕУ з прямим приводом. В роботах розглядаються особливості трьох різних генераторів із постійними магнітами, таких як генератори із радіальним магнітним потоком (ГРМП) [89,92], генератори з аксіальним магнітним потоком (ГАМП) [85,88] і генератори з поперечним магнітним потоком (ГППП) [91, 96], для того щоб знайти найбільш підходящий тип машини для вітроелектричних безмультіплікаційних систем з прямим приводом. Ці три типи генераторів із постійними магнітами належать до класу синхронних машин із постійними магнітами. Електричні машини складаються з активних матеріалів (частини) і неактивної частини (механічна структура). Активна частина синхронного генератора із постійними магнітами (PMSG) складається із залізного осердя, постійних магнітів і міді.

*Генератори з радіальним магнітним потоком (ГРМП).* У генераторів типу ГРМП магнітний потік утворюється в радіальному напрямку за допомогою радіально орієнтованих постійних магнітів. Більшість машин ГРМП мають звичайну конструкцію внутрішнього ротора, але деякі конструкції зовнішнього ротора також були наведені в літературі [4, 11, 75 ]. На рис. 1.6 зображено генератор з постійними магнітами, встановленими на поверхні, і лінійним перерізом двох полюсів. При використанні ПМ для генераторів з прямим приводом, генератори можуть працювати з хорошою та надійною продуктивністю в широкому діапазоні швидкостей. У виробництві найпростішим способом конструювання машини з великою кількістю полюсів є наклеювання ПМ на поверхню ротора.

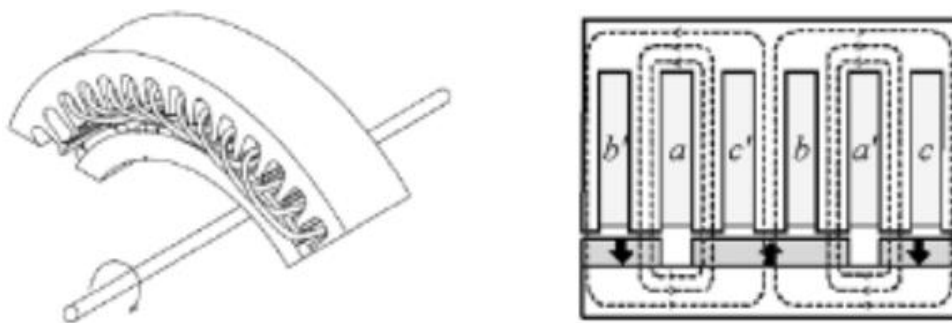


Рис. 1.6 Генератор із радіальним магнітним потоком [77]

Генератори з радіальним магнітним потоком конструктивно стабільні і широко використовуються [26, 30, 64, 77, 82, 96]. Більшість низькошвидкісних потужних генераторів вітроустановок на ринку базуються на генераторах з радіальним потоком. Таким чином, машини ГРМП є найцікавішим типом машин для потужних вітрових турбін з прямим приводом. Проте проведено багато роботи з оптимізації електромагнітної конструкції машин ГРМП. Тому важко значно зменшити масу активного матеріалу та вартість машин ГРМП. Це означає, що важко зменшити вартість PMSG DD до вартості DFIG 3G [55, 70, 89].

*Генератори з аксіальним магнітним потоком (ГАМП).* ГАМП – це генератор в якому магнітний потік утворюється в осьовому напрямку за допомогою постійних магнітів. ГАМП класифікуються на пазові та безпазові. На рис. 1.7 зображено пазову конструкцію ГАМП.

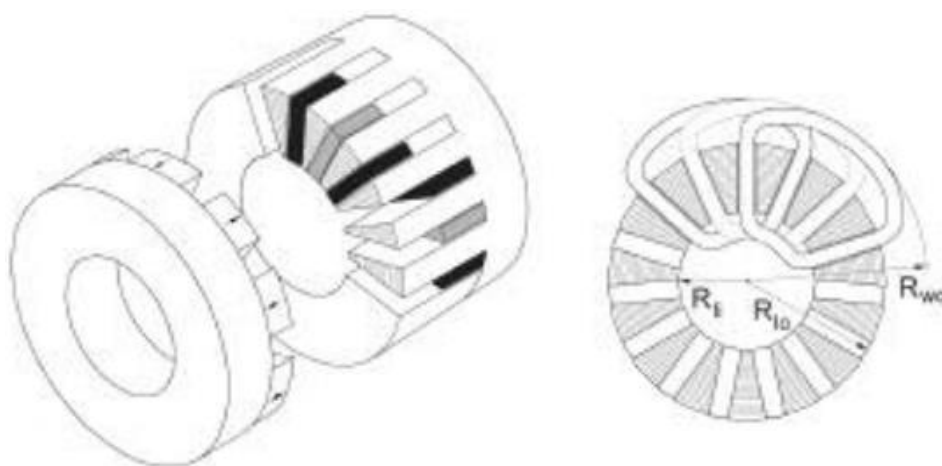


Рис. 1.7 Пазова конструкція ГАМП [100]

ГАМП має такі переваги порівняно з ГРМП:

- проста намотка (в безпазовій конструкції генератора);
- низькі коливання (пульсації) крутного моменту і шуму (в безпазовій конструкції генератора);
- коротка осьова довжина;
- вище співвідношення крутний момент/об'єм.

Однак також існують певні недоліки ГАМП порівняно з ГРМП [29, 85, 101]:

- нижче співвідношення крутний момент/маса;
- більший зовнішній діаметр і велика кількість ПМ (в безпазовій конструкції генератора);
- структурна нестабільність;
- важко підтримувати повітряний проміжок великого діаметру рівномірним (в пазовій конструкції генератора);
- складне виготовлення осердя статора (в пазовій конструкції генератора).

Щоб застосувати ГАМП у великих вітроустановках з прямим приводом, необхідно подолати ці недоліки, оскільки вони призводять до збільшення вартості та ускладнення виробництва. Навпаки, використання ГАМП в системах вітроустановок невеликої потужності є актуальним, оскільки при невеликій потужності дані недоліки нівелюються [4,11,29,37,52].

*Генератори з поперечним магнітним потоком (ГПМП).* Принцип поперечного магнітного потоку означає, що шлях магнітного потоку перпендикулярний до напрямку обертання ротора. Основна відмінність ГПМП порівняно з машинами ГРМП і ГАМП полягає в тому, що ГПМП дозволяє збільшити простір для обмоток без зменшення доступного об'єму для основного потоку. ГПМП також може бути виготовлений з дуже малим кроком полюсів порівняно з іншими типами. Ця особливість призводить до збільшення індукованої напруги [43, 50, 66]:

$$e_{\max} = N \cdot \phi_{\max} \cdot 2\pi \cdot f = N \cdot \phi_{\max} \cdot 2\pi \cdot (v_g / 2\tau_p) \quad (1.3)$$

де:  $N$  – кількість витків в обмотці якоря генератора;  $\phi_{\max}$  – величина магнітного потоку;  $f$  – частота;  $v_g$  – швидкість обертання;  $\tau_p$  – полюсна поділка.

На рис. 1.8 зображено ГПМП одностороннього типу з концентрацією магнітного потоку.



## **1.5 Електрогенератор для роботи у складі безмультіплікаційної вітроелектроустановки**

Досвід та розробки зарубіжних та вітчизняних вчених показав, що на даний момент найбільшу ефективність мають генератори вітроустановок, що виконані на базі постійних магнітів із рідкоземельних елементів(SmCo, NdFeB). Підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну можливо за рахунок вдосконалення конструкції існуючих типів електрогенераторів, використання нових технологій та матеріалів або розробки нових конструктивних рішень електрогенераторів [41, 48, 54, 76, 94].

Використання торцевого генератора модульної конструкції дозволяє підвищити питому потужність установки та покращити використання активних матеріалів генератора (електротехнічної сталі, постійних магнітів, обмотувального проводу).

Результати порівняння розрахунків наведених типів електрогенераторів торцевого типу у порівнянні з генераторами циліндричної конструкції дозволяють зробити наступні висновки:

- генератор торцевого типу має краще використання активної частини, що проявляється підвищенням значення індукованої ЕРС в обмотці якоря, покращеними питомими показниками, зокрема у випадку багатополюсного виконання;
- генератори торцевого типу мають більш високе значення переважувальної здібності та номінального моменту;
- генератори торцевого типу мають кращі умови для природнього охолодження;
- генератору торцевого типу характерні топологічні властивості для реалізації модульного виконання;
- має можливість надійного консольного закріплення із-за наявності невеликої осьової довжини.

## 1.6 Мета та завдання дослідження.

Метою роботи є обґрунтування корекційних методів регулювання вихідної потужності генераторного обладнання безмультиплікаційної автономної вітроелектроустановки шляхом математичного та імітаційного моделювання за змінної частоти обертання ротора вітротурбіни.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- провести аналіз існуючих методів та засобів корекції вихідних параметрів автономних вітроелектричних систем;
- визначити вплив аеродинамічних характеристик ротора малопотужної вітроустановки на агрегування з її електрогенераторним обладнанням;
- розробити математичну модель генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора;
- розробити математичну модель генератора вітроелектроустановки з двостороннім розташуванням магнітів ротора;
- провести порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру;
- провести порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру;
- провести експериментальні дослідження генератора автономної безмультиплікаційної вітроустановки.



## Висновки до розділу 1.

1. За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що безмультіплікаційні системи наразі складають  $\approx 20\%$  від загальної кількості вітрогенераторів на ринку агрегатів малої потужності. Вони успішно розвиваються і конкурують із редукторними системами, оскільки мають ряд принципових переваг, таких як простота конструкції, більш висока надійність та ефективність;
2. Предметом регулювання вітроелектричних установок є: вихідна напруга, вихідна частота та вихідна потужність. Розглянуто методи та засоби регулювання вихідних параметрів сучасних вітроустановок. Аналіз показав, що практично відсутні засоби для регулювання вихідної потужності безмультіплікаційних вітроелектричних установок у складі з магнітоелектричними генераторами з аксіальним магнітним потоком;
3. Розглянуто типи електромеханічних перетворювачів енергії, що використовуються в вітроустановках. Показано, що для безмультіплікаційних вітроелектричних установок малої потужності доцільно використовувати синхронні генератори з аксіальним магнітним потоком із збудженням від постійних магнітів.
4. Проведено порівняльний аналіз генератора торцевого типу з традиційним циліндричним генератором зі збудженням від постійних магнітів малої потужності. З огляду на переваги генератора торцевого типу, в роботі обрано за основу саме цей тип генератора.

## **РОЗДІЛ 2**

### **ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРА МАЛОПОТУЖНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ ПРИ АГРЕГАТУВАННІ ЇЇ З ГЕНЕРАТОРНИМ ОБЛАДНАННЯМ**

#### **2.1 Аналіз аеродинамічних характеристик профілів лопаті ротора**

Удосконалення конструкцій установок малої вітроенергетики вимагає постійного розвитку методів їх розрахунку. Головним вузлом, з якого починається розроблення вітроустановки і який визначає ефективність роботи вітроустановки (ВУ) в цілому є ротор, тому визначення його параметрів та характеристики складає одну з головних задач дослідження.

Роботи Жуковського М.Є, Бетца А., Юрьєва Б.М., та інших учених [5, 10, 18, 32] дозволили сформуванню теорії ротора, яка була адаптована та удосконалена Г.Х.Сабініним для роторів вітроустановок і розроблена цілісна методика розрахунку геометричних розмірів ротора та його аеромеханічних характеристик. За даними методиками вибір аеродинамічного профілю для лопаті проводиться довільно.

На сьогодні кількість видів аеродинамічних профілів оцінюється в межах декількох тисяч видів і кількість їх постійно зростає, що ускладнює на практиці їх вибір. Така ситуація викликає необхідність розроблення певних системних підходів для оцінювання та вибору необхідного аеродинамічного профілю.

Як правило, основними вимогами при виборі профілю є вимоги до аеродинаміки, а потім вже вимоги до міцності лопаті та конструктивні і технологічні особливості при проектуванні та виготовленні лопаті.

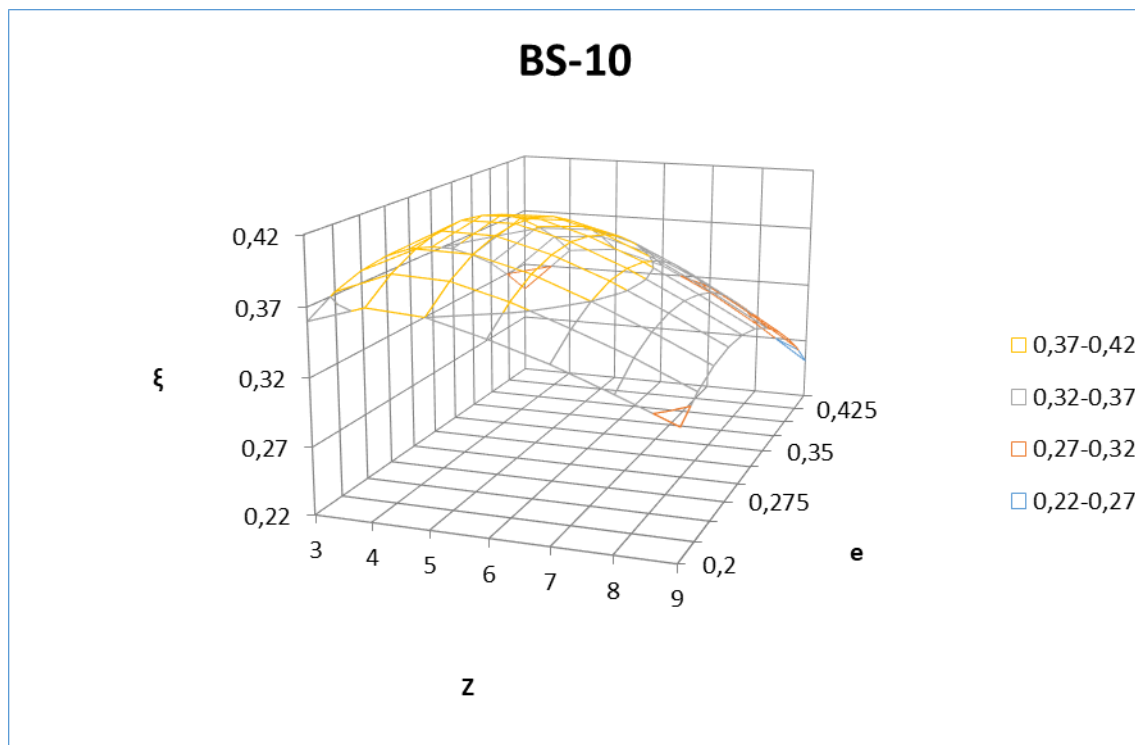
Задачам підвищення ефективності енергоперетворення присвячена низка публікацій [1, 2, 9, 10, 17, 58, 62, 68]. Однак в даних роботах не достатньо приділено увагу аналізу аеродинамічним характеристикам вітрових роторів з точки зору отримання максимальної потужності за умови змінної швидкості вітру. В роботі [9] наведено методичні положення визначення параметрів коефіцієнта потужності ( $\xi$ )

від швидкохідності ротора ( $z$ ), при якому досягається його максимальне значення, в залежності від виду профілю лопаті. Для максимально ефективного перетворення енергії вітру для споживачів необхідно провести аналіз аеродинамічних характеристик основних типів профілів, що використовуються для виробництва роторів вітроустановок в залежності від швидкості вітру.

Для проведення аналізу характеристик були обрані п'ять базових аеродинамічних профілів різного типу: А-6, BS-10, BS-10, GA(W)-1, р-11-18, згідно результатів попередніх досліджень [6, 8]. З урахуванням коефіцієнта оберненої якості всі профілі були поділені на дві групи:

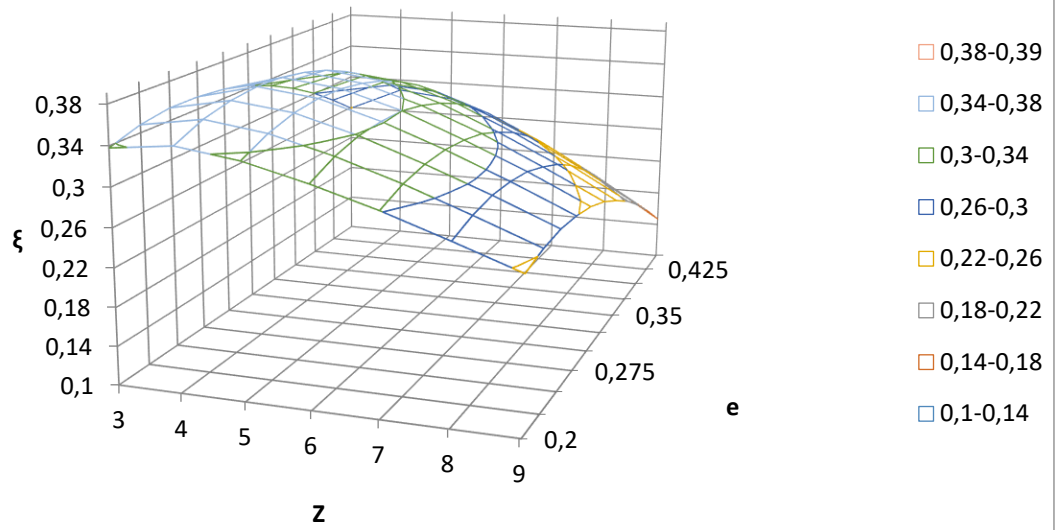
- 1 – традиційні профілі (Р-II);
- 2 – профілі серії GA(W) та ламінізовані профілі FX.

На рис.2.1 а, б, в, г, д наведені результати розрахунку залежності коефіцієнта потужності (коефіцієнта використання енергії вітру) від швидкохідності ротора та коефіцієнта гальмування повітряного потоку в його площині для різних видів профілю.



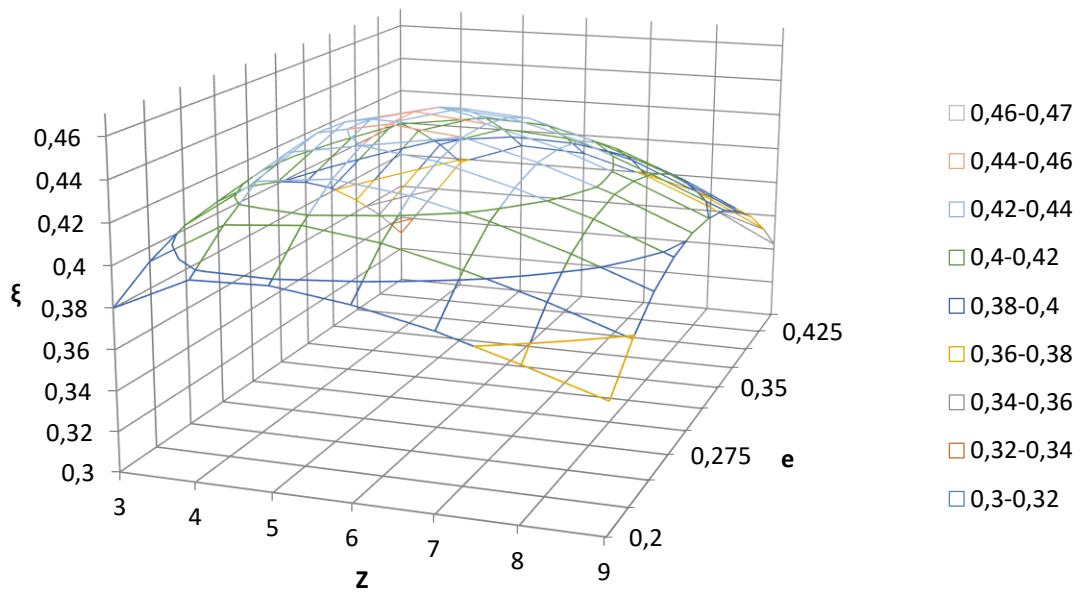
a)

### P-11-18



б)

### A-6



в)

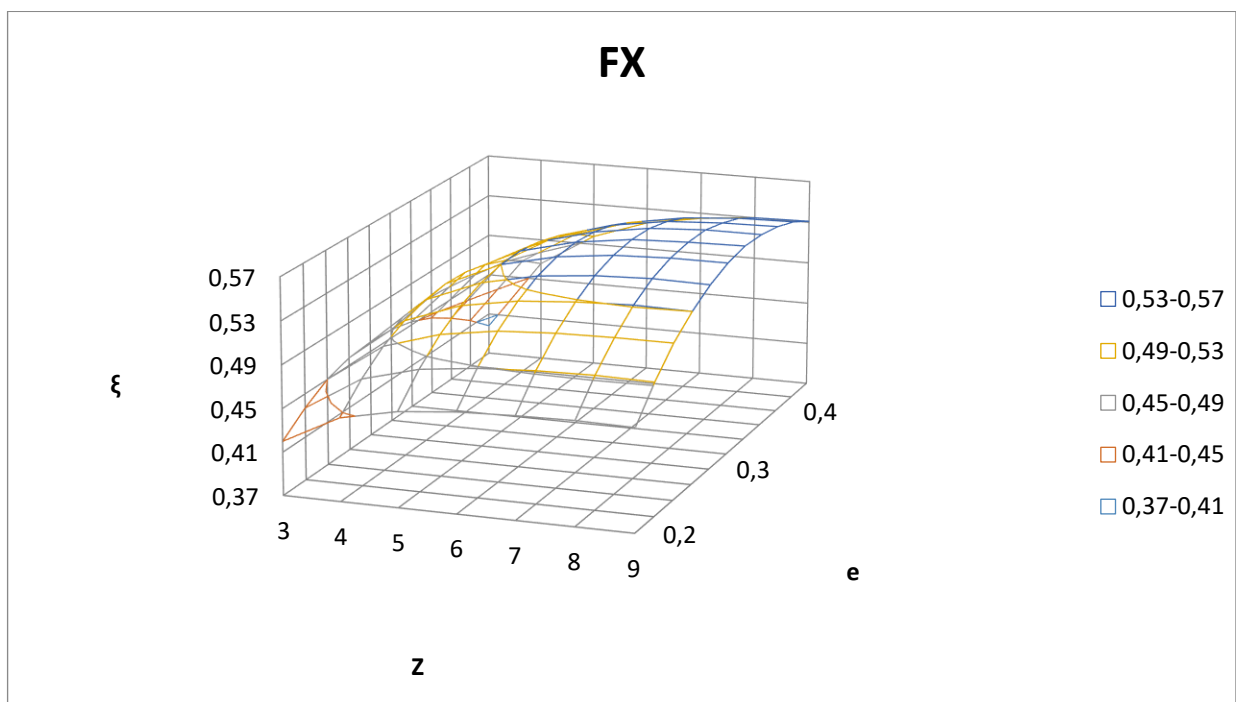
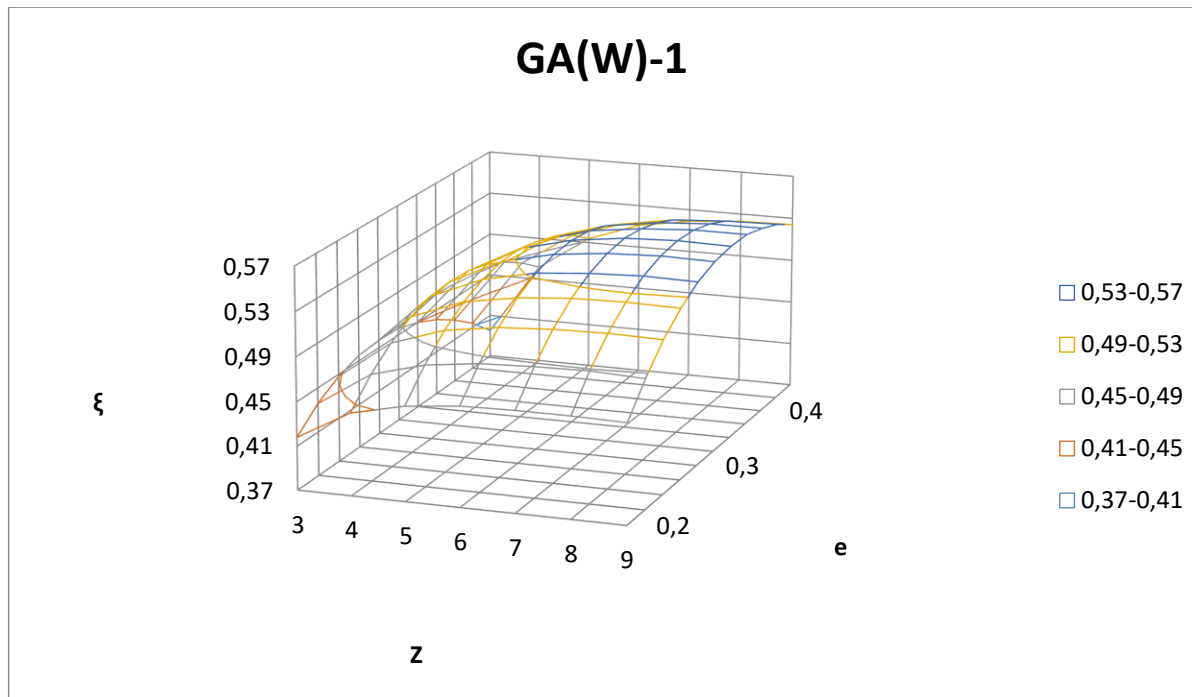


Рисунок 2.1 – Залежності коефіцієнта використання енергії вітру (коефіцієнта потужності) від швидкохідності ротора та коефіцієнта гальмування повітряного потоку в його площині для різних видів профілю.

Проведений аналіз показав, що профілі групи 1 дозволяють отримати  $\xi=0,36\dots0,4$  в діапазоні швидкохідностей  $Z=4\dots5$ , а профілі групи 2 дозволяють

отримати  $\xi=0,53...0,57$  в діапазоні швидкохідностей  $Z=6...11$ . При цьому профілі групи 2 в діапазоні швидкохідностей  $Z=5...6$  забезпечують коефіцієнт потужності  $\xi=0,49...0,53$ , що вище ніж в профілів групи 1 в даному діапазоні швидкохідності. [6, 8, 12].

Таким чином при виборі профілів для лопатей вітроелектричних установок малої потужності перевага повинна надаватись профілям серії GAW та серії FX, що забезпечують вищий коефіцієнт використання енергії вітру в порівнянні з традиційними профілями та дозволяє проектувати ротори ВЕУ з високою швидкохідністю, що, відповідно, дозволяє збільшувати оберти електрогенератора та зменшувати їх масогабаритні показники.

В залежності від типу обраного профілю можна отримати різні механічні та енергетичні характеристики ротора, зокрема залежність вихідної потужності від заданої швидкості вітру.

Потужність на валу вітроагрегата визначається за формулою :

$$N = 0.5 \rho k F v^3 \xi \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – густина повітря;

$v$  – швидкість незбуреного вітрового потоку;

$F$  – площа обмаху ротора (при розрахунках приймається  $1 \text{ м}^2$ ).

В попередніх дослідженнях [4, 6, 8] була задана швидкохідність ротора ( $z$ ) в межах  $z=3...9$  та обчислено коефіцієнт використання енергії вітру ( $\xi$ ), що відповідають діапазону швидкості вітру 4-8м/с, що є найбільш характерним висотам виконання малих вітроустановок (ВУ) в умовах нашої держави.

В *ДОДАТКУ Б* наведені результати розрахунку питомої потужності на валу вітротурбіни при заданих швидкостях вітру в діапазоні 4-8 м/с, в залежності від швидкохідності ротора вітротурбіни для профілів першої групи.

Проведений аналіз показав, що профілі групи 1 дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності  $91,8...93,27 \text{ Вт/м}^2$  при значеннях коефіцієнтів використання енергії вітру  $\xi=0,33...0,44$  в діапазоні швидкохідності  $z = 4...5$ .

На рис. 2.2 а, б наведені результати розрахунку питомої потужності вітроустановок для профілів другої групи [8].

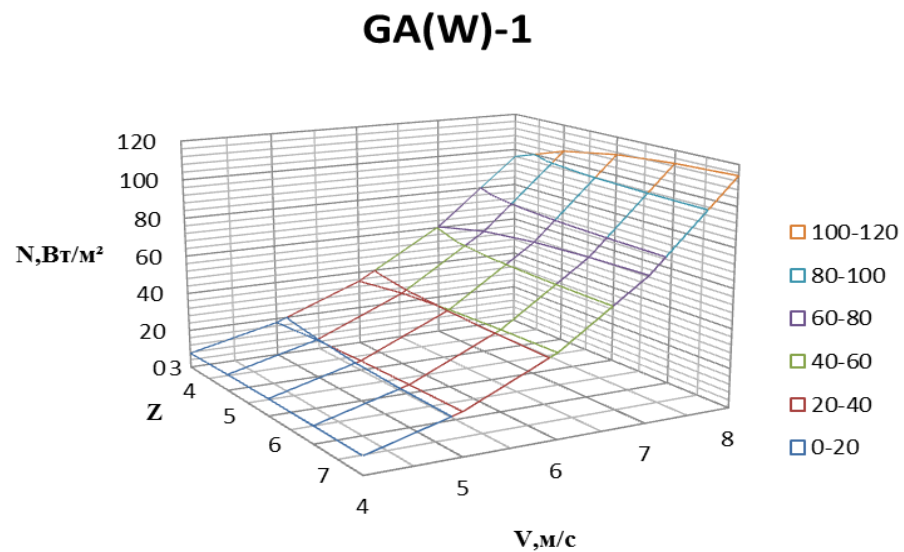
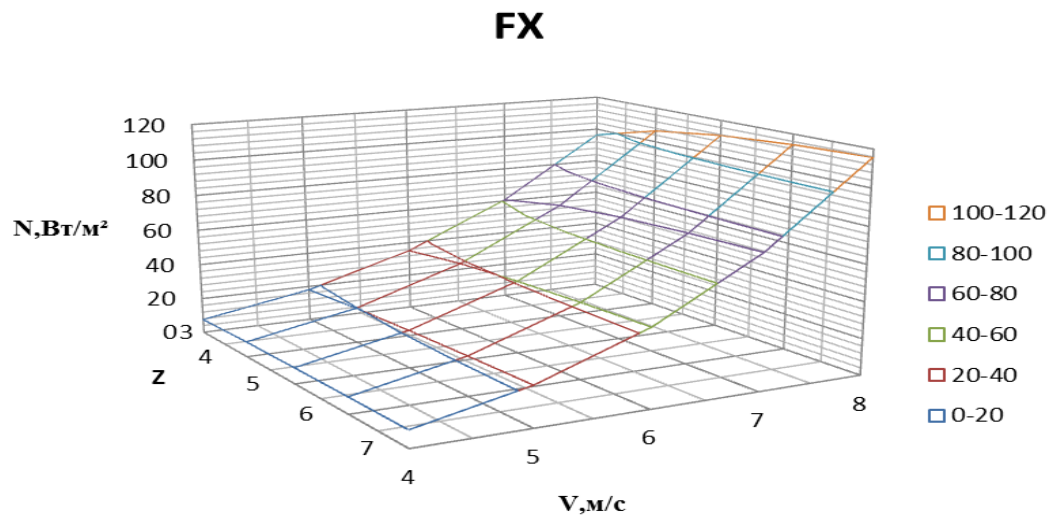


Рис. 2.2 Залежність питомої потужності на валу ротора віротурбіни від модуля швидкохідності та коефіцієнта потужності для профілів другої групи

Профілі групи 2 дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності вітрового потоку, що проходить через обтікаючу віротурбіною площу 114,27...115,74 Вт/м<sup>2</sup> при  $\xi = 0,54 \dots 0,55$  в діапазоні швидкохідності  $z = 6 \dots 7$ .

За отриманими значеннями тривимірних характеристик вихідної потужності від швидкості вітру і від швидкості обертання ротора вітротурбіни отримані екстремуми, що відповідають максимальним значенням потужності на валу ротора в залежності від швидкості вітру, типу профілю лопаті за її доцільними значеннями швидкохідності та коефіцієнта потужності.

На рис. 2.3 наведені дані для максимальної потужності на валу ротора вітротурбіни (на  $1\text{ м}^2$  обмаху ротора) для профілів, що розглянуті вище.

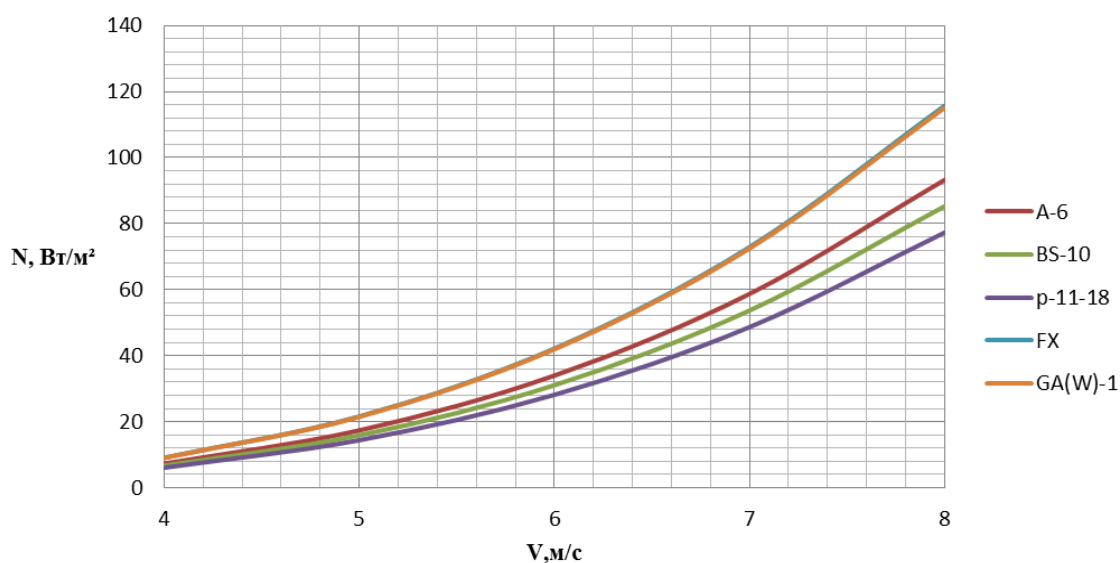


Рис. 2.3 Залежність максимальної питомої потужності на валу ротора вітротурбіни від швидкості вітру для різних профілів

Максимальна потужність розвивається вітроустановкою, лопаті ротора якої виконані на основі профілю FX та GA(W)-1. Інші профілі за даним показником відрізняються незначно. Отримані залежності є основою для розробки системи керування вихідною потужністю електрогенератора при змінній швидкості вітру. Максимальні значення потужності за середньорічних швидкостях вітру для умов України в межах  $4,0 - 6,0$  м/с складають відповідно  $9,1$  та  $42,2\text{ Вт/м}^2$ . Максимальна потужність при швидкості вітру  $8$  м/с становить  $115,74\text{ Вт/м}^2$ .



## 2.2 Узгодження аеродинамічних характеристик ротора вітротурбіни з механічною характеристикою електрогенератора

Вітроустановка практично завжди працює зі змінною потужністю та частотою обертання. Введення різноманітних регуляторів дещо поліпшує ситуацію, але в певних межах. Слід відмітити, що момент на валу ротора вітротурбіни пропорційний  $v^2$ , потужність –  $v^3$ , а частота його обертання –  $v$ . Таке положення ускладнює агрегетування ротора вітротурбіни з машинами, що мають номінальні показники за постійної частоти обертання.

На рис. 2.4 наведені результати розрахунку залежності  $M = f(\omega)$  та  $P = f(\omega)$  для профілю GAW за різних значень швидкості вітру.

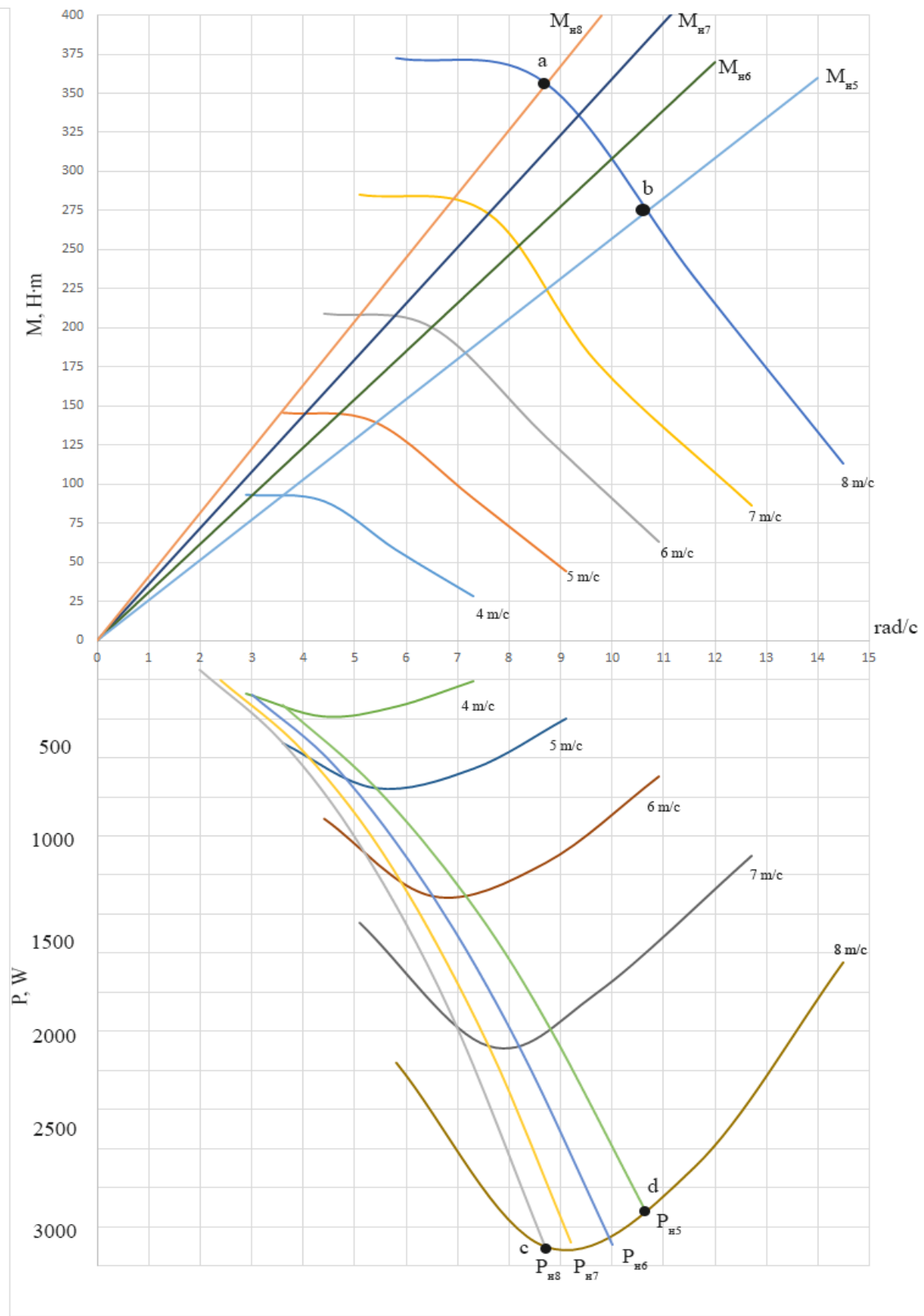


Рис. 2.4 Результати розрахунку залежності  $M = f(\omega)$  та  $P = f(\omega)$  для профілю GAW за різних значень швидкості вітру

$M_{H5} \dots M_{H8}$  – значення моментів синхронного генератора ( $M=f(EPC, R_H)$ ) за різних значень номінальної швидкості вітру (від 5 м/с до 8 м/с);  $P_{H5} \dots P_{H8}$  – значення потужності синхронного генератора за різних значень номінальної швидкості вітру (від 5 м/с до 8 м/с).

На дані криві накладені графіки механічних характеристик (лінійнізовані) синхронного генератора за різних значень номінальної швидкості вітру. Згідно рекомендацій ДСТУ 4859:2007 верхня межа діапазону номінальної потужності для вітроустановок малої потужності рекомендується приймати 8 м/с. Слід відмітити, що більшість території України має середньорічну швидкість вітру в межах 4,2...4,6 м/с. Номінальна швидкість вітру розраховується за умови :

$$v_H = k v_{cp.p.},$$

де  $k$  – коефіцієнт регулювання потужності ротора вітрогенератора і складає для швидкохідних агрегатів 1,5...2;

$v_{cp.p.}$  – середньорічна швидкість вітру.

Таким чином, діапазон номінальної швидкості вітру може складати 5, 6, 7, 8 м/с.

Аналіз рис. 2.4 дає можливість оцінити частку корекції моменту (рис. 2.5) та потужності (рис. 2.6) на валу ротора в залежності від значень номінальної швидкості вітру. Наприклад, корекція відносної величини моменту генератора, що має номінальну потужність за величини швидкості вітру 5 м/с, при досягненні швидкості вітру 8 м/с складе відношення різниці моментів в точці  $a$  (356 Н·м) та в точці  $b$  (275 Н·м) до моменту в точці  $a$  і складе (22%). Відповідно відносна величина корекції потужності складе відношення різниці потужності в точці  $c$  (3100 Вт) та в точці  $d$  (2808 Вт) до потужності в точці  $c$  і складе (9,5%).

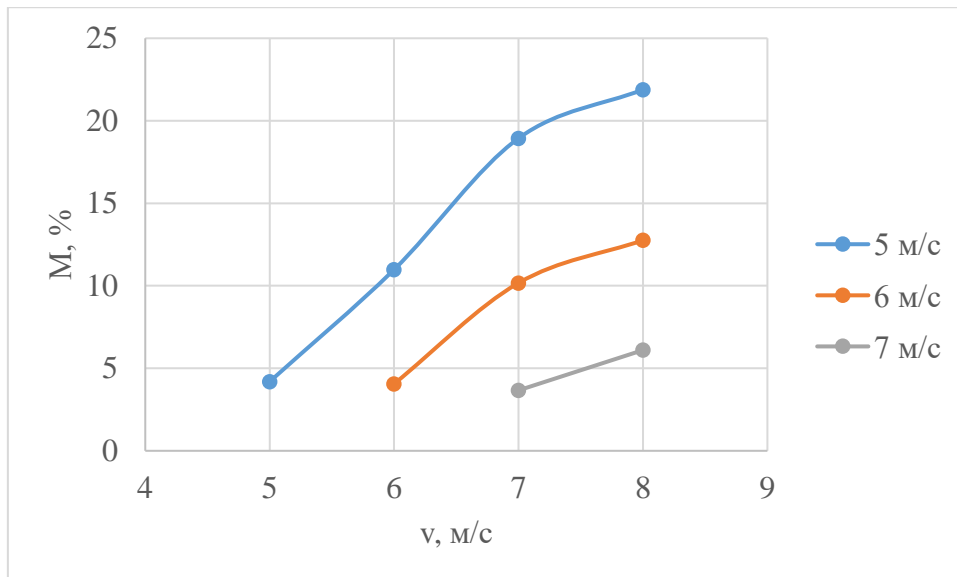


Рис. 2.5 Частка корекції моменту на валу ротора в залежності від значень номінальної швидкості вітру

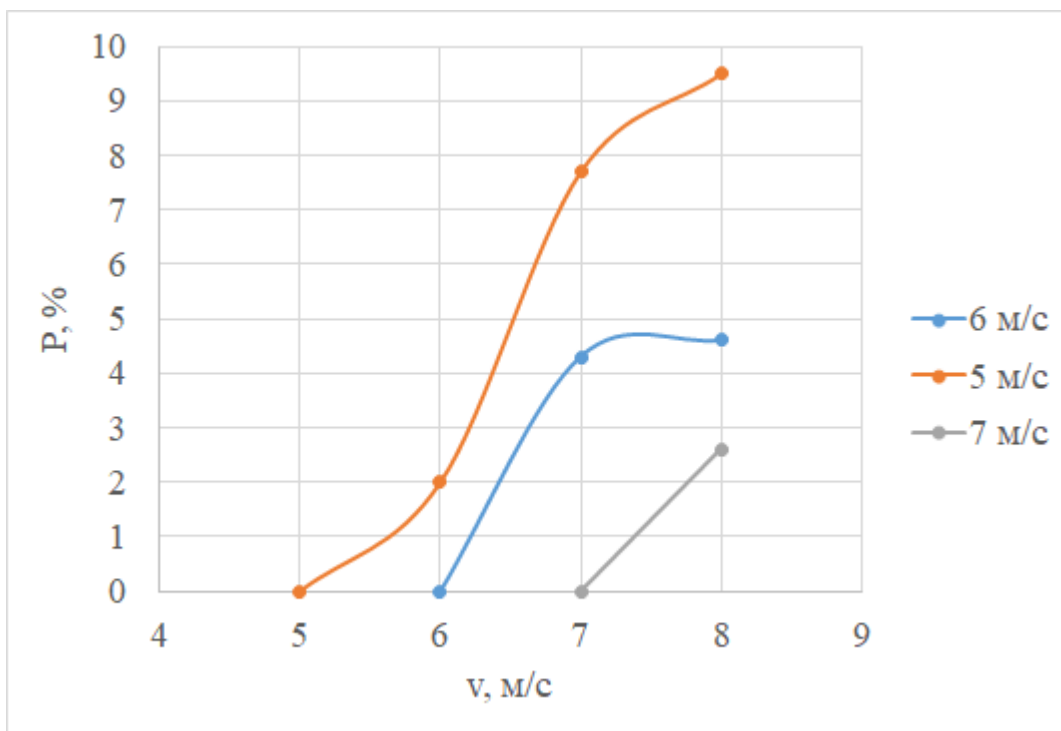


Рис. 2.6 Частка корекції потужності на валу ротора в залежності від значень номінальної швидкості вітру

Як впливає з рис. 2.5 та 2.6 значення корекції стає більшим при віддалені вибраної номінальної швидкості від верхньої межі діагона номінальних значень. Для реалізації заходів, щодо поставленої задачі, пропонується проаналізувати два методи корекції:

- приєднання додаткових конденсаторів до обмотки статора генератора;
- застосування додаткової обмотки підмагнічування статора генератора.

## Висновки до розділу 2.

1. Порівняльний аналіз аеродинамічних характеристик роторів вітроустановок проведений для профілів, що в залежності від коефіцієнта оберненої якості були поділені на дві групи: 1 – традиційні профілі: P-II, A-6, BS-10, BS-10, p-11-18 – дані профілі дозволяють отримати найкращі показники коефіцієнта використання енергії вітру ротором в межах  $\xi = 0,36 \dots 0,4$  в діапазоні швидкохідності  $z = 4 \dots 5$ . 2 – профілі серії GA(W)-1 та ламінізовані профілі FX – профілям даної групи притаманні значення коефіцієнта використання енергії вітру  $\xi = 0,53 \dots 0,57$  в діапазоні швидкохідності  $Z = 6 \dots 11$ , а при  $Z = 5 \dots 6$  забезпечують коефіцієнт потужності  $\xi = 0,49 \dots 0,53$ .

2. При розрахунку енергетичних характеристик генератора вітроустановки встановлено, що ротори вітроустановок з профілями лопатей групи 1 дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності  $91,8 \dots 93,3 \text{ Вт/м}^2$  при значеннях коефіцієнтів використання енергії вітру  $\xi = 0,33 \dots 0,44$  в діапазоні швидкохідності  $z = 4 \dots 5$ . Ротори з профілями групи 2 дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності вітрового потоку, що проходить через обмітаючу ротором вітротурбіни площу  $114,3 \dots 115,7 \text{ Вт/м}^2$  при  $\xi = 0,54 \dots 0,55$  в діапазоні швидкохідності  $z = 6 \dots 7$ .

3. Проведено узгодження аеродинамічних характеристик ротора вітротурбіни з механічною характеристикою електрогенератора, що дало можливість встановити межі корекції його за моментом та потужністю за різних значень номінальної швидкості вітру. Так для профілю лопаті серії GA(W) вона складає за моментом 22%, а за потужністю 9,5%, (за номінальної швидкості 5м/с відносно верхньої межі діапазона номінальних значень 8м/с). Для реалізації поставленої задачі, пропонується проаналізувати два методи корекції: приєднання додаткових конденсаторів до обмотки статора генератора та застосування додаткової обмотки підмагнічування статора генератора.

## РОЗДІЛ 3

### ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗМУЛЬТИПЛІКАЦІЙНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ

#### **3.1 Аналіз вихідних положень для створення математичної моделі з визначення параметрів генератора безмультиплікаційної вітроелектроустановки**

Одним із основних складових елементів вітроустановок є електричний генератор. Досвід та розробки зарубіжних та вітчизняних вчених показав, що на даний момент найбільшу ефективність мають генератори вітроустановок, що виконані на базі постійних магнітів із рідкоземельних елементів (SmCo, NdFeB) [20, 35, 39, 54, 71]. Підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну можливо за рахунок вдосконалення конструкції існуючих типів електрогенераторів, використання нових технологій та матеріалів або розробки нових конструктивних рішень електрогенераторів [29, 35, 44, 45]. Найчастіше використовують генератори циліндричної конструкції із постійними магнітами та генератори торцевого типу з двосторонньою активною поверхнею. Використання саме торцевого генератора модульної конструкції дозволяє підвищити питому потужність установки та покращити використання активних матеріалів генератора (електротехнічної сталі, постійних магнітів, обмотувального проводу).

Торцеві електричні машини можна виконати з великим числом пар полюсів, що найбільш вигідно виділяє цей клас для застосування в низько швидкісних або в високочастотних приводах. На рис. 3.1 наведено порівняння серії електричних машин з аксіальним та радіальним магнітним потоком, тобто циліндричної машини для діапазону потужності від 0,25 до 10 кВт [86, 88, 97, 100].

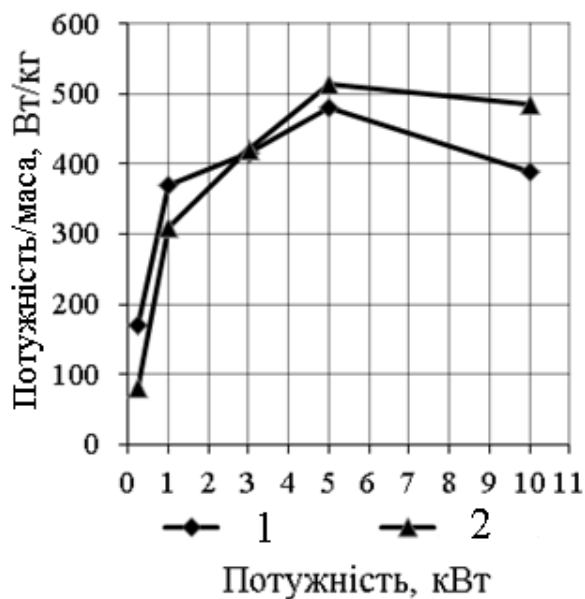


Рис. 3.1 Порівняння характеристик циліндричної (1) машини та торцевої з двосторонньою активною поверхнею (2)

При порівнянні машин близької потужності, машини з аксіальним потоком мають менший об'єм і масу активних матеріалів, ніж машини традиційної циліндричної конструкції. Особливо це стосується співвідношення потужності і об'єму машин в діапазоні потужності від 0,25 до 10 кВт. Діапазон потужності електричних генераторів з аксіальним магнітним потоком збудження лежить в межах від часток Вт до МВт. При збільшенні вихідної потужності генератора, контактна поверхня з'єднання валу і ротора зменшується непропорційно до загального об'єму машини, що обмежує вихідну потужність машини з точки зору механічної цілісності і міцності валу машини. Рішенням для збільшення механічної цілісності з'єднання ротор–вал є модульна конструкція машини [53, 115, 120]. Топологія цих машин є найбільш придатна для модульної компоновки, в якій число однакових модулів вибирається для забезпечення необхідної потужності або моменту [45, 53, 116].

На рис. 3.2 показано конструкцію генератора торцевого типу з двосторонньою активною поверхнею [29, 35, 60, 71].



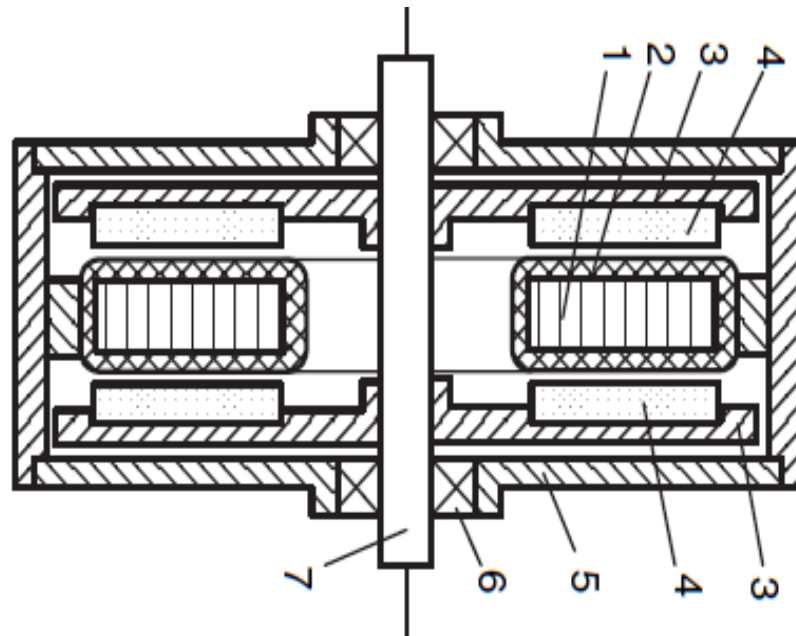


Рис. 3.2 Загальний вигляд торцевого генератора із двосторонньою активною поверхнею: 1 – магнітне осердя статора; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – постійні магніти; 5 – корпус; 6 – підшипники; 7 – вал.

На рис. 3.3 наведено вид генератора із постійними магнітами традиційної (циліндричної) конструкції [89, 91, 109].

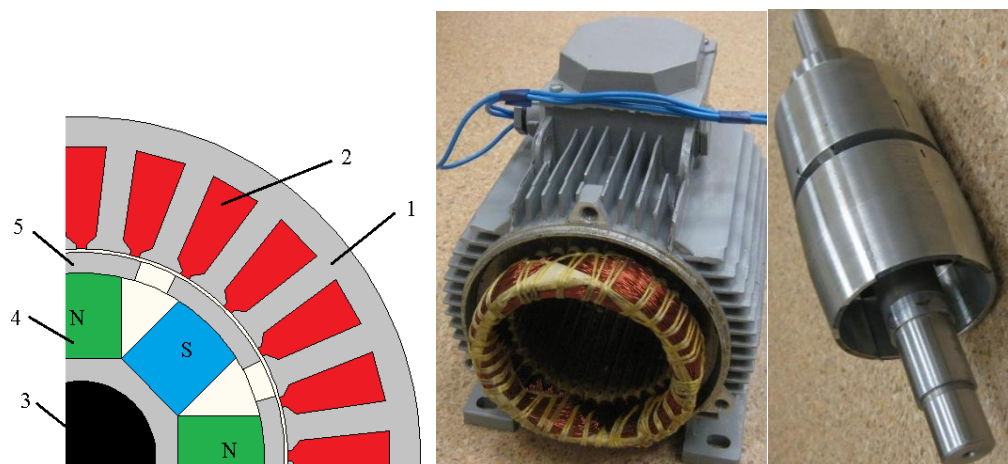


Рис. 3.3 Генератор класичної конструкції: 1 – магнітне осердя статора; 2 – обмотка статора; 3 – вал; 4 – постійні магніти; 5 – полюсні наконечники.

Вихідні дані для математичного моделювання досліджуваних електричних генераторів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

## Вихідні дані для математичної моделі

Параметр	Значення	
	Торцевий генератор	Циліндричний генератор
Постійні магніти	NdFeB N38: Br=1,21Тл, Hc=939кА/м	NdFeB N38: Br=1,21Тл, Hc=939кА/м
Матеріал ротора	Сталь 3	Сталь 3
Матеріал статора	Сталь 1211	Сталь 1211
Обмотувальний провід	ПЭТ 155 Ø 0,47	ПЭТ 155 Ø 0,47
Кількість витків в котушці	118	94
Кількість котушок	3×8	3×6
Швидкість обертання	300 об/хв	300 об/хв
Кількість полюсів	8	8
Зовнішній діаметр магнітного осердя статора, мм	170	130
Внутрішній діаметр магнітного осердя статора, мм	100	76
Довжина статора	35	127
Діаметр ротора, мм	175	75
Довжина ротора, мм	16	127
Величина повітряного проміжку, мм	0,5	0,5

Для розрахунку характеру розподілу електромагнітного поля торцевого електрогенератора доцільно використовувати тривимірну польову математичну модель. Це обумовлено наявністю в розрахунковій зоні такого генератора радіально-аксіального магнітного потоку. Застосування тривимірної математичної моделі дозволяє [56, 66, 80]:

- врахувати вплив магнітних полів розсіювання лобових частин;
- враховується наявність міжлистової ізоляції між окремими листами магнітопроводу;
- в повній мірі враховуються повздовжні та поперечні кінцеві ефекти;
- в повній мірі враховуються конструктивні особливості генератора.

Чисельна реалізація моделі виконується методом скінченних елементів із застосуванням програмного пакету COMSOL Multiphysics.

Для обчислення миттєвих значень сили і крутного моменту, наприклад для визначення часової залежності електромагнітного моменту синхронного генератора з постійними магнітами використовується метод тензору магнітного натягу. В загальному вигляді вираз для обчислення має наступний вигляд:

$$n_1 T_{av} = \frac{1}{2} Re \cdot \left( -\frac{1}{2} n_1 (E \cdot D) + (n_1 \cdot E) \cdot D^T - \frac{1}{2} n_1 (H \cdot B) + (n_1 \cdot E) \cdot B^T \right) \quad (3.1)$$

На рис. 3.4 наведено розподіл магнітної індукції в розрахунковій області для генератора з постійними магнітами циліндричної конфігурації.

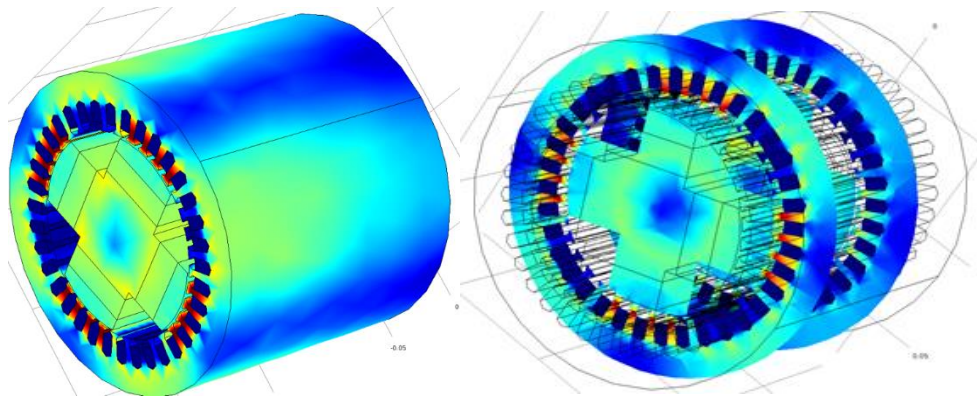


Рис. 3.4 Розподіл електромагнітного поля в розрахунковій області циліндричного електрогенератора

На рис. 3.5 наведено розподіл магнітної індукції в рамках розрахункової області торцевого генератора із постійними магнати з двосторонньою активною поверхнею.

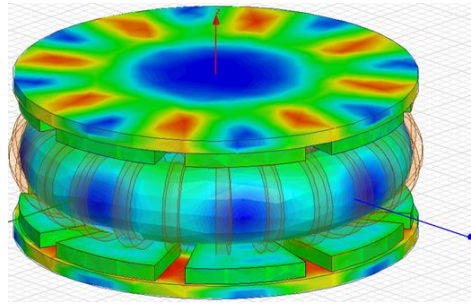


Рис. 3.5 Розподіл електромагнітного поля для двосторонньої конструкції з радіально-аксіальним магнітним потоком

Кінцевий вираз для визначення електромагнітного моменту генератора прийме наступний вигляд:

$$M_{\text{эм}} = \frac{2 \cdot p \cdot R_2 \cdot L_2}{\mu_0} \int_0^\tau B_n B_\tau dl \quad (3.2)$$

де  $B_n$ ,  $B_\tau$  – нормальна та тангенціальна складові магнітної індукції щодо поверхні ротора;

$R_2$ ,  $L_2$  – радіус та довжина ротора;  $p$  – кількість пар полюсів;  $\tau$  – величина полюсної поділки ротора.

На рис. 3.6 наведено розподіл середнього значення магнітної індукції для торцевої двохсторонньої конструкції.

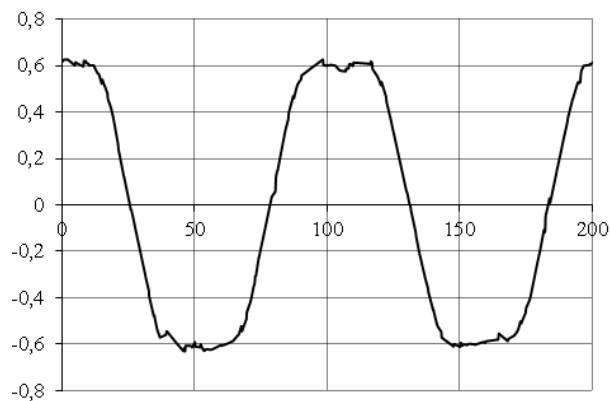


Рис. 3.6 Розподіл середньоквадратичного значення магнітної індукції для торцевої конструкції електрогенератора

З рис. 3.6 видно, що генератор торцевої конструкції забезпечує вище амплітудне значення магнітної індукції в проміжку за рахунок конструктивного виконання ніж генератор класичної конструкції. Крім того у генератора класичної

конструкції величина вищих гармонік магнітного потоку проявляється сильніше за рахунок явно вираженої зубчастості внутрішньої розточки статора та явно полюсного виконання ротора.

Результати розрахунку та порівняння наведених конструкції генераторів та їх ефективності наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

**Результат порівняння параметрів та характеристик генераторів**

Параметри	Од. вим.	Торцевий генератор	Циліндричний генератор
Номінальний фазний струм	А	2,8	2,8
Індукція в повітряному проміжку	Тл	0,43	0,32
Фазна ЕРС	В	87	63
Електромагнітна потужність	Вт	320	314
Лінійне навантаження	А/м×10 <sup>3</sup>	13,14	12,67
Маса постійних магнітів	кг	1,7	0,94
Маса генератора	кг	7,3	6,8
ККД	%	91,0	93,0
Умовний об'єм активної частини	м <sup>3</sup>	0,014	0,011
Маса	кг	7,9	7,1
Питома потужність	Вт/м <sup>3</sup>	3600	1500
Максимальний момент	Н·м	28,52	14,32
Номінальний момент	Н·м	16,7	10,2
Фазна ЕРС	В	87	63

Таким чином, результати порівняльного аналізу наведених типів електрогенераторів дозволяють зробити висновки, що торцевий тип у порівнянні з генераторами циліндричної конструкції має:

- ефективніше використання активної частини, що проявляється підвищенням значення індукованої ЕРС в обмотці якоря, покращеними питомими показниками, зокрема у випадку багатополюсного виконання;
- більш високе значення перевантажувальної здатності та номінального моменту;

- ліпші умови для природнього охолодження;
- характерні топологічні властивості для реалізації модульного виконання;
- можливість надійного консольного закріплення за наявності невеликої осьової довжини.

### **3.2 Математична модель генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора**

#### **3.2.1 Загальний опис математичної моделі генератора вітроелектроустановки з одностороннім розташуванням магнітів ротора**

Розробка імітаційної моделі електрогенератора із гібридним збудженням (з наявністю додаткової підмагнічуючої обмотки) має на меті розробку моделі для дослідження параметрів та характеристик електрогенератора у складі вітроагрегату та оцінки ефективності технічних рішень, направлених на підвищення якості перетворення енергії вітру в електричну. Окремим завданням даної моделі є синтез закону керування додатковою обмоткою з точки зору отримання максимальної потужності від вітроустановки при постійному та мінливому вітрі.

В попередньому розділі проведено аналіз електромагнітного поля досліджуваного генератора. Результати розрахунків попереднього розділу використовуються як вихідні дані для побудови моделі електрогенератора в середовищі MATLAB-Simulink. А саме, використовується характер розподілу електромагнітного поля в повітряному проміжку, магнітний потік електрогенератора  $\Phi$ ,  $B\delta$  та параметри обмоток (активні та індуктивні опори).

Результати розрахунку вітрового колеса використовуються як вихідні дані для реалізації моделі вітрової турбіни та представлені детально в попередньому розділі.

Структурна блок-схема вітроустановки із електрогенератором наведено на рис. 3.7.

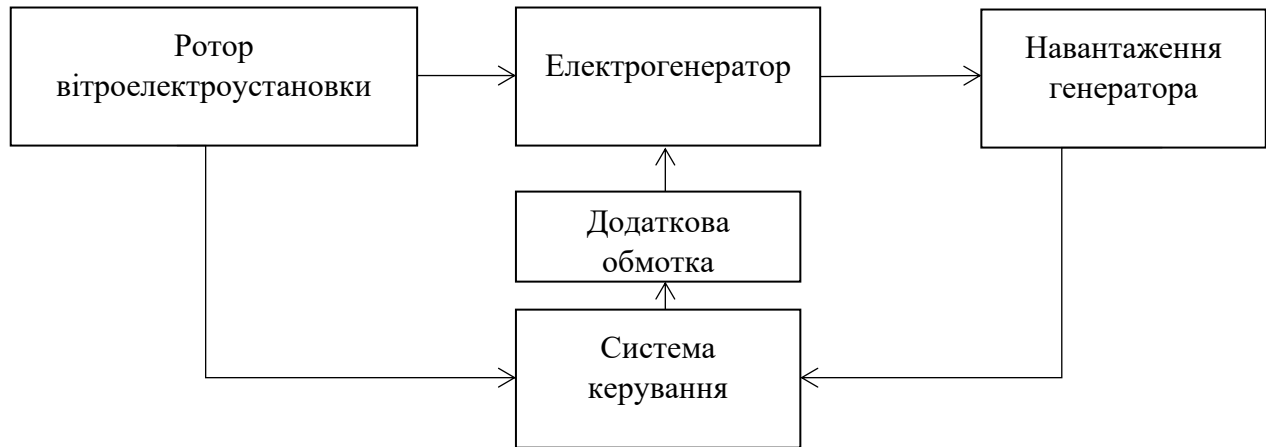


Рис. 3.7 Структурна схема системи, що досліджується

Кожен із елементів імітаційної моделі в середовищі MATLAB-Simulink представлено окремим блоком, який в свою чергу, описується системою нелінійних (лінеаризованих) диференціальних рівнянь.

Блок-схема вітрової турбіни в системі MATLAB-Simulink має 3 логічних входи та один вихід (рис. 3.8.). Перший вхід відповідає за номінальну швидкість обертання генератора ( $\omega_r$ ), другий являє собою кут атаки вітрового колеса та третій – швидкість вітру в м/с. Коефіцієнт окружної швидкості  $\lambda$  розраховується шляхом поділу абсолютної швидкості обертання (що задається) та швидкості вітру. Вихідною величиною моделі вітроустановки є величина механічного моменту, що прикладається до валу досліджуваного генератора.

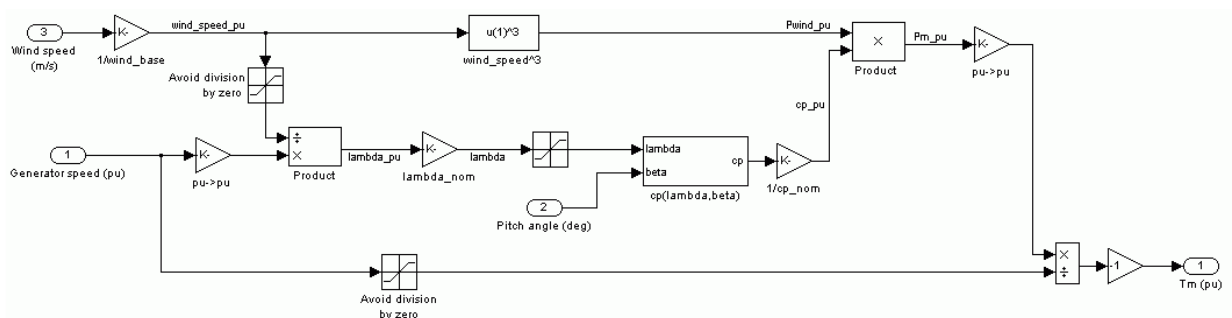


Рис. 3.8 Блок-схема вітроустановки

Наведена на рис. 3.8 модель описує усталений режим роботи вітроустановки. Вважається, що жорсткість приводу вітроустановки нескінченна, а коефіцієнт тертя і інерція турбіни узгоджуються поєднуватися з відповідними коефіцієнтами

генератора, що приєднується до турбіни. Вихідна потужність на валу ротора вітротурбіни задається наступним рівнянням:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{wind}^3 \quad (3.3)$$

де:

$P_m$  – вихідна механічна потужність вітроустановки (Вт);

$c_p$  – коефіцієнт корисної дії вітроустановки;

$\rho$  – густина повітря ( $\text{кг/м}^3$ );

$A$  – площа ротора вітротурбіни;

$v_{wind}$  – швидкість вітру (м/с);

$\lambda$  – коефіцієнт відношення швидкості обертання турбіни до швидкості вітру;

$\beta$  – кут нахилу лопаті.

В системі відносних одиниць рівняння можна записати у спрощеному вигляді:

$$P_{m\_pu} = k_p c_{p\_pu} v_{wind\_pu}^3 \quad (3.4)$$

де:

$P_{m\_pu}$  – номінальна потужність в в.о. для заданих величин  $\rho$  та  $A$ ;

$c_{p\_pu}$  – максимальне значення коефіцієнта корисної дії;

$v_{wind\_pu}$  – швидкість вітру в відносних одиницях. За базову швидкість вітру приймається очікувана (середня) величина вітру для конкретного регіону;

$k_p$  – коефіцієнт підсилення за потужністю для  $c_{p\_pu}=1$  та  $v_{wind\_pu}=1$  коефіцієнт  $k_p$  приймається меншим або рівним 1.

Для визначення величини коефіцієнта корисної дії  $c_p(\lambda, \beta)$  використовуються параметри прийнятої вітроустановки.

Загальний вигляд діалогового вікна в середовищі MATLAB-Simulink, в якому проводиться налаштування вихідних параметрів вітроустановки показано на рис. 3.9.



Parameters

Nominal mechanical output power (W):  
124

Base power of the electrical generator (VA):  
86

Base wind speed (m/s):  
8

Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):  
0.73

Base rotational speed (p.u. of base generator speed):  
1.2

Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):  
0

☐ Display wind turbine power characteristics

Рис. 3.9 Вікно налаштувань параметрів вітроустановки " Wind Turbine"

В блоці налаштувань параметрів вітрової турбіни необхідно задати наступні параметри:

Номінальна вихідна механічна потужність;

Номінальна потужність електрогенератора (ВА). Даний параметр використовується для розрахунку вихідного номінального моменту;

Номінальна швидкість вітру (м/с) використовується в системі в.о. задається значення очікуваної (середньої) величини швидкості вітру для заданого регіону;

Максимальна потужність при базовій швидкості вітру;

Базова швидкість вітру;

Кут атаки лопатей вітротурбіни.

Для моделювання електрогенератора використовується модифікована модель синхронної машини із постійними магнітами в середовищі MATLAB-Simulink.

Блок синхронної машини з постійними магнітами дозволяє моделювати режими генератора або двигуна. Режим роботи задається знаком механічного крутного моменту (позитивний для режиму двигуна, від'ємний для режиму генератора). Електричні та механічні частини машини подані моделями статичними та диференціальними рівняннями другого порядку. Модель передбачає, що потік, створений постійними магнітами в статорі, є синусоїдальним, що означає, що електрорушійні сили є синусоїдальними.

Рівняння, що описують роботи синхронної машини із постійними магнітами та гібридним збудженням наведено нижче. Наявність додаткової обмотки підмагнічування враховується в системі рівнянь додатковою складовою:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( u_d - R_s i_d - L_m \frac{di_f}{dt} + \omega Z_p L_s i_q \right); \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( u_q - R_s i_q - \omega Z_p L_s i_d - \omega Z_p L_m i_f - \omega Z_p \psi_0 \right); \\ \frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} \left( u_f - R_f i_f + L_m \frac{di_d}{dt} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c); \\ M = \frac{3}{2} Z_p \left[ \psi_0 i_q \pm L_m i_q i_f \right], \end{cases} \quad (3.5)$$

де  $L_m$  – індуктивність додаткової обмотки;

$R_f$  – реактивний опір додаткової обмотки;

$U_f, i_f$  – напруга та струм додаткової обмотки;

$L_q, L_d$  – індуктивності за осями  $q$  та  $d$ ;

$R$  – активний опір обмотки статора;

$i_q, i_d$  – струми за осями  $q$  та  $d$ ;

$v_q, v_d$  – напруги за осями  $q$  та  $d$ ;

$\omega r$  – кутова швидкість ротора генератора;

$\lambda$  – амплітуда магнітного потоку, що створюється постійними магнітами та додатковою обмоткою;

$p$  – кількість пар полюсів генератора;

$T_e$  – електромагнітний момент досліджуваного генератора.

Індуктивності  $L_q$  та  $L_d$  являють собою залежність між фазною індуктивністю та положенням ротора. Наприклад, індуктивність, виміряна між фазами А та В (при розімкненій С) описується наступним рівнянням:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos \left( 2\theta_e + \frac{\pi}{3} \right) \quad (3.6)$$

Рівняння динаміки механічної частини генератора складе:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m) \quad (3.7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (3.8)$$

де  $J$  – момент інерції ротора;

$F$  – коефіцієнт в'язкості тертя ротора;

$\theta$  – кутове положення ротора генератора;

$T_m$  – механічний момент на валу.

Рівняння для напруги обмотки статора через параметри обмотки статора записується наступним чином:

$$v_{abc} = r_{abc} i_{abc} + p \lambda_{abc} \Rightarrow v_{s1} = r_{s1} i_{s1} + p \lambda_{s1} \quad (3.9)$$

$$v_{xyz} = r_{xyz} i_{xyz} + p \lambda_{xyz} \Rightarrow v_{s2} = r_{s2} i_{s2} + p \lambda_{s2} \quad (3.10)$$

$$f_{s1} = [f_{as} f_{bs} f_{cs}]^T \quad (3.11)$$

$$f_{s2} = [f_{xs} f_{ys} f_{zs}]^T \quad (3.12)$$

де  $f$  – відповідає за вектори напруги, струму та магнітного потоку. Індеси  $s1$  та  $s2$  відповідають за постійні та змінні параметри відповідно першої ( $abc$ ) та другої ( $xyz$ ) обмотки статора відповідно;  $r_{s1}$  та  $r_{s2}$  являють собою діагональні  $3 \times 3$  матриці активних опорів для  $abc$  та  $xyz$  обмоток статора відповідно.

У комплексній векторній формі рівняння можливо записати наступним чином:

$$\underline{v}_{s1} = r_{s1} \underline{i}_{s1} + p \underline{\lambda}_{s1} \quad (3.13)$$

$$\underline{v}_{s2} = r_{s2} \underline{i}_{s2} + p \underline{\lambda}_{s2} \quad (3.14)$$

Комплексні векторні довільні змінні  $\underline{f}_{s1}$  та  $\underline{f}_{s2}$  розраховуються наступним чином:

$$\underline{f}_{s1} = \frac{2}{3} (f_{as} + \underline{a} f_{bs} + \underline{a}^2 f_{cs}) \quad (3.15)$$

$$\underline{f}_{s2} = \frac{2}{3} (f_{xs} + \underline{a} f_{ys} + \underline{a}^2 f_{zs}) \quad (3.16)$$

Де  $\underline{a} = e^{j \frac{2\pi}{3}}$  та  $f$  відповідає за напругу, струм та магнітний потік.

Потокозчеплення кожної з обмоток статора можливо записати як комбінацію трифазних складових потокозчеплень так, як показано нижче:

$$\lambda_{s1} = \lambda_{s1s1} + \lambda_{s1s2} + \lambda_{s1r} + \lambda_m \quad (3.17)$$

Де  $\lambda_{s1s1}$  відповідає за потокозчеплення abc обмотки статора, створеного струмом, що протікає в ній;  $\lambda_{s1s2}$  відповідає за потокозчеплення, створеного струмом в хвz обмотці статора;  $\lambda_{s1r}$  є результуюче потокозчеплення обмоток статора із потоком постійних магнітів;  $\lambda_m$  – потокозчеплення обмотки, підмагнічується.

Таким же чином,

$$\lambda_{s2} = \lambda_{s2s2} + \lambda_{s2s1} + \lambda_{s2r} + \lambda_m \quad (3.18)$$

Оскільки кількість пар полюсів першої та другої обмотки статора електрогенератора рівна, то взаємна індуктивність між цими обмотками буде дорівнювати нулю, що записується наступним чином:

$$\lambda_{s1s2} = \lambda_{s2s1} = 0 \quad (3.19)$$

Також, взаємне потокозчеплення (а отже і магнітні потоки) прямують до нуля.

Отже вирази можливо записати наступним чином:

$$\lambda_{s1} = \lambda_{s1s1} + \lambda_{s1r} + \lambda_m \quad (3.20)$$

$$\lambda_{s2} = \lambda_{s2s2} + \lambda_{s2r} + \lambda_m \quad (3.21)$$

В матричній формі вирази набувають наступного вигляду:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 \\ 0 & L_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{s1r} & 0 \\ 0 & \lambda_{s2r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{m1} \\ \lambda_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

де:

$$L_{s_i} = \begin{bmatrix} L_{1s_i} + L_{ms_i} & -\frac{L_{ms_i}}{2} & -\frac{L_{ms_i}}{2} \\ -\frac{L_{ms_i}}{2} & L_{1s_i} + L_{ms_i} & L_{1s_i} + L_{ms_i} \\ L_{1s_i} + L_{ms_i} & -\frac{L_{ms_i}}{2} & L_{1s_i} + L_{ms_i} \end{bmatrix}, \text{ де } i=1, 2 \quad (3.23)$$

Індуктивності  $L_q$  та  $L_d$  являють собою залежність між фазною індуктивністю та положенням ротора. Наприклад, індуктивність, виміряна між фазами а та b (при розімкненій с) описується наступним рівнянням:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos \left( 2\theta_e + \frac{\pi}{3} \right) \quad (3.24)$$

Рівняння динаміки механічної частини генератора описується наступними рівняннями:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m) \quad (3.25)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (3.26)$$

де:

$J$  – момент інерції ротора;

$F$  – коефіцієнт в'язкості тертя ротора;

$\theta$  – кутове положення ротора генератора;

$T_m$  – механічний момент на валу.

Блок-схема генератора, що досліджується із обмоткою підмагнічування наведено на рис. 3.10.

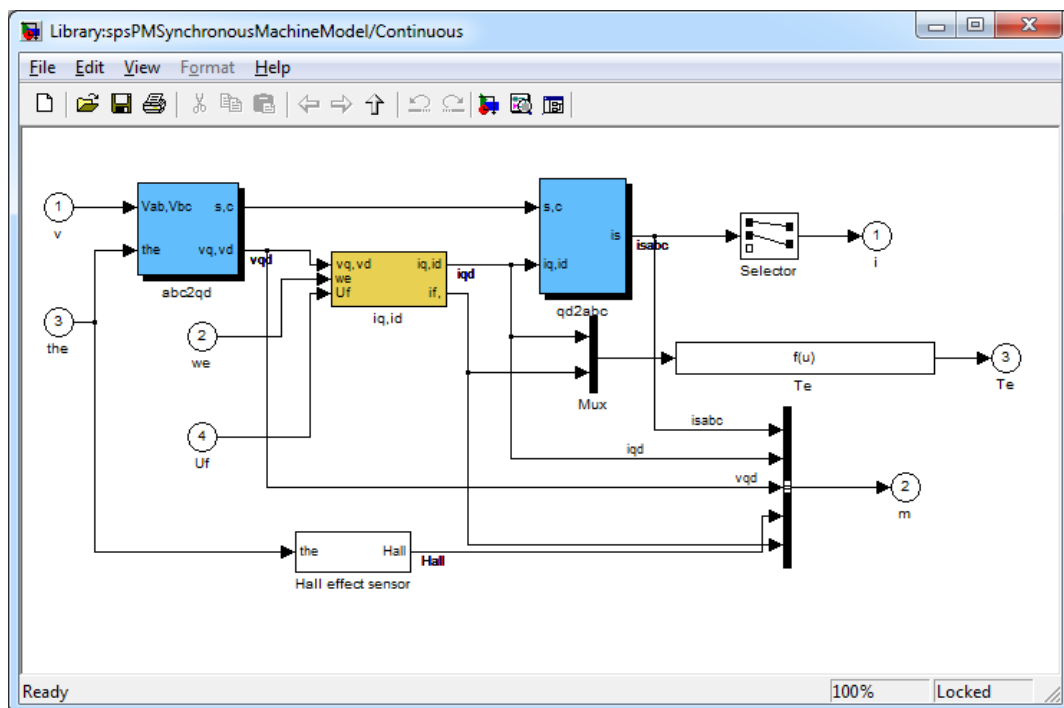


Рис. 3.10 Блок-схема генератора, що досліджується

Головною відмінністю даної моделі генератора від стандартної, що наявна в середовища MATLAB-Simulink є наявність додаткової величини  $U_f$ , яка враховується в системі диференціальних рівнянь, що наведені вище. Величина  $U_f$  далі

перетворюється в струм підмагнічування  $i_f$  і через зворотній зв'язок бере участь у стабілізації вихідної потужності або напруги.

Блок налаштування параметрів генератора, що досліджується в середовищі MATLAB-Simulink наведено на рис. 3.11.

Configuration Parameters Advanced

Stator phase resistance  $R_s$  (ohm):  
8.8

Inductances [  $L_d$ (H)  $L_q$ (H) ]:  
[0.022 0.022]

Specify: Flux linkage established by magnets (V.s) ▼

Flux linkage established by magnets (V.s):  
0.16\*1.0

Voltage Constant ( $V_{peak}$  L-L / krpm):  
116.0832

Torque Constant (N.m /  $A_{peak}$ ):  
0.96

Inertia, friction factor and pole pairs [  $J$ (kg.m<sup>2</sup>)  $F$ (N.m.s)  $p_0$  ]:  
[2.26e-005 1.349e-005 4]

Initial conditions [  $\omega_m$ (rad/s)  $\theta_{tam}$ (deg)  $i_a, i_b$ (A) ]:  
[0,0, 0,0]

Рис. 3.11 Блок налаштування параметрів генератора, що досліджується

В параметрах блоку задаються наступні параметри:

- опір обмотки статора;
- індуктивний опір обмотки статора;
- інерції, коефіцієнт тертя та кількість пар полюсів;
- магнітний потік постійних магнітів;
- величина номінальної напруги;
- величина заданого моменту;
- початкові умови.

### 3.2.2 Математична модель корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних значеннях швидкості вітру

На рис. 3.12 наведено вигляд розробленої математичної моделі електрогенератора, що досліджується в складі вітроустановки обмотки підмагнічування якоря за допомогою сторонньої ємності.

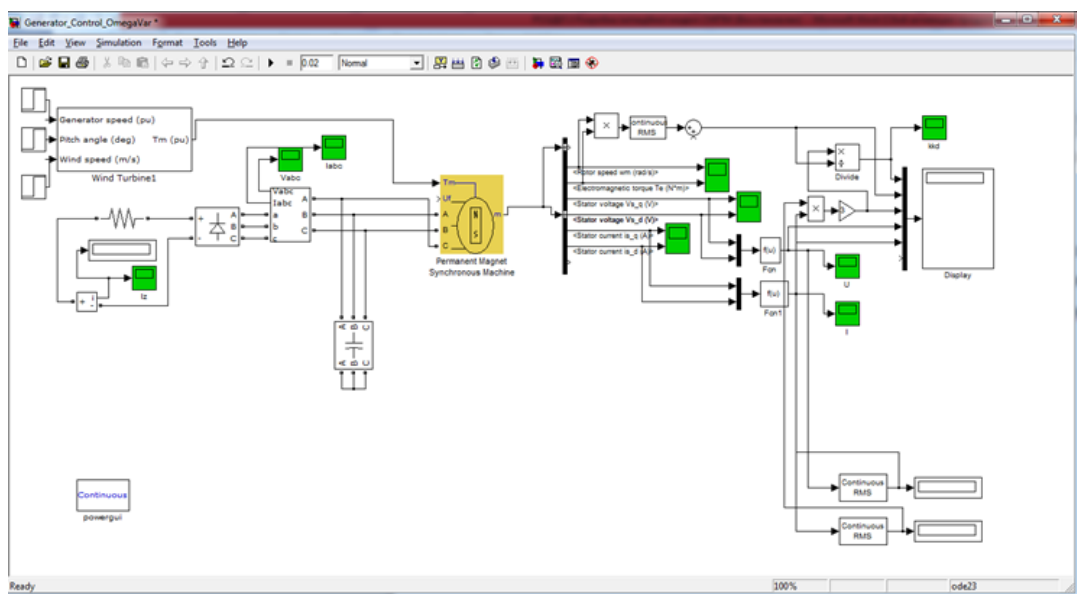


Рис. 3.12 Вигляд імітаційної моделі електрогенератора при підмагнічуванні за допомогою сторонньої ємності

В даному випадку розглянуто декілька варіантів для симуляції режиму роботи:

- 1) моделювання при постійному активному навантаженні генератора (моделювання при дискретних значеннях швидкості вітру);
- 2) моделювання при зміні активного навантаження генератора та при постійній додатковій ємності на затискачах генератора.

На рис. 3.13 наведено залежності вихідної потужності генератора від швидкості обертання ротора при застосуванні додаткового підмагнічування обмотки

якоря генератора за допомогою сторонньої ємності та при постійній швидкості вітру 4 м/с.

Максимальний приріст вихідної потужності відбувається при значеннях ємності 10 мФ та 30 мФ. Додавання ємності в обмотку якоря трифазного генератора із постійними магнітами призводить до появи додаткової реактивної потужності, яка підмагнічує магнітну систему генератора. Тобто реакція якоря такого генератора стає підмагнічуючою (такою, що підсилює основний магнітний потік).

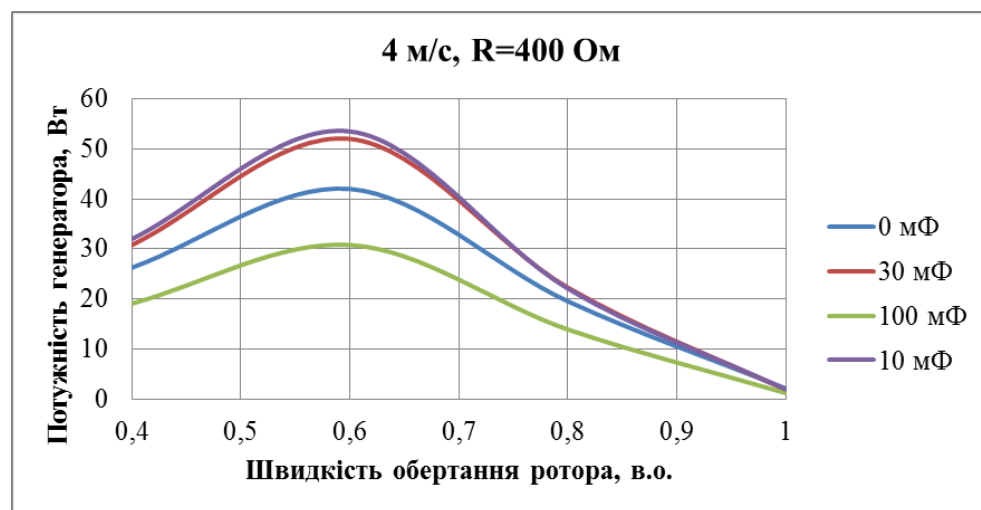


Рис. 3.13 Залежність вихідної потужності генератора від швидкості обертання ротора при підмагнічуванні обмотки якоря генератора за допомогою сторонньої ємності

Подальше падіння активної потужності генератора пояснюється збільшенням механічних втрат та додатковим насиченням магнітної системи. При надмірному збільшенні ємності на затискачах генератора (крива 100 мФ) спостерігається зворотній ефект – потужність, в порівнянні із ненавантажувальною характеристикою, починає зменшуватись. Це пояснюється збільшенням падіння напруги на активному, індуктивному та додатковому ємнісному опорі генератора. Крім того, додаткова ємність приводить до збільшення реактивного струму генератора і, як наслідок, основного магнітного потоку, це в свою чергу призводить до збільшення електромагнітного моменту, що є додатковим механічним навантаженням для вітроустановки.



На рис. 3.14 наведена залежність вихідної потужності генератора від швидкості обертання ротора при застосуванні додаткового підмагнічування обмотки якоря генератора за допомогою сторонньої ємності та при постійній швидкості вітру 5 м/с і при змінному навантаженні генератора.

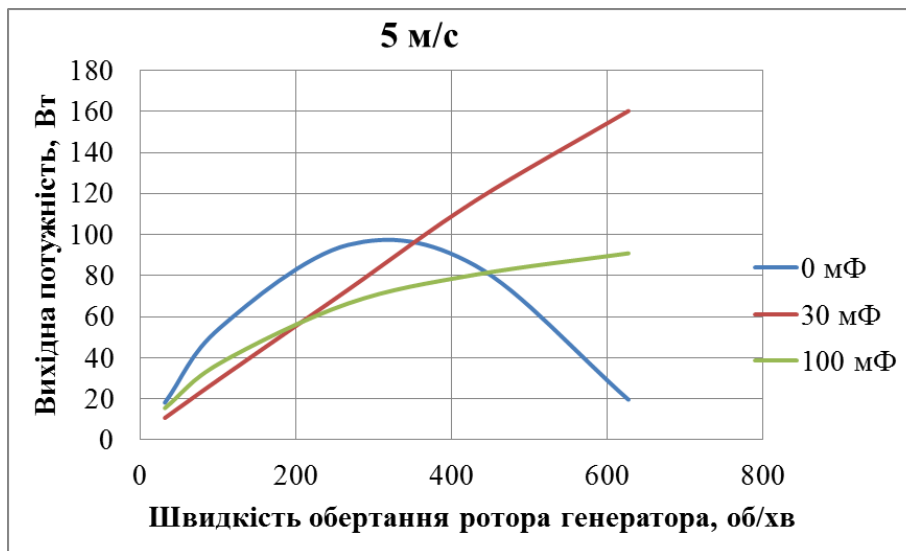


Рис. 3.14 Залежність потужності генератора від швидкості обертання ротора при підмагнічуванні за допомогою сторонньої ємності

Залежності на рис. 3.14 пояснюються наступним чином: при приєднанні додаткової ємності до обмотки якоря генератора з'являється додаткова реактивна складова струму якоря, яка є підмагнічуючою. За рахунок цього підвищується величина магнітного потоку і, як результат, величина індукованої ЕРС в обмотці якоря, а отже і потужності. За рахунок цього при приєднанні додаткової ємності характер потужності від навантаження (обертів вітроагрегата) становиться ближчим до лінійного.

### 3.2.3 Математична модель корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних значеннях швидкості вітру

Загальний вигляд математичної моделі в системі MATLAB-Simulink, для дослідження системи вітроагрегат-електрогенератор при підмагнічуванні додатковою обмоткою, відрізняється тим, що:

- відсутній зворотній зв'язок в системі за напругою генератора;
- основний магнітний потік генератора утворюється за рахунок постійних магнітів генератора;
- використовується обмотка підмагнічування генератора;
- закон керування струмом додаткової обмотки регулюється вручну стороннім оператором;
- відсутні додаткові конденсатори в обмотці якоря генератора.

На рис. 3.15 Імітаційна модель електрогенератора при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру.

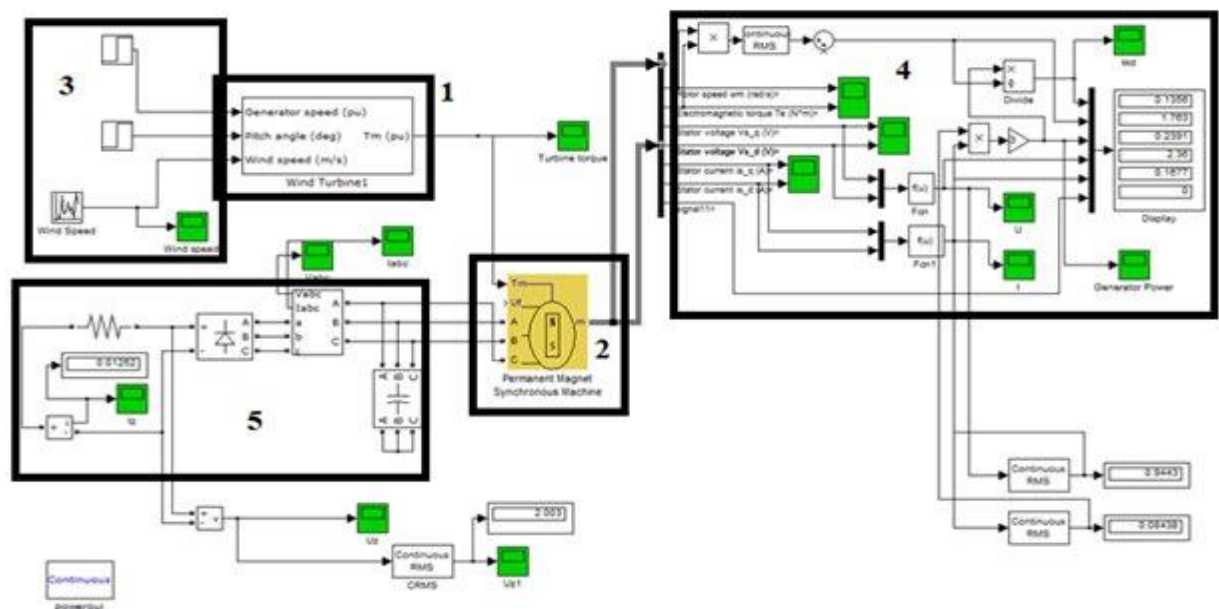


Рис. 3.15 Імітаційна модель електрогенератора при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру:

1 – блок ротора вітроустановки з параметрами лопаті NASA 40; 2 – блок, в якому задані нелінійні диференційні рівняння магнітоелектричного синхронного генератора із двостороннім розташуванням магнітів на роторі та аксіальним магнітним потоком; 3 – блок із базовими параметрами ротора вітрової турбіни та генератором випадкових чисел, який імітує мінливість швидкості вітру в межах 3-8 м/с; 4 – блок виміру, контролю, запису та обробки вихідних параметрів електрогенератора, навантаження та механічних параметрів системи в сукупності із

системою зворотних зв'язків; 5 – блок, в якому реалізоване навантаження генератора у вигляді випрямляча, що працює на активне навантаження та блоку трифазного навантаження

Алгоритм розрахунку для варіанту імітаційної моделі із використанням додаткової обмотки підмагнічування генератора наступний:

- задається постійний опір навантаження  $R=40\text{ Ом}$ ;
- швидкість вітру задається постійною для заданого значення опору навантаження відповідно (параметр "Wind speed (m/s)" в імітаційній моделі
- задається постійним значенням напруги додаткової обмотки  $U_f=\text{const}$ ;
- змінюється швидкість обертання ротора вітроагрегату, використовуючи вхідні параметри вітроустановки в імітаційній моделі ("Generator speed (pu)");
- розраховується значення струму, напруги та потужності генератора;

Результати моделювання параметрів системи вітроагрегат-електрогенератор для швидкості вітру 4 м/с та 5 м/с, змінній швидкості обертання, постійній напрузі додаткової обмотки та  $C=0\text{ мФ}$  наведені в *ДОДАТКУ Г*.

З отриманих результатів видно, що найбільш ефективним, з точки зору максимальної потужності, є використання додаткової обмотки підмагнічування генератора.

### **3.3 Математична модель генератора вітроелектроустановки з двостороннім розташуванням магнітів ротора**

Загальний вигляд математичної моделі в системі MATLAB-Simulink, для дослідження системи вітроагрегат-електрогенератор при підмагнічуванні додатковою обмоткою, відрізняється від зображеної на рис. 3.15 тим, що:

- відсутній зворотній зв'язок в системі за напругою генератора;
- основний магнітний потік генератора утворюється за рахунок постійних магнітів генератора;
- використовується обмотка підмагнічування генератора;

- закон керування струмом додаткової обмотки регулюється вручну стороннім оператором;
- відсутні додаткові конденсатори в обмотці якоря генератора.

На рис. 3.16 показано вигляд розробленої математичної моделі електрогенератора, що досліджується в складі вітроустановки при підмагнічуванні генератора додатковою обмоткою.

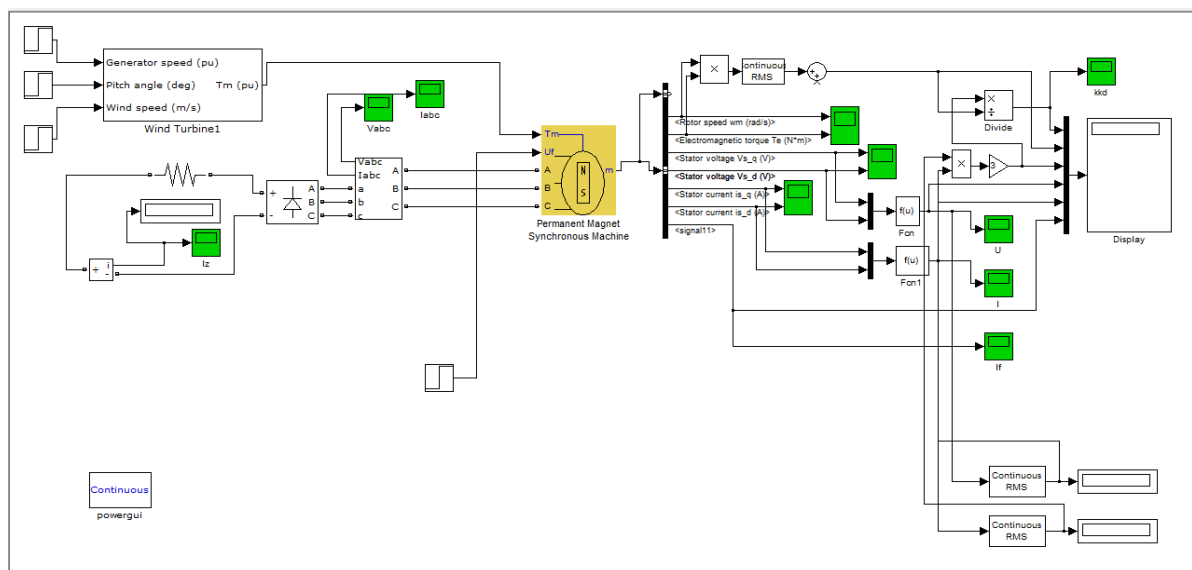


Рис. 3.16 Вигляд імітаційної моделі електрогенератора при підмагнічуванні додатковою обмоткою

Алгоритм розрахунку для варіанту імітаційної моделі із використанням додаткової обмотки підмагнічування генератора наступний:

- задаємося постійним опором навантаження  $R=400 \text{ Ом}$ ;
- швидкість вітру задається постійною для заданого значення опору навантаження відповідно (параметр "Wind speed (m/s)" в імітаційній моделі;
- задаємося постійним значенням напруги додаткової обмотки  $U_f=\text{const}$ ;
- змінюється швидкість обертання ротора вітроагрегату, використовуючи вхідні параметри вітрової турбіни в імітаційній моделі ("Generator speed (pu)");
- розраховується значення струму, напруги та потужності генератора, що досліджується;

Результати моделювання параметрів системи вітроагрегат-електрогенератор для швидкості вітру 4 м/с та 5 м/с, змінній швидкості обертання, постійній напрузі додаткової обмотки та  $C=0$  мФ наведено в *ДОДАТКУ Д*.

При збільшенні швидкості вітру до 5 м/с також спостерігається збільшення активної потужності та напруги при подачі струму на додаткову обмотку  $U_f$ . Збільшення струму в обмотці якоря при підключенні додаткової ємності пояснюється ростом реактивної намагнічувальної складової струму.

### **3.4 Аналіз результатів математичного моделювання для визначення параметрів генератора безмультіплікаційної вітроелектроустановки**

#### **3.4.1 Порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру**

В реальних умовах характер вітру носить мінливий характер. Середньорічна швидкість вітру для України коливається в межах 5м/с. Поточне значення швидкості вітру залежить від погодних умов, часу доби та пори року. Відповідно і характер вихідної потужності генератора буде мати мінливий характер.

При розробці математичної моделі системи "вітротурбіна-електрогенератор" при змінному вітрі, що носить випадковий характер, за основу взята модель, що описана у попередньому підрозділі. Для моделювання мінливості швидкості вітру використовується блок "Uniform Random Number" в системі Simulink. За допомогою даного блоку забезпечується формування сигналів, значення яких в окремі моменти часу є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом із заданими параметрами (рис. 3.17).

Minimum: 3

Maximum: 8

Seed: 0

Sample time: 0.001

☒ Interpret vector parameters as 1-D

OK Cancel Help

Рис. 3.17 Параметри блоку Uniform Random Number для швидкості вітру

У число параметрів налаштування блоку входять: Minimum – нижня межа випадкової величини для швидкості вітру; Maximum – верхня межа швидкості вітру; Initial seed – початкове значення бази генератора випадкових чисел; Sample time – дискрет часу, тобто час, через який змінюються випадкові величини швидкості вітру.

На рис. 3.18 наведено залежність швидкості вітру від часу при заданих налаштуваннях блоку випадкових чисел

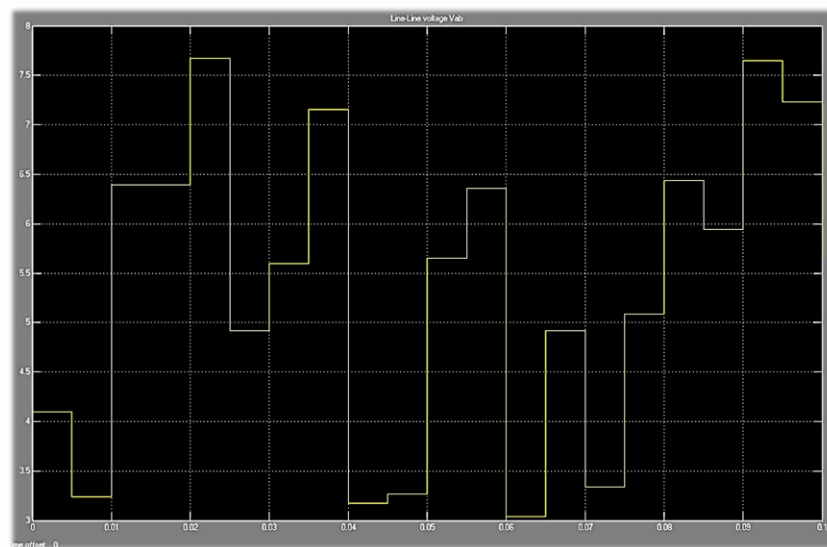


Рис. 3.18 Залежність швидкості вітру від часу

Загальний вигляд математичної моделі для дослідження системи вітроагрегат-електрогенератор при підмагнічуванні сторонньою ємністю та при мінливій швидкості вітру відрізняється від попередньої тим, що:

- відсутній зворотній зв'язок в системі за напругою генератора;
- швидкість вітру є не константою, а змінюється випадково;
- основний магнітний потік генератора утворюється лише за рахунок постійних магнітів генератора;
- не використовується обмотка підмагнічування генератора, а отже відсутній вхідний сигнал генератора  $U_f$  та вихідний сигнал генератора "signal 11";
- ємність додаткових конденсаторів в обмотці якоря генератора приймається постійною.

На рис. 3.19 наведена математична модель електрогенератора в складі вітроустановки при підмагнічуванні обмотки якоря сторонньою ємністю.

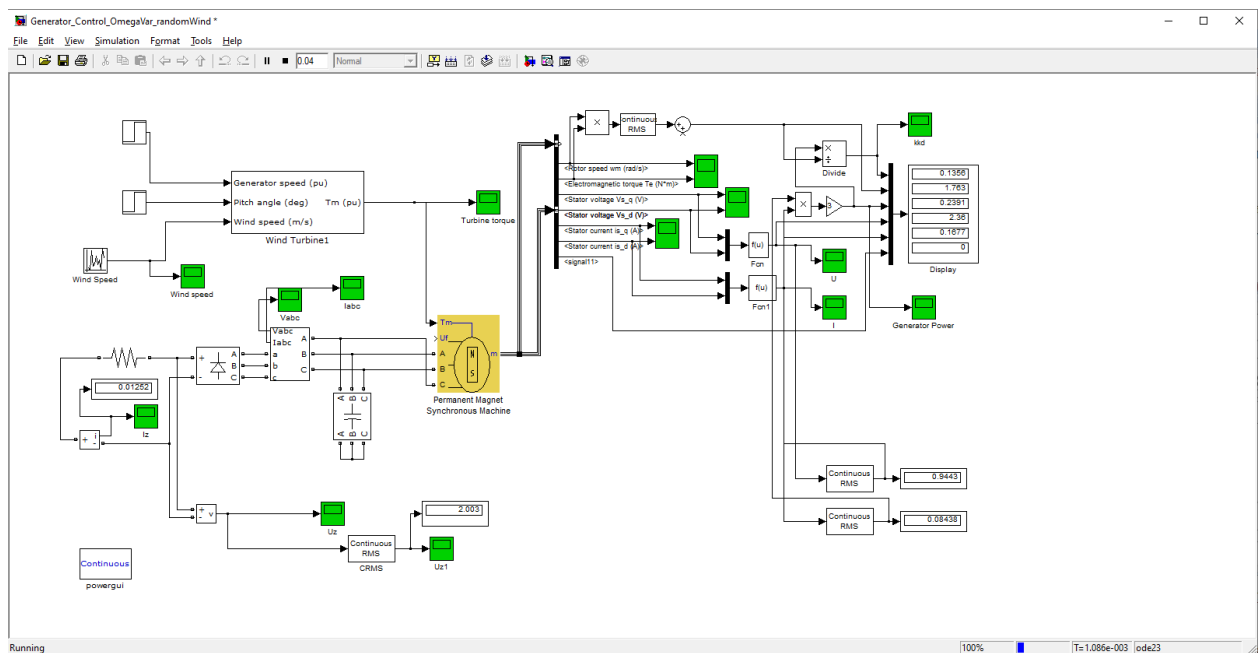


Рис. 3.19 Вигляд імітаційної моделі електрогенератора при підмагнічуванні сторонньою ємністю

В даному випадку моделювання проводиться при постійному активному навантаженні генератора (моделювання при зміні швидкості обертання ротора генератора) та при постійній додатковій ємності на затискачах генератора.

Алгоритм розрахунку для даного варіанту імітаційної моделі наступний:

- задається постійний опір навантаження  $R=400\ \Omega$ ;
- швидкість вітру задається блоком "Uniform Random Number";
- задаються наступні значення додаткової ємності в обмотці якоря генератора  $C=10\ \mu\text{Ф}$ ,  $C=30\ \mu\text{Ф}$ ,  $C=100\ \mu\text{Ф}$ ;
- розраховується значення струму, напруги та потужності генератора;

Залежність вихідної механічної потужності ротора вітроагрегату при випадковому значенні швидкості вітру наведена на рис. 3.20.

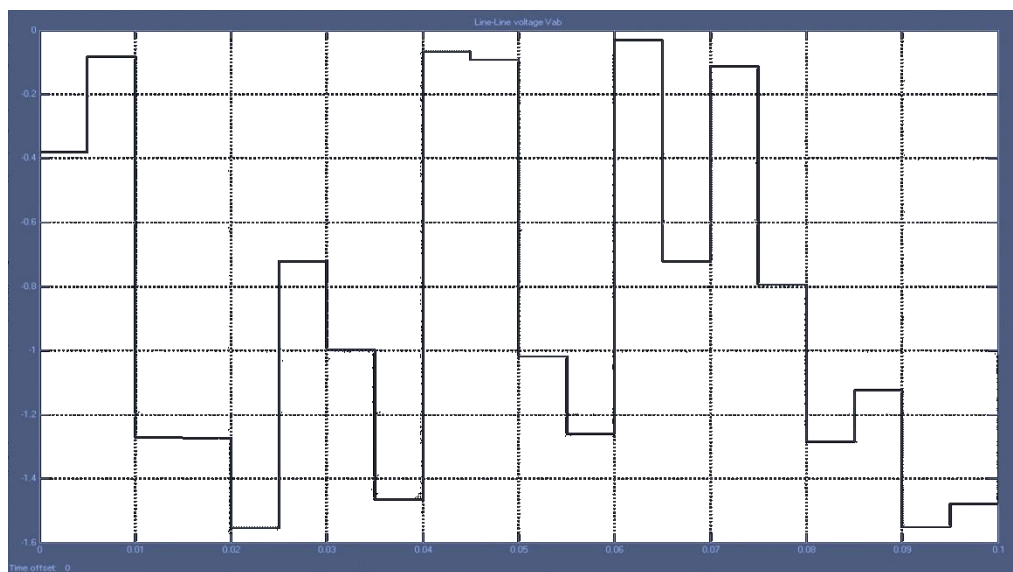
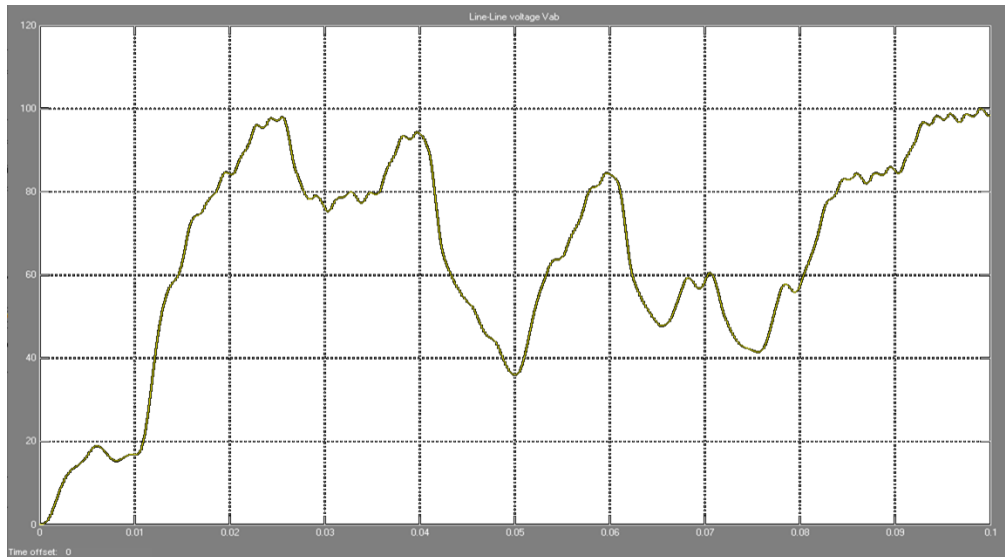


Рис. 3.20 Залежність моменту ротора вітроагрегату при випадковому значенні швидкості вітру

Усереднене (середньоквадратичне) значення напруги на виході генератора в кожен момент часу наведено на рис. 3.21





Рису. 3.21 Середньоквадратичне значення напруги на виході генератора при випадковому значенні швидкості вітру

Середньоквадратичне значення струму на виході генератора при мінливості швидкості вітру наведено на рис. 3.22.

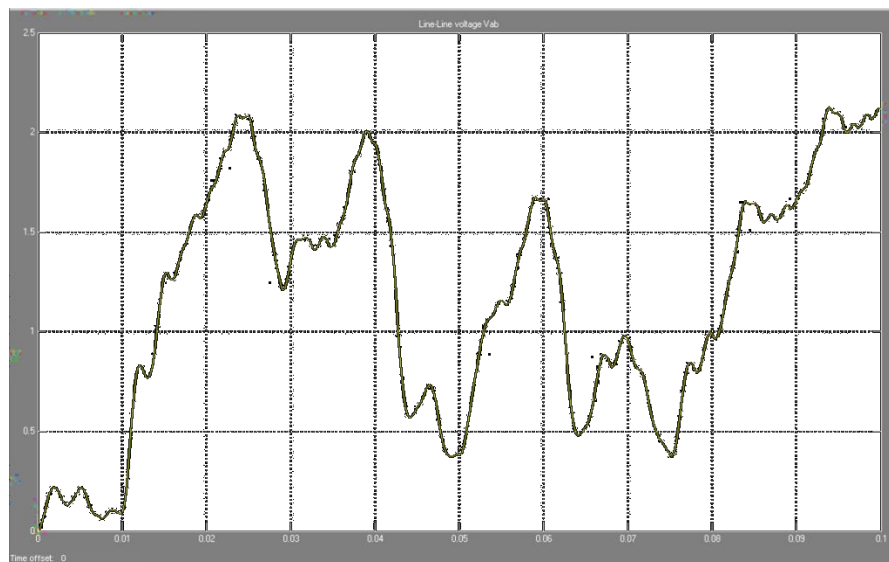


Рис. 3.22 Усереднене значення струму на виході генератора

Залежність вихідної активної потужності електрогенератора при мінливій швидкості вітру наведена на рис. 3.23.

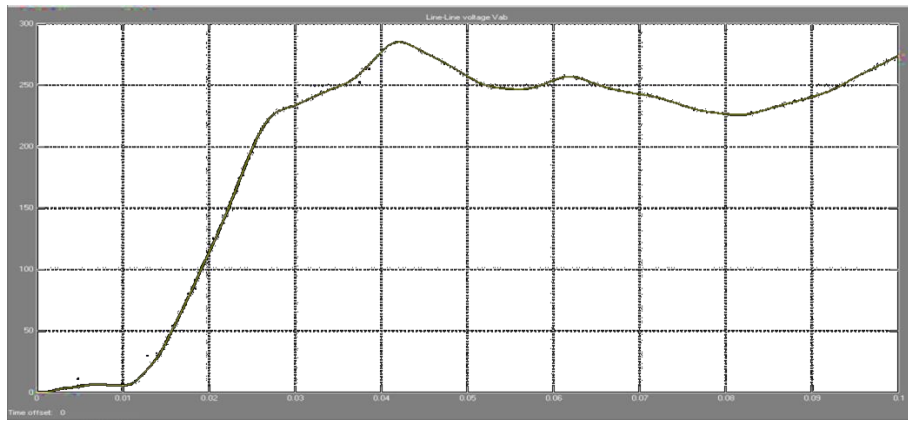


Рис. 3.23 Залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру

Порівняння миттєвого значення напруги з конденсаторами 30 мкФ (верхня крива) та без регулювання (нижня крива) на виході генератора від часу при мінливій швидкості вітру наведено на рис. 3.24.

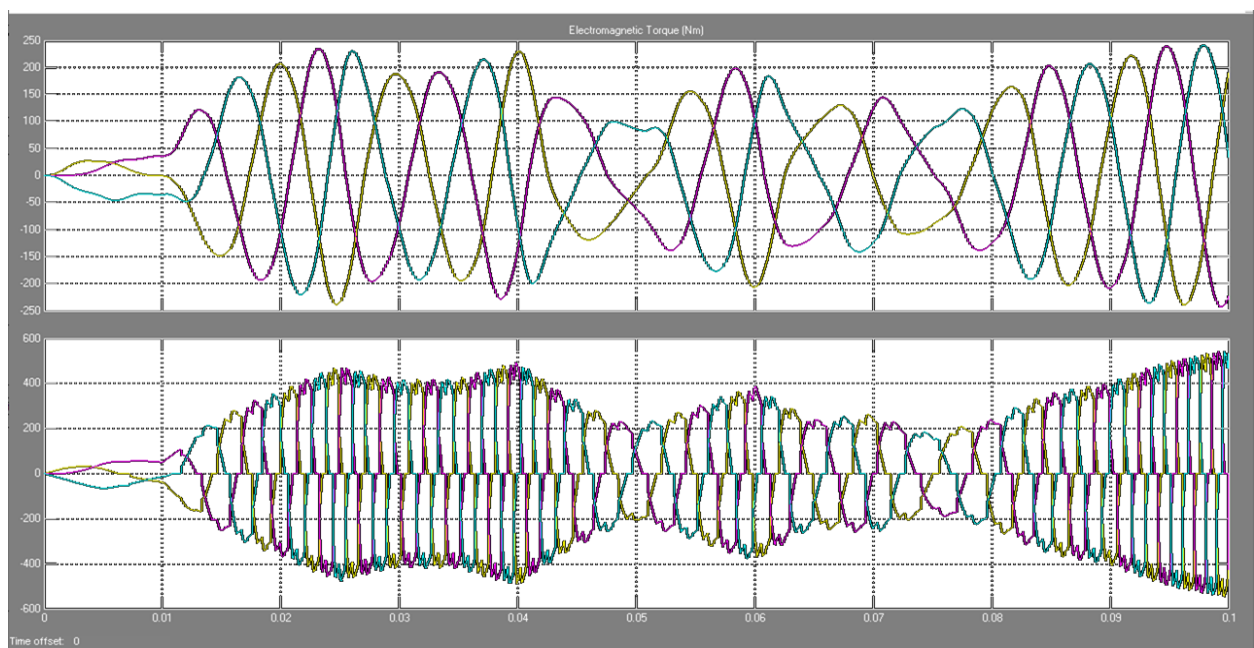


Рис. 3.24 Залежність миттєвої напруги на виході генератора

За результатами моделювання випливає, що миттєве значення напруги на виході генератора при приєднанні додаткової ємності в 30 мкФ та при випадковій швидкості вітру відрізняються від напруги без регулювання. Амплітудне значення напруги при приєднаній ємності менше приблизно в 1,8 рази, що пояснюється збільшенням падіння напруги на додатковій ємності. Крім того, характер кривої при

приєднанні додаткової ємності носить більш плавний характер, за рахунок накопиченої в ємності енергії.

Порівняння усередненого (середньоквадратичне) значення напруги з конденсаторами 30 мкФ та без регулювання на виході генератора в кожен момент часу наведено на рис. 3.25.

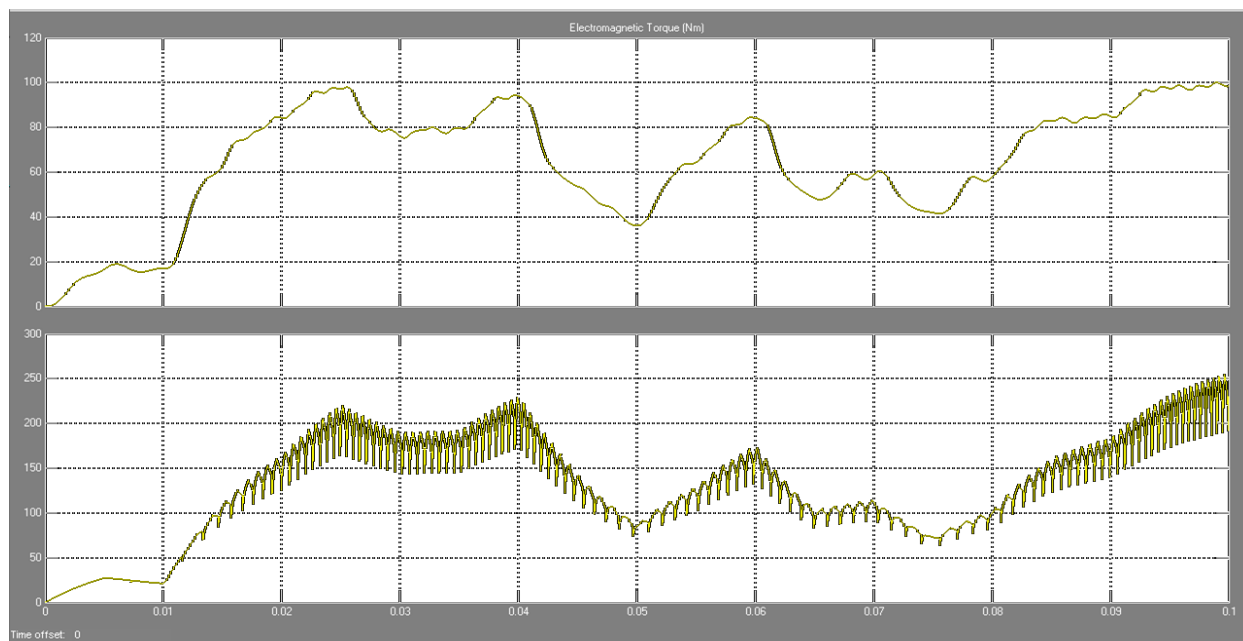


Рис. 3.25 Середньоквадратичне значення напруги на виході генератора

З рис. 3.25 слідує, що середньоквадратичне значення напруги на генераторі при приєднанні додаткової ємності менше ніж без регулювання. Характер кривої напруги при наявності додаткової ємності носить більш плавний характер.

Порівняння усередненого середньоквадратичного значення струму на виході генератора напруги з конденсаторами 30 мкФ та без регулювання при мінливості швидкості вітру наведено на рис. 3.26.

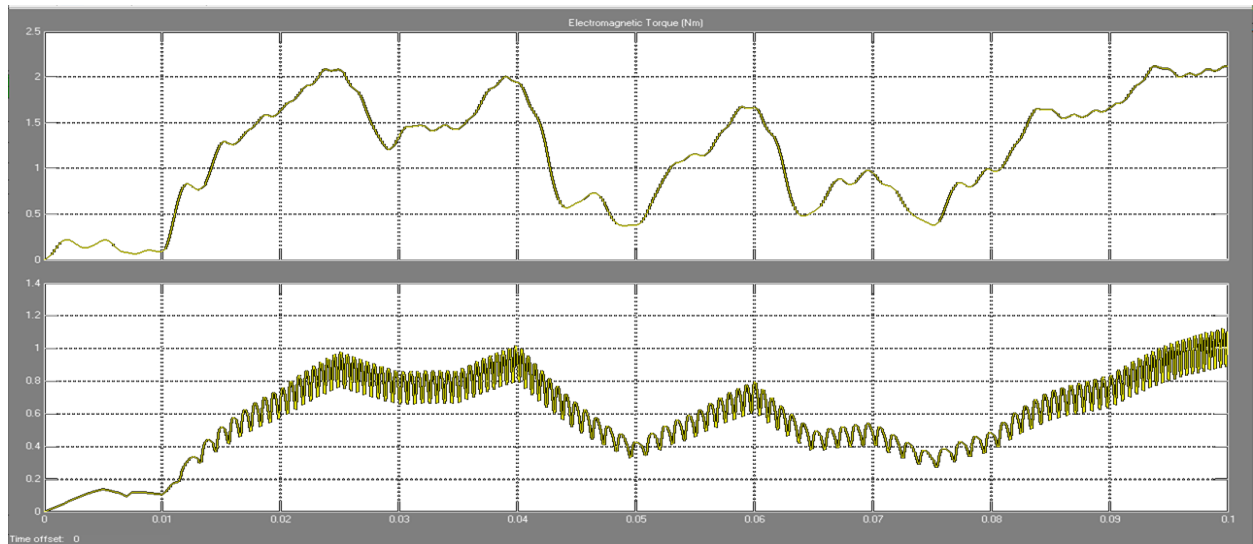


Рис. 3.26 Усереднене значення струму на виході генератора

Середньоквадратичне значення струму при наявності додаткової ємності 30 мкФ майже в 2,2 рази вище ніж без регулювання. Це пояснюється наявністю додаткової підмагнічуючої реактивної складової струму в обмотці якоря генератора. Варто враховувати, що це призводить до суттєвого зростання активних втрат в обмотці якоря генератора.

Порівняння залежності вихідної активної потужності електрогенератора з конденсаторами 30 мкФ та без регулювання при мінливій швидкості вітру наведено на рис. 3.27.

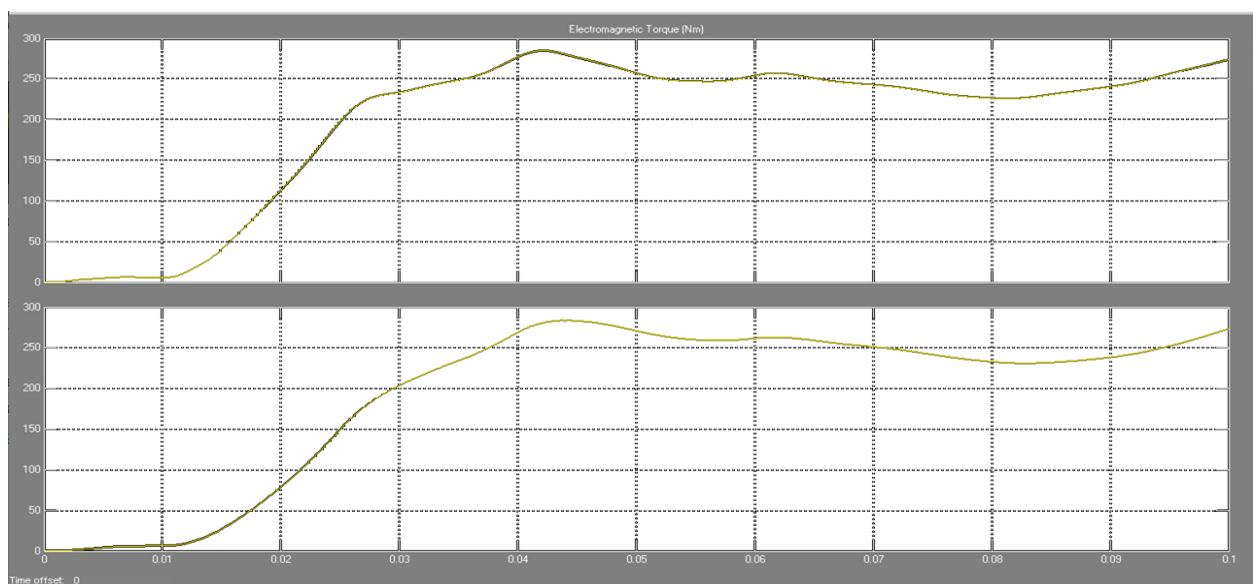


Рис. 3.27 Залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру

Потужність на виході генератора при мінливій швидкості вітру на 5-10% більше ніж без регулювання. Це пояснюється ростом активної складової струму якоря за рахунок росту струму, що підмагнічує його.

### **3.4.2 Порівняльний аналіз корекції вихідної потужності генератора за допомогою додаткового збудження при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру**

Загальний вигляд математичної моделі для дослідження системи вітроагрегат-електрогенератор при підмагнічуванні додатковою обмоткою та мінливій швидкості вітру відрізняється від зображеної на рис. 3.42 (попереднього розділу). Головні відмінності обумовлені тим, що:

- відсутній зворотній зв'язок в системі по напрузі генератора;
- швидкість вітру є не константою, а змінюється випадково в залежності від часу;
- основний магнітний потік генератора утворюється за рахунок постійних магнітів генератора та за рахунок додаткової обмотки підмагнічування;
- використовується обмотка підмагнічування генератора, а отже подається вхідний сигнал на вхід генератора  $U_f$  та присутній вихідний сигнал генератора "signal 11";
- відсутні додаткові конденсатори в обмотці якоря генератора.

На рис. 3.28 наведено вигляд розробленої математичної моделі електрогенератора, що досліджується в складі вітроустановки при використанні додаткової обмотки підмагнічування.

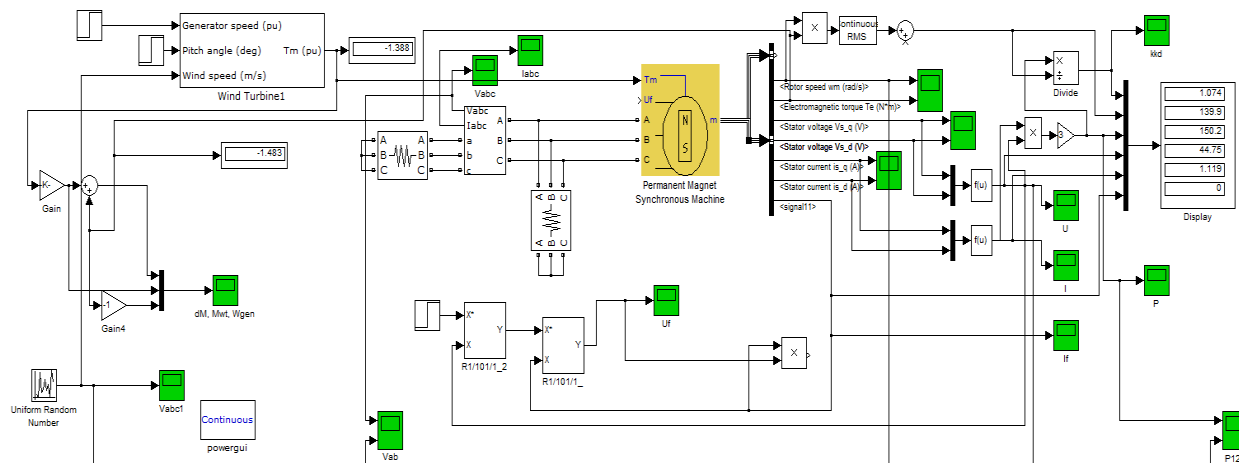


Рис. 3.28 Вигляд імітаційної моделі електрогенератора при підмагнічуванні додатковою обмоткою

В даному випадку моделювання проводиться при постійному активному навантаженні генератора (моделювання при зміні швидкості обертання ротора генератора) та при відсутності додаткової ємності на затискачах генератора.

Алгоритм розрахунку для даного варіанту імітаційної моделі наступний:

- задаємося постійним опором навантаження  $R=40\ \Omega$ ;
- швидкість вітру задається блоком "Uniform Random Number";
- задається постійне значення напруги на вхід додаткової обмотки  $U_f$  "signal 11";
- розраховується значення струму, напруги та потужності досліджуваного генератора;

Залежність вихідної механічної потужності ротора вітроагрегату від часу показано на рис. 3.29.

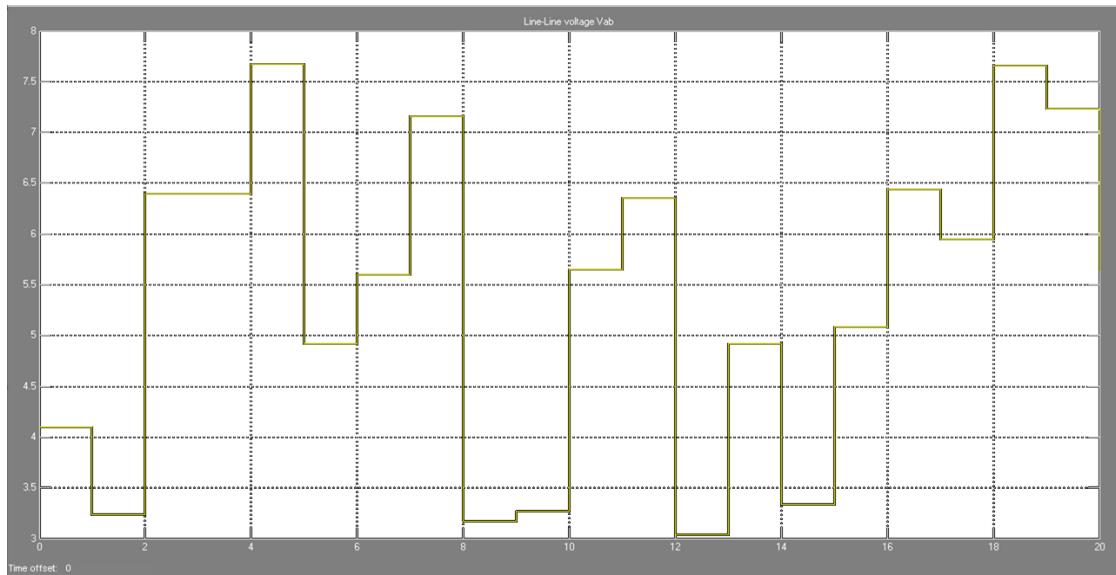


Рис. 3.29 Залежність моменту ротора вітроагрегату від часу

Залежність миттєвого значення напруги на виході генератора від часу при мінливій швидкості вітру показано на рис. 3.30.

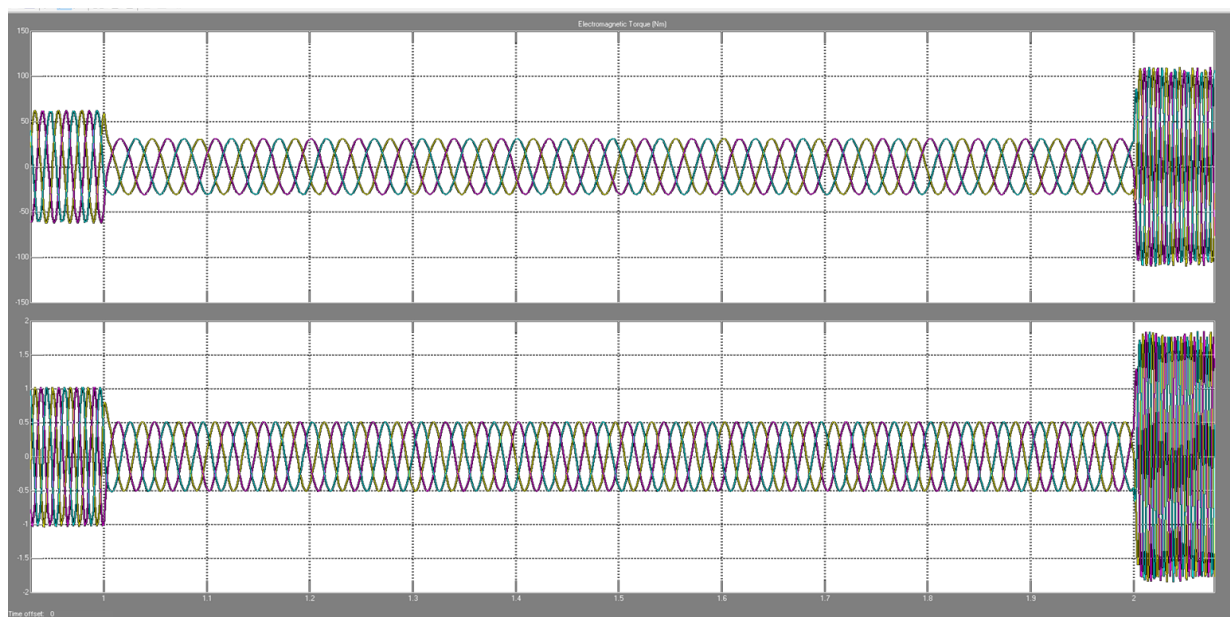


Рис. 3.30 Миттєве значення напруги на затискачах генератора при мінливому вітрі

Верхня крива відповідає миттєвому значенню напруги генератора без регулювання, нижня відповідає роботі генератора з напругою на додатковій обмотці. Обидві криві побудовані для однакового випадкового розподілу швидкості

вітру в часі. Миттєві значення вихідної напруги генератора при роботі з додатковою обмоткою вищі на 15-20 % ніж при відсутньому регулюванні.

Порівняння усередненого (середньоквадратичного) значення напруги з приєднаною додатковою обмоткою та без регулювання на виході генератора в кожен момент часу показано на рис. 3.31.

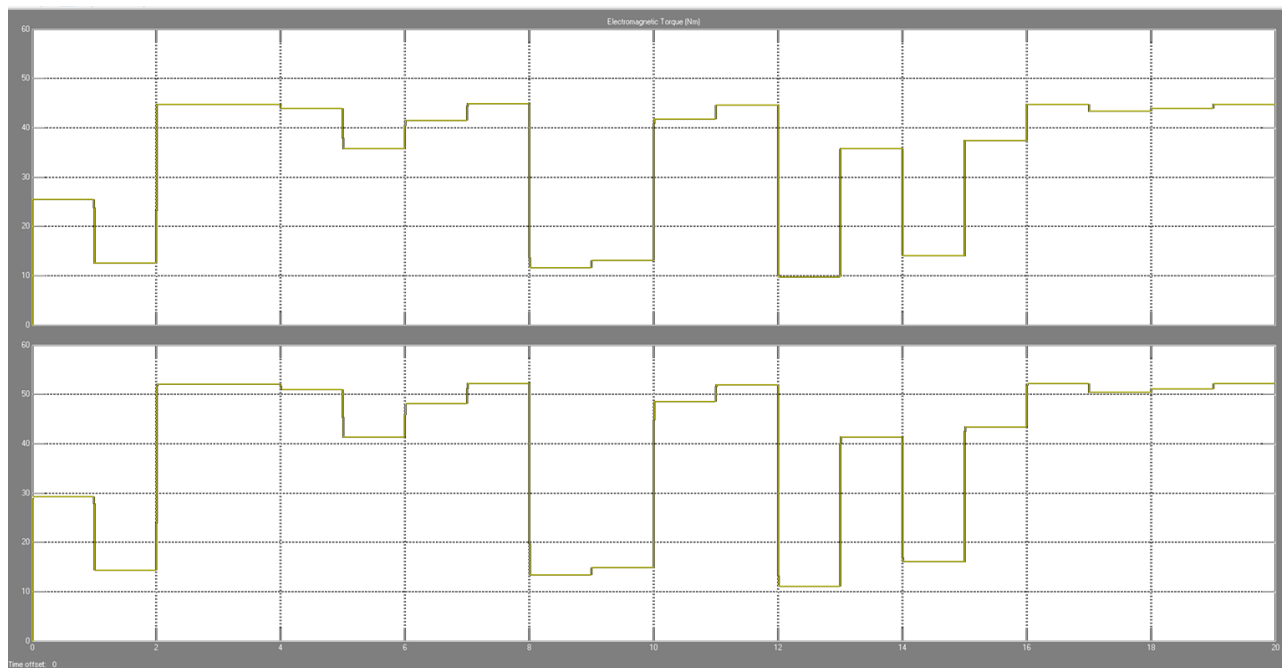


Рис. 3.31 Середньоквадратичне значення напруги на виході генератора

Нижня крива на рис. 3.31 відповідає роботі генератора з підключеною додатковою обмоткою підмагнічування.

Порівняння залежності вихідної активної потужності електрогенератора з обмоткою підмагнічування та без регулювання при мінливій швидкості вітру наведено на рис. 3.32.



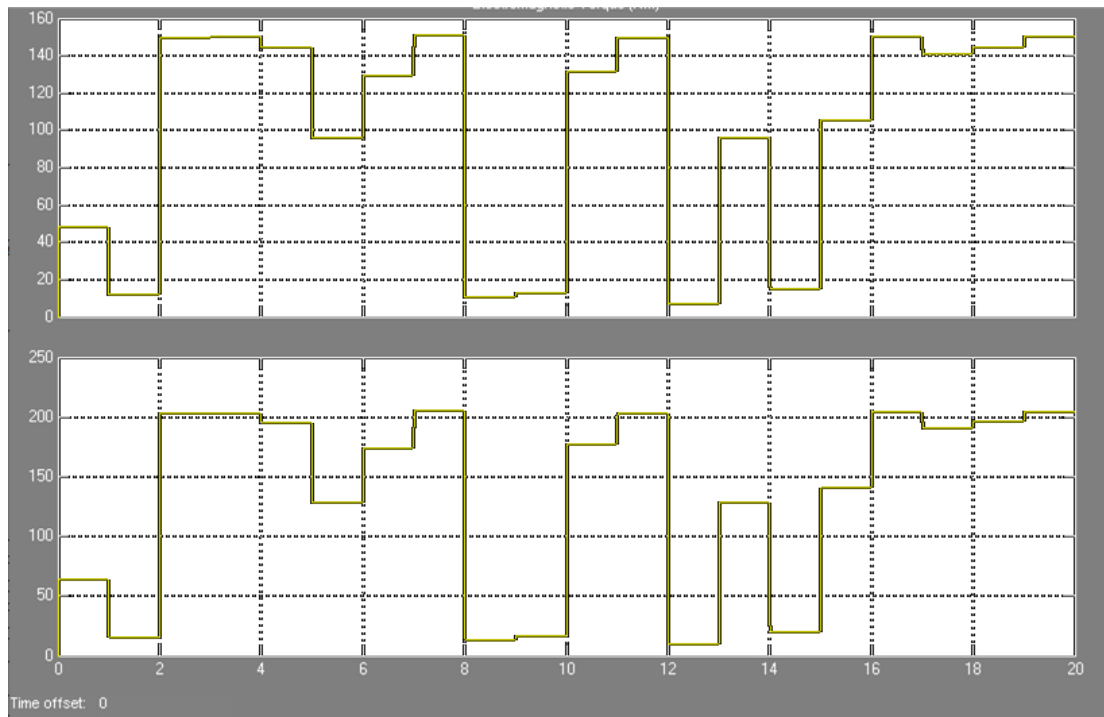


Рис. 3.32 Залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру

Нижня крива побудована при приєднаній додатковій обмотці генератора, верхня відповідає режиму роботи генератора без регулювання.

Потужність на виході генератора при мінливій швидкості вітру на 30-40% більше ніж без регулювання. Це пояснюється ростом основного магнітного потоку електрогенератора за рахунок підмагнічування додаткової обмотки. Як наслідок зростає наведена в обмотці якоря ЕРС і активна потужність.

### 3.5 Робота синхронного генератора з постійними магнітами при підмагнічуванні сторонньою ємністю

На сьогодні синхронні генератори з постійними магнітами становлять основу автономних генераторів для традиційних і нетрадиційних комплексів та систем перетворення механічної енергії вітру на електричну. Переважною задачею таких систем є стабілізація вихідних параметрів та максимально ефективного перетворення енергії вітрового потоку на електричну. Одним зі способів стабілізації вихідних параметрів є підмагнічування електрогенератора сторонньою ємністю. Однак у цей

час питанню щодо розрахунку доцільної величини ємності для того чи іншого типу генератора приділяється недостатньо уваги.

Для оцінки статичних характеристик системи вітроагрегат-електрогенератор із постійними магнітами доцільно модифікувати розроблену раніше математичну модель в середовищі MATLAB-Simulink.

Для розрахунку величини ємності, яку необхідно приєднати до обмотки якоря СГПМ, використана заступна схема, що наведена на рис.3.33. У разі, коли СГПМ працює в автономному режимі, напруга та її частота, визначаються швидкістю обертання привідного рушія (ротора вітротурбіни), величиною приєднаної до обмотки якоря ємності та величиною навантаження генератора.

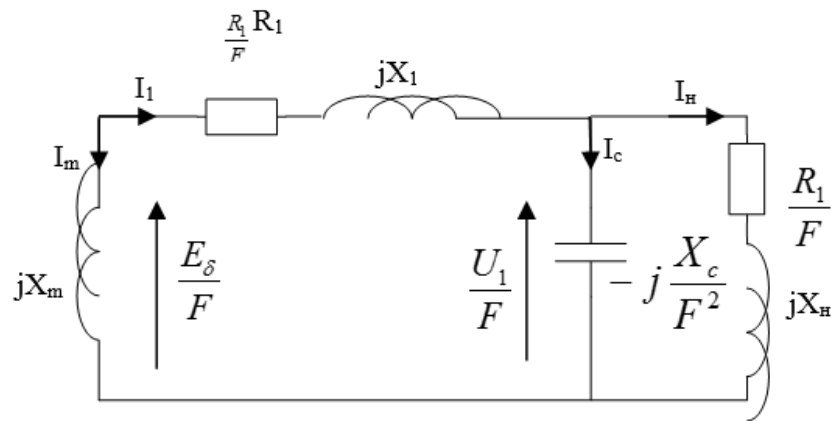


Рис. 3.33 Заступна схема СГПМ

На рис. 3.33 використані позначення:  $E_\delta$  – ЕРС (електрорушійна сила), індукована в обмотці якоря основним магнітним потоком;  $I_1$ ,  $U_1$  – струм і напруга обмотки якоря;  $R_1$ ,  $X_1$  – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки якоря;  $R_n$ ,  $X_n$  – активний та індуктивний опір навантаження;  $I_c$ ,  $X_c$  – струм в колі конденсатора та його опір;  $F$  – частота струму й напруги в обмотці статора;  $X_m$  – індуктивний опір взаємодукції, що є еквівалентним магнітним опором взаємодукції між потоком постійних магнітів та обмоткою якоря.

Всі індуктивні опори заступної схеми приведені до номінальної частоти обмотки статора  $F$  та відносної частоти обертання ротора генератора  $\omega$ . Також необхідно враховувати, що індуктивний опір намагнічування  $X_m$  є змінною величиною, яка залежить від величини  $E_\delta$ , при номінальній частоті  $F$ . Цей процес

залежить від параметрів електротехнічної сталі та описується кривою намагнічування, яка математично описується кубічним рівнянням:

$$\frac{E_\delta}{F}(X_m) = k_3 \cdot X_m^3 + k_2 \cdot X_m^2 + k_1 \cdot X_m + k_0 \quad (3.27)$$

У рівнянні коефіцієнти  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  та  $k_3$  обчислюються у системі відносних одиниць за відомими алгоритмами [4–6].

Для зручності обчислення необхідної величини розрахункової ємності СГПМ всі опори заступної схеми зводяться до трьох послідовно з'єднаних опорів  $Z_1$ ,  $Z_2$  та  $Z_3$ :

$$Z_1 = \frac{R_1}{F} + jX_1 \quad (3.28)$$

$$Z_2 = jX_m \quad (3.29)$$

$$Z_3 = \frac{\left(-\frac{jX_c}{F^2}\right)\left(\frac{R_H}{F} + jX_H\right)}{\left(-\frac{jX_c}{F^2}\right) + \left(\frac{R_H}{F} + jX_H\right)} \quad (3.30)$$

Рівняння відповідають спрощеній заступній схемі, що наведена на рис. 3.34.

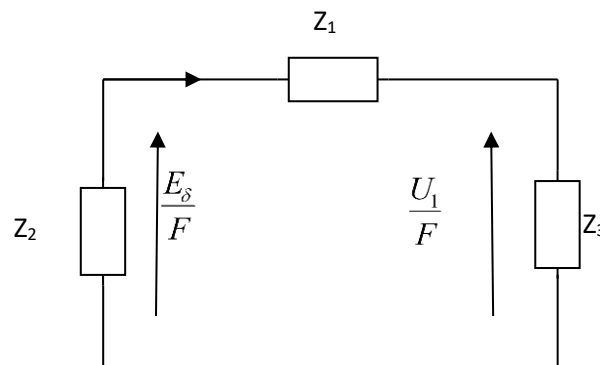


Рис. 3.34 Спрощена заступна схема СГПМ

Сумарний опір спрощеної заступної схеми СГПМ (рис. 3.34), відповідно до першого закону Кірхгофа, описується таким рівнянням:

$$Z_T = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (3.31)$$

$$I_1 \cdot Z_T = 0 \quad (3.32)$$

Після декількох математичних перетворень реальна та уявна частини повного опору  $Z_T$  розкладаються у систему з двох поліноміальних виразів:

$$\begin{cases} f_1 = \text{Im}(Z_T) = 0 \\ f_2 = \text{Re}(Z_T) = 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

Функції в системі рівнянь описуються такими виразами:

$$f_1 = a_1 F + a_2 F^2 + a_3 F^3 + a_4 F^4 + a_5 F^5 \quad (3.34)$$

$$f_2 = b_0 + b_1 F + b_2 F^2 + b_3 F^3 + b_4 F^4 \quad (3.35)$$

де коефіцієнти в рівнянні  $a_1 - a_5$  та  $b_1 - b_4$ :

$$a_1 = \varepsilon_6 X_C^2 - a_6 R_H^2; a_2 = -2\varepsilon_3 X_C^2 + R_H^2 a_2 X_C; a_3 = \varepsilon_3 X_C^2 - \varepsilon_4 X_C + \varepsilon_5; a_4 = 2(-\varepsilon_1 X_C - R_H^2 a_1); a_5 = \varepsilon_1 X_C + \varepsilon_2; \quad (3.36)$$

$$b_0 = \beta_4 a_5 X_C^2; b_1 = -\delta_1 X_C^2; b_2 = (R_H a_2 + \delta_2) X_C^2 + (2X_H \delta_3) X_C + \beta_5 a_4; \quad (3.37)$$

$$b_3 = (2X_H \delta_4) X_C - R_H^2 \delta_4; b_4 = -2\delta_5 X_C.$$

Значення всіх коефіцієнтів  $a_1 - a_6$ ,  $\varepsilon_1 - \varepsilon_6$ ,  $\beta_1 - \beta_5$  та  $\delta_1 - \delta_5$  визначаються за виразами:

$$a_1 = X_m^2 X_1; a_2 = X_m^2; a_3 = R_1^2 (1 + X_1); \quad (3.38)$$

$$a_4 = R_1^2 (X_m + X_1); a_5 = R_H^2 (X_m + X_1); a_6 = (R_H^2 + X_1);$$

$$\varepsilon_1 = (-a_2 - 2a_1 X_H); \varepsilon_2 = (a_1 X_H^2 + R_H^2 a_1); \varepsilon_3 = a_2 X_H + a_1; \quad (3.39)$$

$$\varepsilon_4 = [a_6 X_H^2 + (2a_1 X_H) + R_H^2 a_2]; \varepsilon_5 = R_H^2 (a_4 + a_1); \varepsilon_6 = (a_6 X_H + a_1);$$

$$\beta_1 = R_H X_m^2; \beta_2 = R_1 a_2; \beta_3 = R_H^2 R_1; \beta_4 = R_1^2 R_H; \beta_5 = R_H + R_1; \quad (3.40)$$

$$\delta_1 = (2a_2 \beta_5 + \beta_1); \delta_2 = (\beta_1 + \beta_2); \delta_3 = (\beta_2 + \beta_3); \quad (3.41)$$

$$\delta_4 = (\beta_1 + 2\beta_2); \delta_5 = (\beta_1 + \beta_2 X_H)$$

Вираз необхідно розв'язувати для випадку, коли відомі значення індуктивності взаємоіндукції  $X_m$  та невідомих значень опору додаткової ємності  $X_c$  при частоті струмів та напруги в обмотці якоря  $F$ . Враховуючи вищевикладене, отримаємо такий вираз:

$$f(X)=0, \quad (3.42)$$

де

$$\begin{aligned} f &= [f_1 \quad f_2]^T \\ X &= [X_c \quad F]^T \end{aligned} \quad (3.43)$$

Для розв'язку системи рівнянь використовується алгоритм Ньютона–Рафсона. Даний метод є найбільш простим та ефективним порівняно з іншими методами [7].

Для визначення необхідної величини ємності скористаємося спрощеною заступною схемою, згідно з якою напруга на затискачах обмотки статора СГПМ визначається як

$$U_1 = \frac{Z_3}{Z_3 + Z_1} E_\delta \quad (3.44)$$

Якщо прийняти за основу припущення, що напруга на затискачах обмотки статора генератора повинна бути номінальною, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} f_1 = \operatorname{Im}(Z_T) = 0 \\ f_2 = \operatorname{Re}(Z_T) = 0 \\ f_3 = \left| \frac{Z_3}{Z_3 + Z_1} \right| \cdot E_\delta - U_{1н} = 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

Для заданого режиму роботи та навантаження обмотки статора напруга обмотки статора залежить від величини ємності конденсатора  $X_c$  та від величини наведеної ЕРС в обмотці якоря потоком постійних магнітів ( $E_\delta$ ).

Для оцінки залежності ємності конденсатора  $C$ , що приєднується до затисків обмотки якоря генератора, прийняті такі припущення:

- швидкість вітру приймається постійною;
- швидкість обертання ротора генератора  $n$ , а отже, і частота  $f$  ЕРС та струмів генератора приймається постійною;
- для спрощення розрахунків приймається чисто активне навантаження генератора:  $Z_H = R_H$ ;
- напруга на затискачах генератора та його параметри приймаються постійними.

Враховуючи згадані вище припущення, умова для розрахунку ємності в разі шунтового приєднання складе:

$$\left| \frac{Z_3}{Z_3 + Z_1} \right| \cdot E_\delta - U_{1н} = 0 \quad (3.46)$$

Опори  $Z_1$  та  $Z_3$  визначаються в такий спосіб:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_3 &= -\frac{jX_C R_n}{R_n - jX_C} \end{aligned} \quad (3.47)$$

Після перетворень отримуємо вираз:

$$\frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} = \frac{-jX_C R_n}{-jX_C R_n + R_1 R_n - jX_C R_1 + jX_1 R_1 + X_1 X_C} \quad (3.48)$$

Підставивши вираз, отримаємо:

$$X_C = \frac{U_1 R_1 (R_n + jX_1)}{[U_1 X_1 + j(R_n U_1 + R_1 U_1 - R_n E_\delta)]} \quad (3.49)$$

З виразу визначається необхідна величина ємності конденсатора на одну фазу шляхом перетворення. Для цього необхідно визначити модуль комплексного числа. Після декількох математичних перетворень вираз набуває такого вигляду:

$$X_C = \frac{U_1^2 X_1 R_1 R_n + U_1 R_1 X_1 a}{U_1^2 X_1^2 + a^2} + j \frac{U_1^2 X_1^2 - U_1 R_1 R_n a}{U_1^2 X_1^2 + a^2} \quad (3.50)$$

З виразу визначається модуль комплексного числа  $X_C$ , з якого далі визначається величина додаткової ємності:

$$X_C = \sqrt{\left(\frac{U_1^2 X_1 R_1 R_n + U_1 R_1 X_1 a}{U_1^2 X_1^2 + a^2}\right)^2 + \left(\frac{U_1^2 X_1^2 - U_1 R_1 R_n a}{U_1^2 X_1^2 + a^2}\right)^2} \quad (3.51)$$

де  $a = R_n U_1 + R_1 U_1 - R_n E_\delta$

З виразу визначається величина додаткової ємності для системи підмагнічування згідно з виразом:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (3.52)$$

Згідно з виразом величина ємності залежить від параметрів обмотки якоря електрогенератора, величини взаємодукції, характеру та величини навантаження. Підставимо параметри досліджуваного генератора та визначимо величину розрахункової ємності при номінальному навантаженні. Параметри генератора та навантаження наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

## Параметри генератора та навантаження

Параметр	Значення	Одиниці виміру
$R_1$	8,8	Ом
$X_1$	6,9	Ом
$U_1$	24	В
$R_H$	33,0	Ом
$E_\delta$	26,4	В

$$X_C = \sqrt{\left(\frac{(24^2 \cdot 6,9 \cdot 8,8 \cdot 33 + 24 \cdot 8,8 \cdot 6,9 \cdot (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4))^2}{24^2 6,9^2 + (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4)^2}\right)^2 + \left(\frac{(24^2 6,9^2 - 24 \cdot 8,8 \cdot 33 \cdot (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4))^2}{24^2 6,9^2 + (33 \cdot 24 + 8,8 \cdot 24 - 33 \cdot 26,4)^2}\right)^2} = 99,21 \text{ Ом}} \quad (3.53)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = 32,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} \quad (3.54)$$

При постійній швидкості обертання ротора вітрогенератора та при заданій номінальній величині навантаження генератора розраховується значення ємності, необхідне для підтримки заданої величини напруги. Задаємось відхиленням напруги електрогенератора на його виході в межах +5 %, – 5 % від номінальної. При цьому рівняння необхідно розв'язувати за незмінних значень вихідної напруги  $U_{\max}$  та  $U_{\min}$ . Кожна розрахункова величина ємності дозволяє СГПМ працювати у фіксованому діапазоні потужності в межах заданої похибки за вихідною напругою. Розрахункові значення ємності, що забезпечують максимальне значення потужності при зміні навантаження та постійній швидкості вітру 5 м/с, наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Значення додаткової ємності для підтримки  $U_1 \approx U_n + 5\%, - 5\%$ 

Діапазон зміни потужності	$0 - P_0$	$P_0 - P_1$	$P_1 - P_2$	$P_3 - P_4$	$P_5 - P_6$
Діапазон потужності, Вт	0–17	17–36	36–58	58–77	77–86
Ємність збудження (аналітичний метод), мкФ	4,3	8,9	15,7	26,3	32,1
Ємність збудження (моделювання в MATLAB-Simulink), мкФ	4,056	8,72	16,5	27,17	30,68

Отже, наведені методичні положення дозволяють розрахувати доцільне значення ємності конденсаторів, що приєднуються до статора електрогенератора при постійній швидкості вітру та постійному навантаженні. В табл. 3.5 наведені результати розрахунку величини ємності, що приєднуються до статора генератора, при якій він віддає максимальну потужність за умови, що швидкість вітру постійна, 4 м/с, і постійне навантаження, 33,0 Ом.

Таблиця 3.5

Залежність максимальної потужності СГПМ від додаткової ємності

С, мкФ	0	11,3	30	100
Р, Вт	42	52,5	50,3	30,82

Для наочності дані із табл. 3.5, подано в графічному вигляді (рис. 3.35).



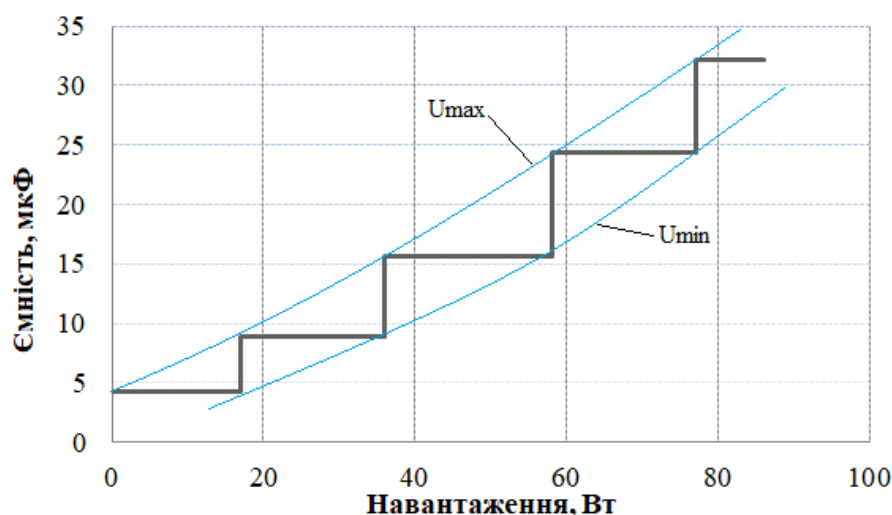


Рис. 3.35 Залежність ємності від навантаження при постійній напрузі

В такому разі необхідне ступінчасте регулювання вихідної напруги й потужності, що значно здорожує та ускладнює систему. Для оцінки вихідної потужності СГПМ при підмагнічуванні сторонньою ємністю використовується розроблена та описана в попередній роботі модель в системі MATLAB-Simulink[1]. З використанням цієї моделі проаналізовано залежність вихідної напруги та потужності досліджуваного генератора для швидкості вітру 4 м/с. На рис. 3.35 наведена залежність вихідної потужності досліджуваного генератора при різних значеннях додаткової ємності та постійної величини активного навантаження.

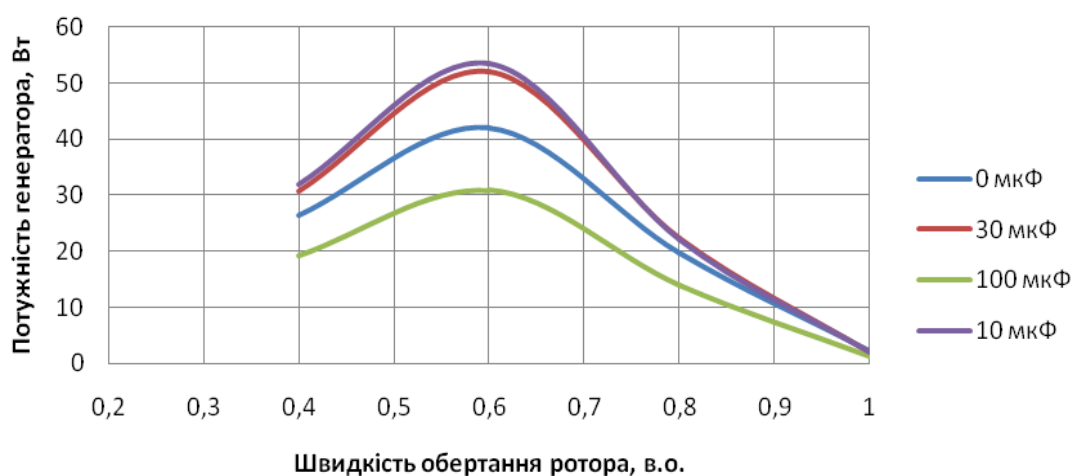


Рис. 3.36 Залежність потужності СГПМ від швидкості обертання ротора

Для зручності швидкість обертання ротора подана у в.о. На рис. 3.36 показано, що максимальне значення потужності генератора, 52 Вт, досягається при значенні ємності 10 мкФ, подальше збільшення ємності понад 30 мкФ призводить до поступового зниження активної потужності до 30 Вт при значенні ємності 100 мкФ. Зниження величини активної потужності при збільшенні величини додаткової ємності пояснюється насиченням магнітної системи генератора та збільшенням активних втрат в обмотці якоря, а отже, і падінням ККД.

На рис. 3.37 наведено залежність напруги на виході генератора при постійному навантаженні 33,0 Ом.

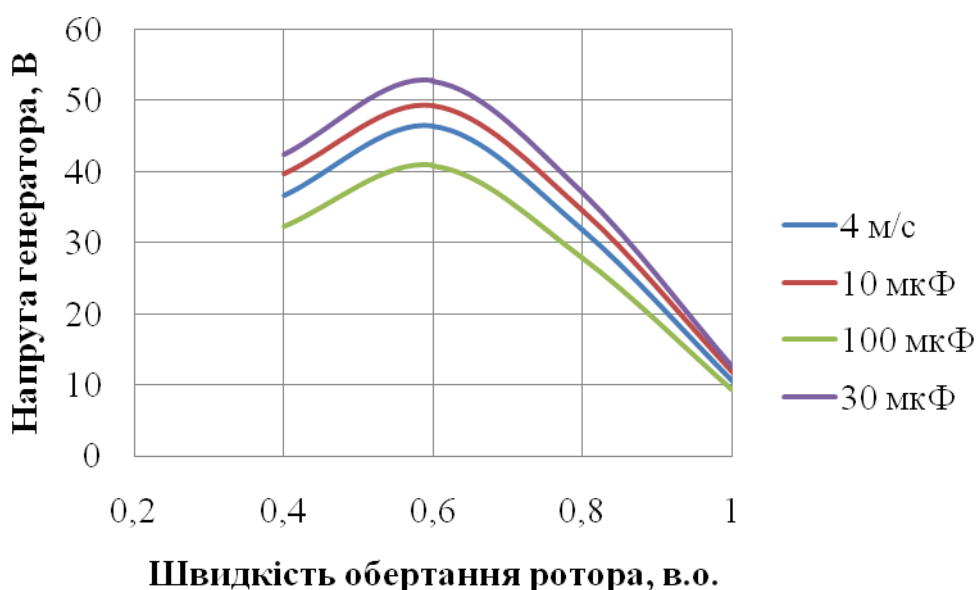


Рис. 3.37 Залежність напруги генератора від швидкості обертання ротора

Максимальне значення напруги на виході генератора, 53 В, спостерігається, коли приєднується підмагнічувальна ємність 30 мкФ, що відповідає заданому навантаженню. В разі приєднання ємності величиною в 10 мкФ напруга має дещо менше значення – 48 В. Це пояснюється тим, що при заданому навантаженні підмагнічувальної потужності конденсатора 10 мкФ не достатньо для компенсації розмагнічувальної реакції якоря. Подальше збільшення підмагнічувальної ємності не приводить до підвищення напруги, оскільки надлишок реактивної потужності перевантажує досліджуваний генератор з подальшим погіршенням всіх експлуатаційних характеристик.

### Висновки до розділу 3

1. Проведений аналіз та дослідження показали, що більш ефективним генератором для використання у складі безмультиплікаційної вітроелектричної установки є генератори торцевого типу із збудженням від постійних магнітів. Конструктивно даний тип генераторів мають більшу питому потужність, ніж традиційні циліндричні генератори при виконанні на потужності до 5-7 кВт. Крім того, торцеві генератори можливо виготовити багатополюсними, що особливо актуально для безмультиплікаційних вітроелектричних систем.

2. Розроблено числову математичну модель для дослідження параметрів та характеристик синхронного генератора із постійними магнітами, що враховує двосторонню активну зону статора та аеродинамічні параметри ротора вітротурбіни.

3. При низьких швидкостях вітру (3-5 м/с) напруга генератора знаходиться на рівні  $\approx 5-10$  В, це пояснюється аеродинамічними параметрами ротора та параметрами електрогенератора. При більших значеннях швидкості вітру (6-7 м/с) мінімальне значення напруги на виході генератора становить  $\approx 5$  В і досягає свого максимуму у 18 В та 26 В при збільшенні швидкості обертання генератора, що пояснюється зростанням ЕРС обертання, з подальшим падінням напруги до 6 В та 16 В відповідно із зростанням аеродинамічних втрат в роторі вітроагрегату.

4. Розроблено імітаційну математичну модель корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора з двостороннім розташуванням постійних магнітів на роторі та аксіальним магнітним потоком, що працює у складі безмультиплікаційної вітроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру.

5. Проведено дослідження способів корекції вихідної потужності генератора безмультиплікаційної вітроустановки. При підключенні конденсаторів до затискачів генератора спостерігається збільшення вихідної потужності на  $\approx 5-10\%$ . Водночас, напруга на затискачах, при цьому, зменшується в 1,8 рази, що пояснюється падінням напруги на внутрішніх опорах генератора та ростом активної та реактивної складової струму якоря генератора  $\approx 2,2$  рази.

6. Більш ефективним способом корекції вихідної потужності є використання додаткової підмагнічуючої обмотки магнітоелектричного генератора. При подачі напруги на обмотку збудження  $U_f=8$  В спостерігається приріст вихідної потужності генератора  $\approx 30-40\%$  ніж без регулювання.

7. Результати моделювання механічних характеристик вітрової турбіни та генератора підтверджують адекватність розробленої моделі та достовірність отриманих результатів, що дозволяє використовувати дану модель для подальших досліджень та оцінки ефективності методів та засобів підвищення ефективності перетворення енергії вітру.

8. Розроблено математичну модель для оцінки величини ємності конденсаторів для впливу на ефективне перетворення механічної енергії вітрового потоку на електричну. Встановлено, що величина ємності залежить від параметрів обмотки якоря електрогенератора, величини взаємодукції, характеру та величини навантаження. Для досліджуваного генератора значення ємності лежать в межах від  $4,3 - 32,1$  мкФ для чисто активного навантаження та для діапазону потужності  $0 - 87$  Вт.

9. За допомогою розробленої моделі в системі MATLAB-Simulink проведено оцінку впливу додаткової ємності, що використана для процесу підмагнічування генератора на величину потужності та вихідної напруги генератора при зміні швидкості обертання ротора вітроагрегату та постійній швидкості вітру. Для швидкості вітру  $4$  м/с при приєднанні ємності  $10$  мкФ спостерігається робота генератора при максимальній потужності в порівнянні із ємністю  $30$  мкФ та  $100$  мкФ. На відміну від ємності  $30$  мкФ і  $100$  мкФ, в разі приєднання ємності  $10$  мкФ для швидкості вітру  $4$  м/с генератор працює з максимальною потужністю.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА З ДВОСТОРОННІМ РОЗТАШУВАННЯМ МАГНІТІВ РОТОРА БЕЗМУЛЬТИПЛІКАЦІЙНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ

#### 4.1 Визначення параметрів та розробка стенду для експериментальних досліджень генератора безмультиплікаційної вітроелектроустановки

Метою розробки стенду є експериментальна перевірка результатів, що отримані при математичному та імітаційному моделюванні роботи генератора вітроустановки торцевого типу із збудженням від постійних магнітів та додатковою обмоткою підмагнічування. При цьому досліджувалися основні вихідні параметри та характеристики генератора: вихідна напруга; робочий струм якоря; вихідна активна потужність якоря генератора.

Для виконання поставленої мети, розроблено експериментальний стенд, структурна схема якого подана на рис. 4.1.

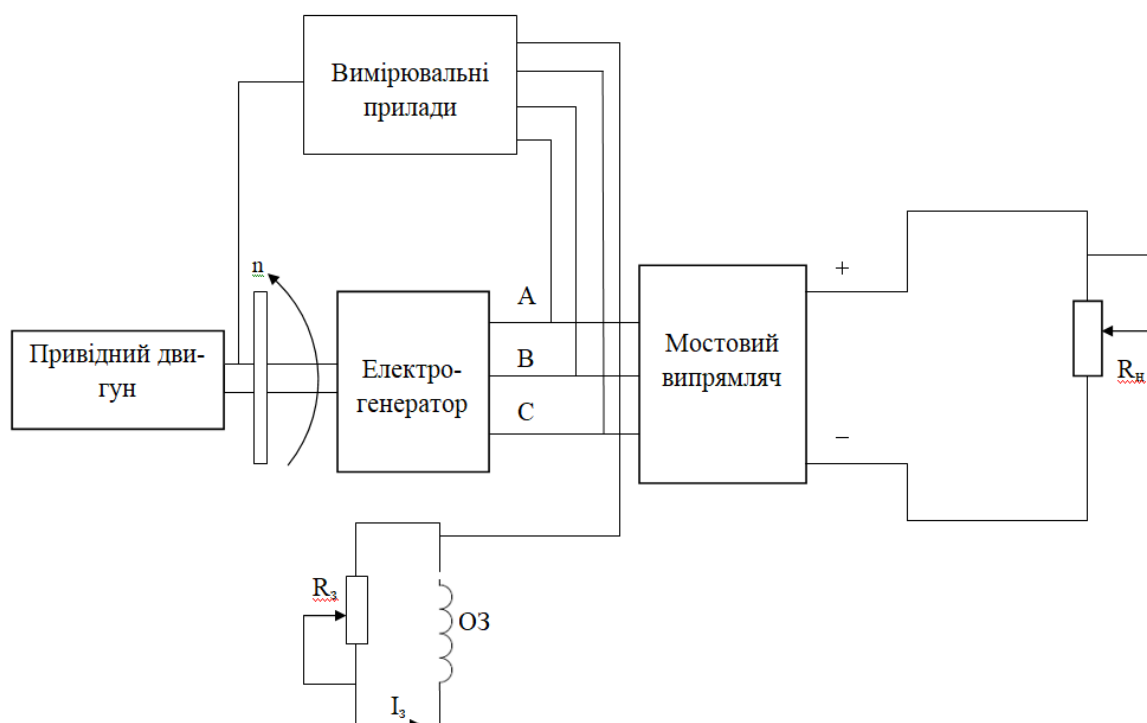


Рис. 4.1 Структурна схема експериментального стенду

До складу стенду входить: привідний двигун постійного струму із незалежним збудженням; цифровий вимірювач швидкості обертання валу ротора генератора; трифазний торцевий магнітоелектричний генератор; вимірювальних приладів, що здійснюють контроль електричних параметрів генератора, привідного двигуна, навантаження та додаткової обмотки, що підмагнічує; трифазного мостового випрямляча; навантаження; комплекту ємності, що впливають на процес підмагнічування; систему керування струмом збудження привідного двигуна та додатковою обмоткою, що підмагнічує.

Загальний вигляд експериментального стенду наведено на рис. 4.2.



Рис. 4.2 Загальний вигляд експериментального стенду:

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.

Як випрямлячі використані мости Ларіонова для симетричного приєднання 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 зусилля від привідного двигуна до генератора здійснюється за рахунок пасової передачі та системи шківів із передавальним числом 1:5.

## **4.2 Аналіз структурної схеми автономної роботи вітроелектроустановки з ємнісною корекцією потужності генератора**

### **4.2.1 Аналіз експериментальних результатів ємнісної корекції потужності генератора**

#### **4.2.1.1 Експериментальні дослідження характеристик торцевого магнітоелектричного генератора для вітроустановки в режимі холостого ходу**

Режим холостого ходу електрогенератора у складі вітроустановки характеризує діапазон можливості його регулювання, ступінь насичення магнітної системи.

Досліджувалось три режими роботи магнітоелектричного генератора:

- 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. 4.3 наведена характеристика холостого ходу генератора за різних значень швидкості обертання валу генератора.

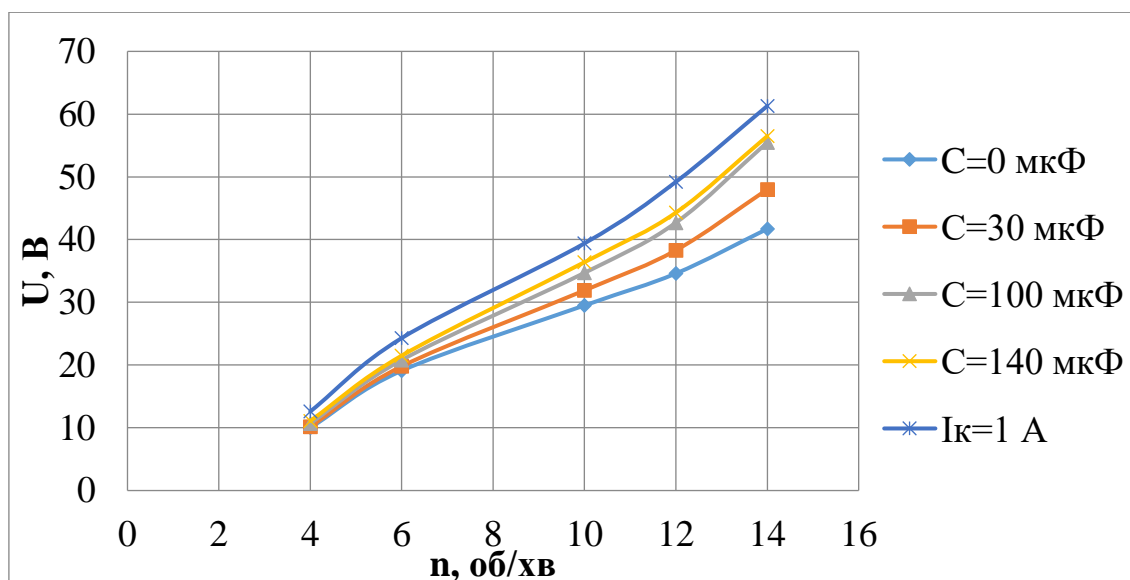


Рис. 4.3 Характеристика холостого ходу генератора за різних значень швидкості обертання валу генератора

Очевидно, що характеристика генератора без регулювання має найнижчі значення величини напруги. При збільшенні швидкості обертання ротора генератора напруга на виході генератора збільшується лінійно за рахунок збільшення ЕРС обертання, що наводиться в обмотці якоря генератора. При збільшенні величини ємності, що впливає на підмагнічування, напруга починає зростати за рахунок збільшення основного магнітного потоку. Однак, при подальшому збільшенні величини такої ємності (при  $C > 100 \mu\text{кФ}$ ) 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 напруги, 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. 4.4.



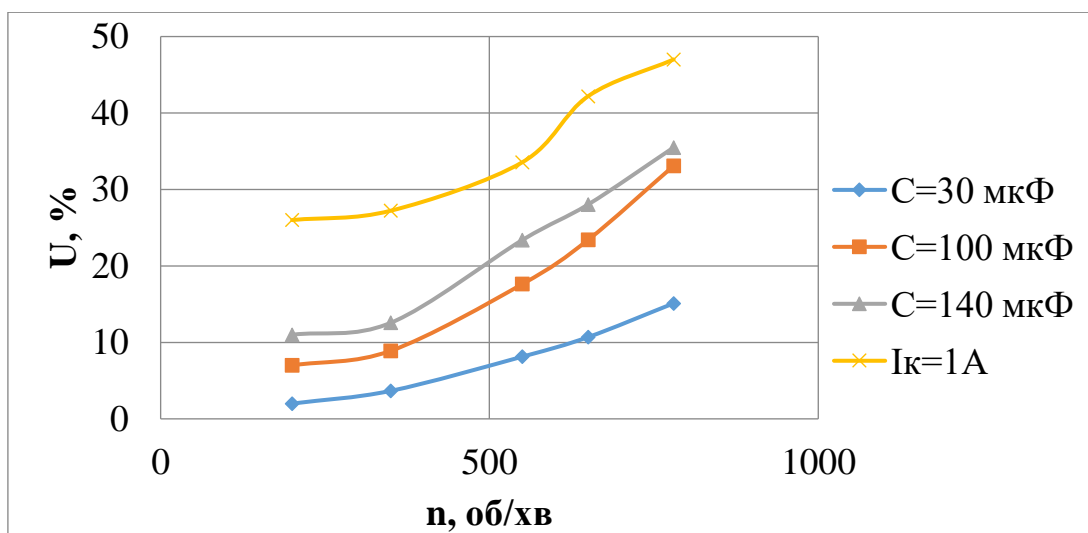


Рис. 4.4 Відносна величина зміни напруги за холостого ходу

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  $C=30\text{мкФ}$ ) до 47 % (при швидкості 780 об/хв та подачі струму на додаткову обмотку  $I_k=1\text{A}$ ). 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 холостого ході додаткових електричних втрат (на активних та реактивних опорах).

При приєднанні додаткової ємності до обмотки якоря генератора та подальшому підмагнічуванні обмотки якоря виникає реактивний струм, що протікає обмоткою якоря генератора (рис. 4.5).

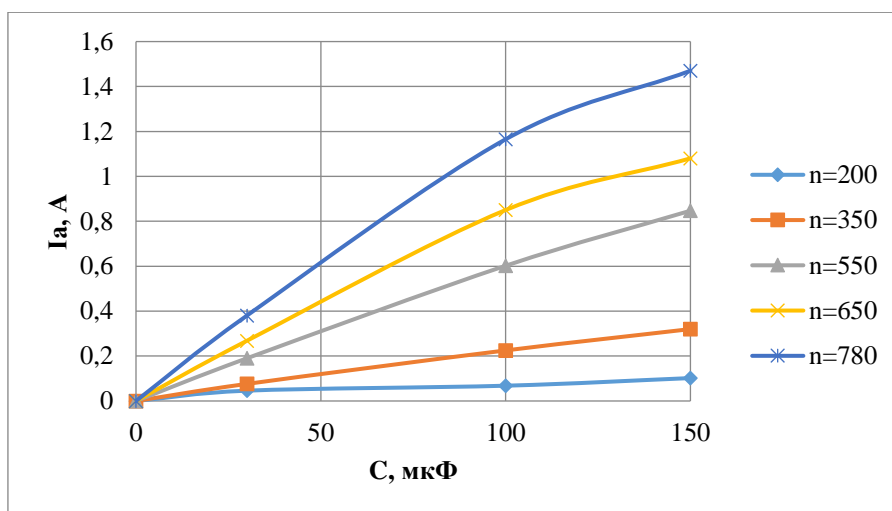


Рис. 4.5 Залежність струму в обмотці якоря генератора від ємності при холостому ході

Характер відображених на рис. 4.5 функцій носить практично лінійну залежність. При збільшенні швидкості обертання ротора генератора та величини додаткової ємності, магнітна система генератора переходить в режим насичення, при цьому спостерігається "злам" характеристики при  $n=780$  об/хв. За постійної швидкості обертання реактивний струм в обмотці якоря збільшується тим більше, чим більше швидкість обертання та величина додаткової ємності. Збільшення струму в обмотці якоря в режимі холостого ходу з ростом швидкості обертання валу ротора генератора пояснюється зменшенням ємнісного опору (що відбувається при збільшенні частоти процесів в обмотці якоря), повного імпедансу і як наслідок росту струму якоря при певній напрузі.

Підмагнічування генератора сторонньою ємністю призводить до появи певного рівня активної потужності, що реєструється цифровим вимірювальним приладом. Це підтверджується відповідними результатами експериментальних досліджень (рис. 4.6).

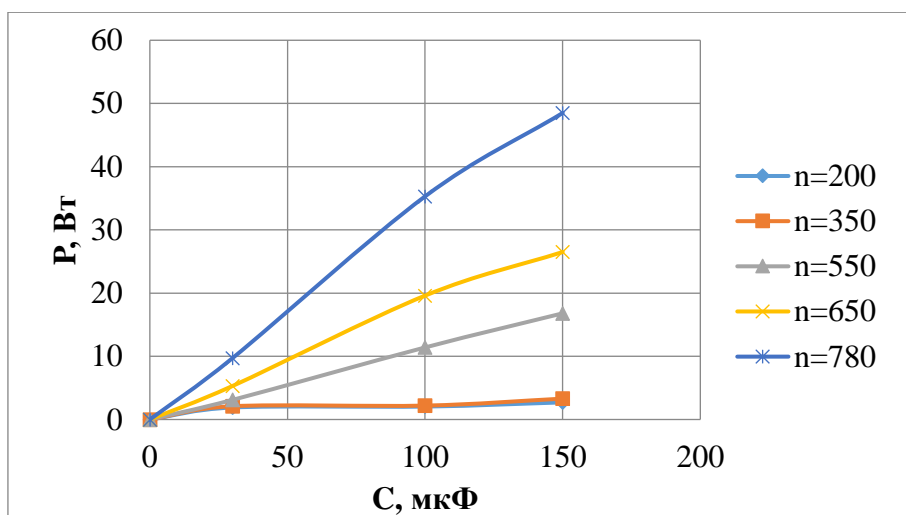


Рис. 4.6 Потужність на затискачах генератора при підмагнічуванні сторонньою ємністю

За рис. 4.6 можливо зробити висновок: підмагнічування магнітоелектричного генератора за допомогою сторонньої ємності 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 вітротурбіни навіть в режимі холостого ходу.

При збільшенні швидкості обертання ротора генератора та при збільшенні величини сторонньої ємності вихідна потужність генератора збільшується. За однакової величини ємності (наприклад,  $C=100\text{ мкФ}$ ) величина вихідної потужності відрізняється на 15,7 Вт (для швидкостей 650 об/хв та 780 об/хв), що пояснюється ростом напруги обмотки якоря генератора та реактивної потужності ємності.

На рис. 4.7 наведена залежність вихідної напруги генератора при застосуванні сторонньої ємності різної величини та при різній швидкості обертання ротора генератора.

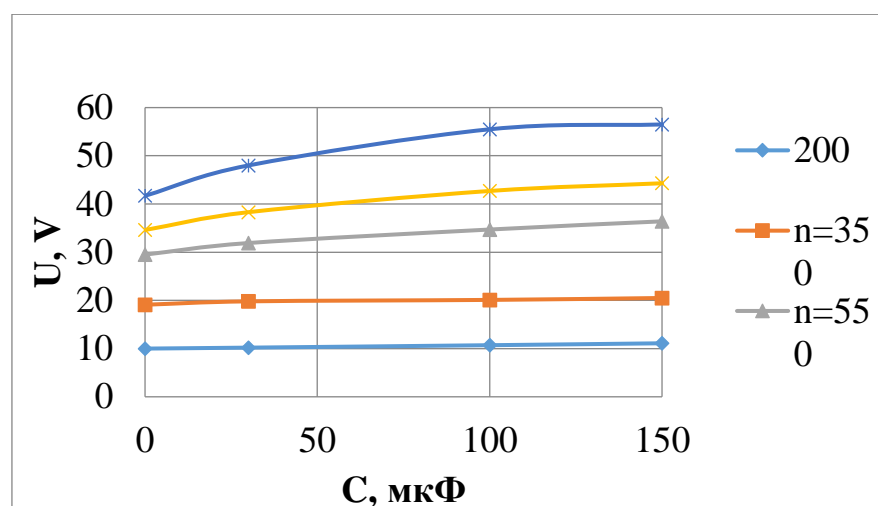


Рис. 4.7 Залежність вихідної напруги генератора від величини додаткової ємності

З рис. 4.7 видно, що при збільшенні швидкості обертання ротора генератора та при збільшенні величини ємності зростає величина вихідної напруги на обмотці якоря генератора. Це пояснюється підсиленням основного магнітного потоку за рахунок реактивної потужності конденсаторів з одночасним збільшенням ЕРС обертання.

На рис. 4.8 наведена характеристика холостого ходу генератора при подачі напруги на обмотку підмагнічування за різної швидкості обертання: 200 об/хв, 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв.

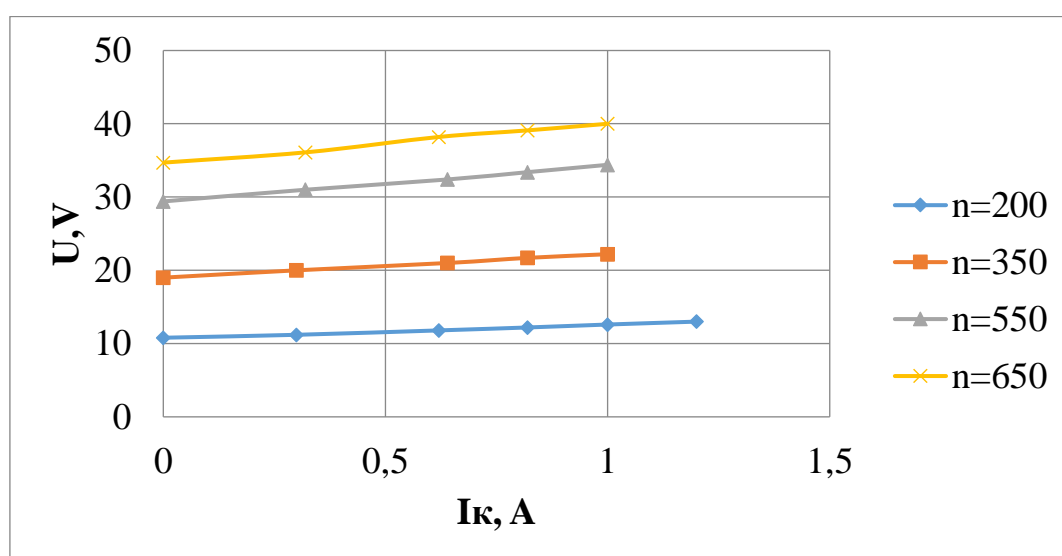


Рис. 4.8 Характеристика холостого ходу при підмагнічуванні додатковою обмоткою

При збільшенні швидкості обертання збільшується ЕРС обертання, відповідно і величина напруги на виході генератора. При подачі струму на додаткову обмотку відбувається підсилення основного магнітного потоку, що призводить до підвищення напруги на виході генератора. Максимальне підвищення напруги відбувається при швидкості обертання ротора 650 об/хв і складає 15,3 В. При швидкості обертання ротора генератора 200 об/хв та при струмі в обмотці  $I_K=0$  А напруга на затискачах генератора становить 10,8 В, однак при подачі струму на обмотку  $I_K=1$  А напруга збільшується на 1,8 В або на 17%.

Важливою перевагою регулювання параметрами та характеристиками магнітоелектричного генератора із постійними магнітами у складі вітроустановки за допомогою обмотки підмагнічування – відсутність активної потужності за холостого ходу.

#### **4.2.1.2 Експериментальні дослідження магнітоелектричного генератора при роботі під навантаженням**

Експериментальні дослідження магнітоелектричного генератора проведені при роботі його на активне навантаження, що відповідно склало 0,2А; 0,5А та 1А на кожну фазу трифазного генератора.

Залежність вихідної потужності генератора за підмагнічування сторонньою ємністю від швидкості обертання ротора та за постійного активного навантаженні наведена на рис. 4.9.

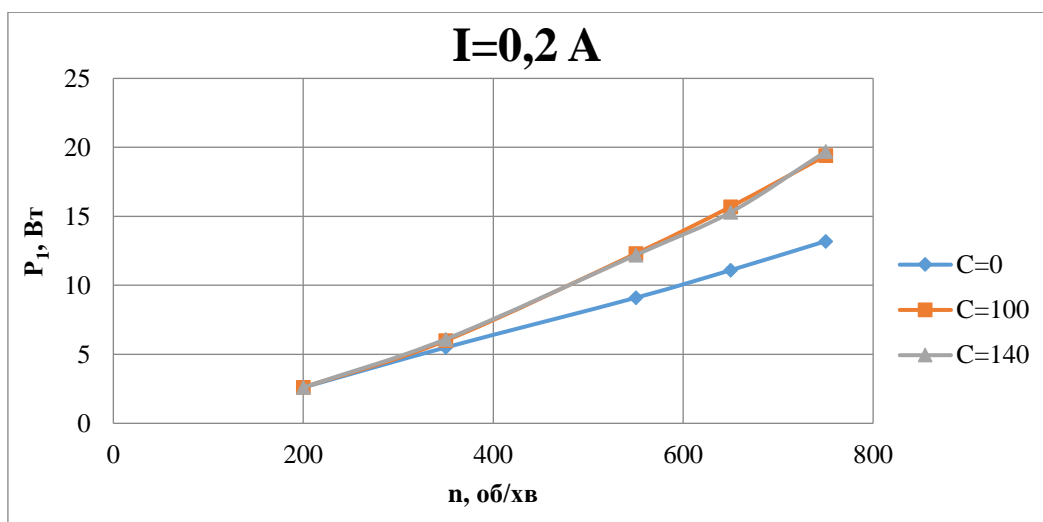


Рис. 4.9 Залежність вихідної потужності від швидкості обертання

З рис. 4.9 видно, що при збільшенні швидкості обертання величина активної потужності на затискачах генератора зростає. З іншого боку, при підмагнічуванні сторонньою ємністю напруга також зростає тим більше чим більше швидкість обертання. Збільшення величини ємності  $>100\mu\text{кФ}$  не супроводжується подальшим ростом величини вихідної потужності, що пояснюється ростом активних втрат в обмотці якоря генератора та насиченням магнітного осердя. При номінальній швидкості обертання генератора та ємності  $C=100\mu\text{кФ}$  спостерігається збільшення вихідної потужності на 6,5 Вт, що відповідає росту потужності на 47%.

Збільшення вихідної потужності генератора під навантаженням пояснюється підсиленням основного магнітного потоку за рахунок впливу ємності. Це призводить до росту напруги та струму на затискачах генератора. Зміна напруги при підмагнічуванні сторонньою ємністю наведена на рис. 4.10.

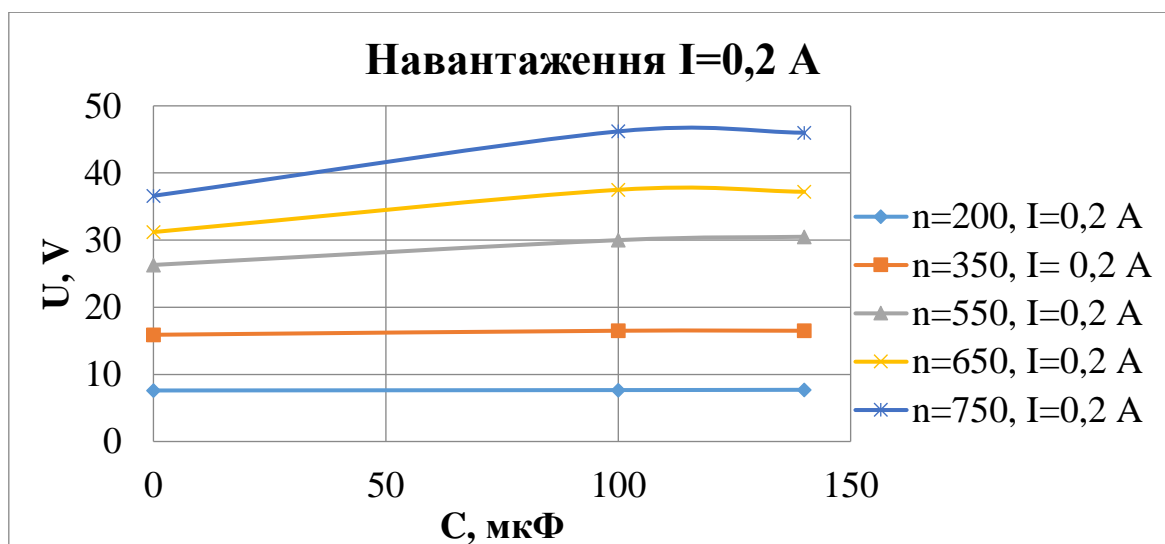


Рис. 4.10 Вплив величини сторонньої ємності на вихідну напругу

З рис. 4.10 видно, що при швидкості обертання валу ротора генератора вихідна напруга практично не змінюється при підмагнічуванні сторонньою ємністю. Це пояснюється низькою величиною потужності додаткового конденсатора, що застосовується для підмагнічування, при низьких частотах струму обмотки якоря генератора. При збільшенні швидкості обертання до 350 об/хв та підмагнічуванні генератора  $C=100 \text{ мкФ}$  спостерігається збільшення вихідної напруги генератора на 3,8%. При швидкості обертання 750 об/хв спостерігається приріст вихідної напруги генератора на 26%.

При низьких швидкостях ( $\leq 200$  об/хв) обертання потужність конденсатора, що застосовується для підмагнічування, майже не впливає на величину струму в обмотці якоря генератора. При збільшенні швидкості обертання валу ротора вітротурбіни збільшується частота струму обмотки якоря, а отже і величина реактивного струму підмагнічування. Це призводить до підвищення струму в обмотці якоря при підмагнічуванні ємністю  $C=100 \text{ мкФ}$  на 40%, 277%, 390%, 496% при швидкості обертання ротора 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв та 750 об/хв відповідно. Підвищення струму відбувається відносно постійної активної складової струму навантаження, що становить 0,2 А при початку дослідів. Не дивлячись на значне збільшення струму в обмотці якоря генератора, абсолютне значення струму не перевищує номінальне значення.

На рис. 4.11 наведена залежність вихідної активної потужності генератора при приєднанні до обмотки якоря ємності  $C=30\text{мкФ}$ ,  $100\text{мкФ}$  та  $140\text{мкФ}$  та постійному активному навантаженні  $0,2\text{ А}$ .

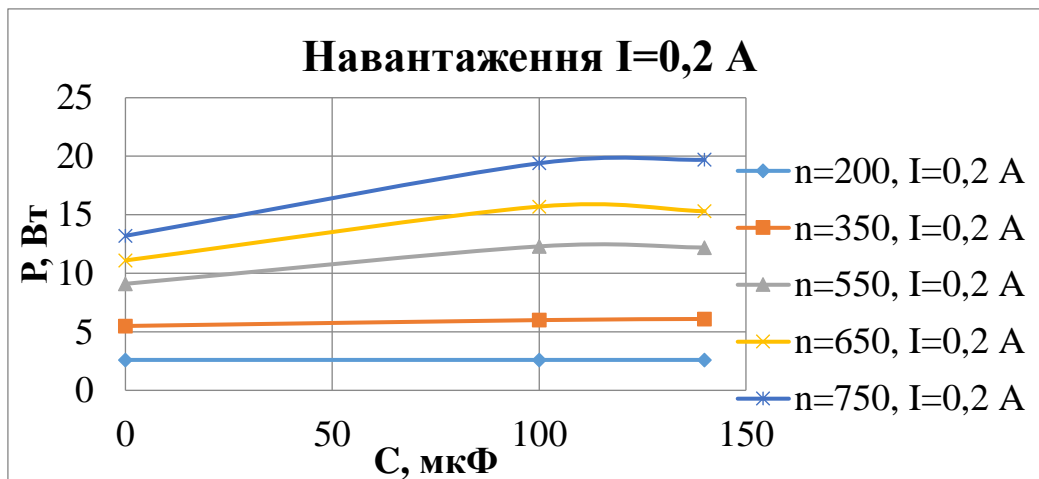


Рис 4.11 Залежність вихідної потужності генератора при приєднанні сторонньої ємності

Згідно з рис. 4.11, при швидкості обертання  $\leq 200\text{ об/хв}$ . Практично не відбувається регулювання вихідної потужності магнітоелектричного генератора. Це пояснюється незначним ростом вихідної напруги та струму в обмотці якоря генератора. При збільшенні швидкості обертання  $\geq 350\text{ об/хв}$ , глибина регулювання залежить від швидкості обертання ротора вітротурбіни і за результатами експериментальних досліджень становить: 9% при 350 об/хв; 35% при 550 об/хв; 41,4% при 650 об/хв; 46,9% при 750 об/хв. Отримані результати пояснюються збільшенням напруги на затискачах генератора та активної складової струму в обмотці якоря. Збільшення вихідної потужності при рості швидкості обертання ротора співпадає із класичною теорією електромашин.

Аналогічні експериментальні дослідження проведені за постійного активного навантаження генератора  $0,5\text{ А}$  та при приєднанні додаткової ємності  $C=30\text{мкФ}$ ,  $100\text{мкФ}$  та  $140\text{мкФ}$ .

На рис. 4.12 наведена залежність вихідної напруги магнітоелектричного генератора від величини додаткової ємності.



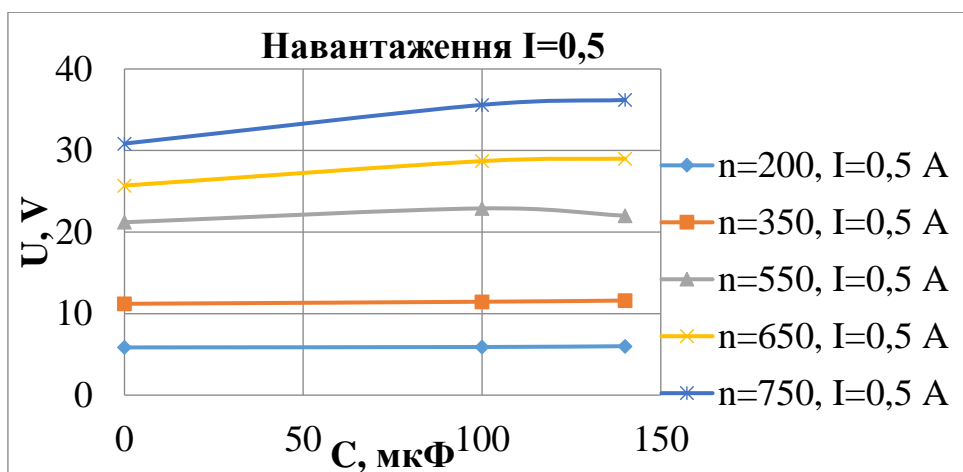


Рис. 4.12 Залежність напруги генератора від величини приєднаної ємності за  $I=0,5 \text{ A}$

З рис. 4.12 видно, що при збільшенні швидкості обертання та величини приєднаної ємності напруга на затискачах генератора зростає. За  $C > 100 \text{ мкФ}$  напруга зменшується, що пояснюється збільшенням падіння напруги на внутрішніх активних та індуктивних опорах генератора. Відносне зростання напруги на затискачах генератора при підмагнічуванні приєднаною ємністю для швидкості обертання 200 об/хв, 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв, 750 об/хв складає: 1%, 2,2%, 8%, 11,6% та 15,4% відповідно.

На рис. 4.13 наведено залежність вихідної потужності генератора при підмагнічуванні приєднаною ємності за різної швидкості обертання: 200 об/хв, 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв та 750 об/хв.

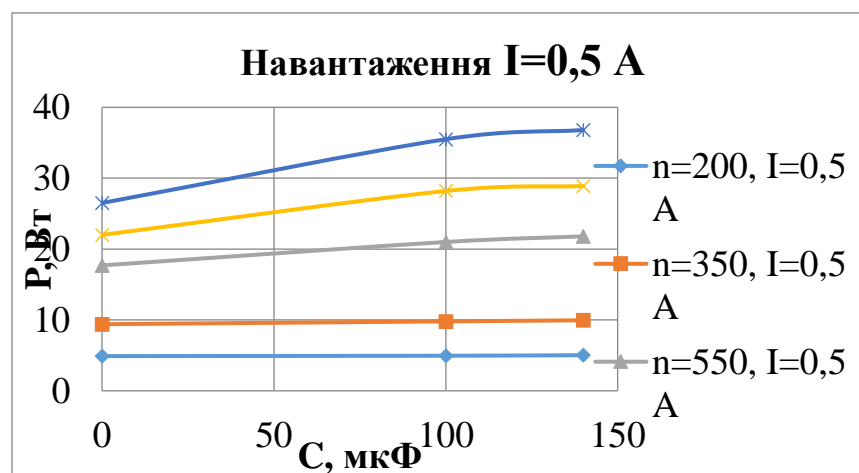


Рис. 4.13 Залежність вихідної потужності від величини приєднаної ємності

З рис. 4.13 можливо зробити висновок, що при збільшенні швидкості обертання  $\geq 350$  об/хв, аналогічно із навантаженням  $I=0,2$  А, глибина регулювання залежить від швидкості обертання ротора вітротурбінни і за результатами експериментальних досліджень, для навантаження  $I=0,5$  А становить: 4,2% при 350 об/хв; 18,6% при 550 об/хв; 28,2% при 650 об/хв; 33,96% при 750 об/хв. Отримані значення глибини регулювання менші значень, ніж при навантаженні  $I=0,2$  А, що пояснюється збільшенням втрат.

На рис. 4.14 наведена залежність вихідної напруги магнітоелектричного генератора від величини додаткової приєднаної ємності при постійному активному навантаженні генератора  $I=0,8$  А.

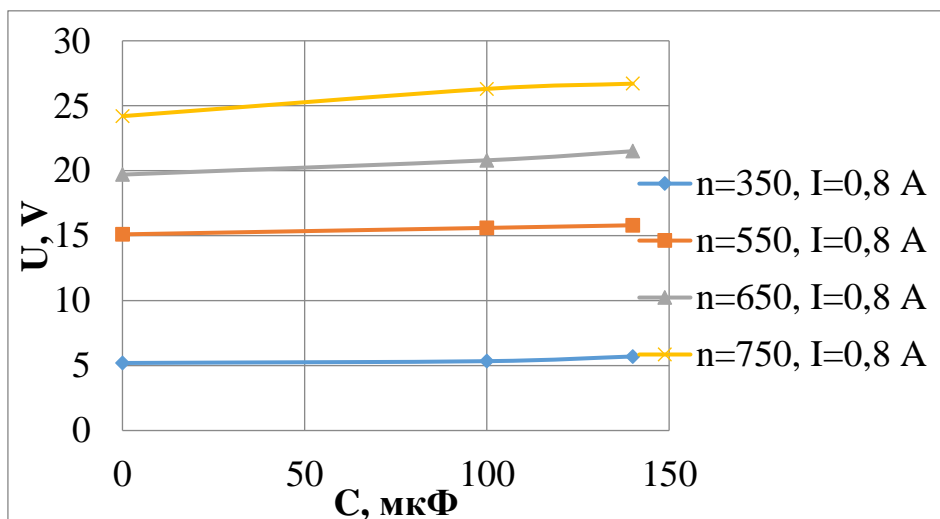


Рис. 4.14 Залежність напруги генератора від величини приєднаної ємності при  $I=0,8$  А

Із рис. 4.14 видно, що при збільшенні швидкості обертання та величини приєднаної ємності напруга на затискачах генератора зростає. Приріст напруги при збільшенні постійного за величиною навантаження зменшується, що пояснюється збільшеними активними втратами та збільшенням дії реакції розмагнічування якоря. Відносне зростання напруги на затискачах генератора при підмагнічуванні приєднаної ємністю  $C=100$  мкФ для швидкостей обертання 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв, 750 об/хв складає: 2,7%, 3,3%, 5,6% та 8,7% відповідно.

Відносне зростання струму на затискачах генератора при підмагнічуванні приєднаної ємністю для швидкості обертання 350об/хв, 550об/хв, 650об/хв, 750об/хв складає: 7,9%, 15%, 19,3% та 32,9% відповідно. При збільшенні постійного навантаження на затискачах генератора та підмагнічуванні приєднаною ємністю струм в обмотці якоря зростає за рахунок збільшення реактивної складової.

На рис. 4.15 наведена залежність вихідної потужності генератора при підмагнічуванні приєднаною ємністю за різною швидкості обертання: 350 об/хв, 550 об/хв, 650 об/хв та 750 об/хв. Дослід виконувався при постійному навантаженні генератора  $I=0,8$  А.

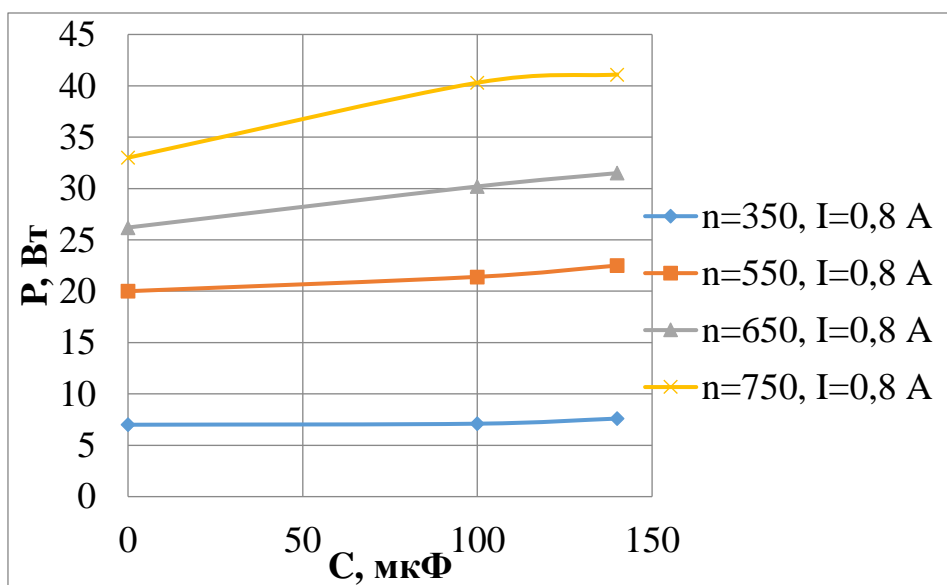


Рис. 4.15 Залежність вихідної потужності від величини приєднаної ємності

З рис. 4.15 можливо зробити висновок, що при збільшенні швидкості обертання  $\geq 350$  об/хв, аналогічно із попередніми навантаженнями, глибина регулювання залежить від швидкості обертання ротора вітротурбіни 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. 4.1 наведено порівняння експериментальних значень глибини регулювання потужності генератора за різної величини активного навантаження генератора  $I=0,2\text{ A}; 0,5\text{ A}; 0,8\text{ A}$ .

Таблиця 4.1

**Порівняння отриманих результатів регулювання потужності за різної величини навантаження**

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 можливості маневрування вітроустановки. Однак, використання додаткових приєднаних конденсаторів збільшує навантаження на ротор вітротурбіни, збільшує втрати в генераторі, зменшує його загальний ККД та дозволяє ступінчасте регулювання вихідних параметрів.

### **4.3 Аналіз структурної схеми автономної роботи вітроелектроустановки з корекцією потужності генератора додатковою обмоткою підмагнічування**

#### **4.3.1 Аналіз експериментальних результатів корекції потужності генератора додатковою обмоткою підмагнічування**

Програма експериментальних досліджень при використанні додаткової обмотки підмагнічування включає наступне:

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

На рис. 4.19 показано результати експериментальних досліджень магнітоелектричного генератора при використанні обмотки підмагнічування при постійному активному навантаженні та різній швидкості обертання.

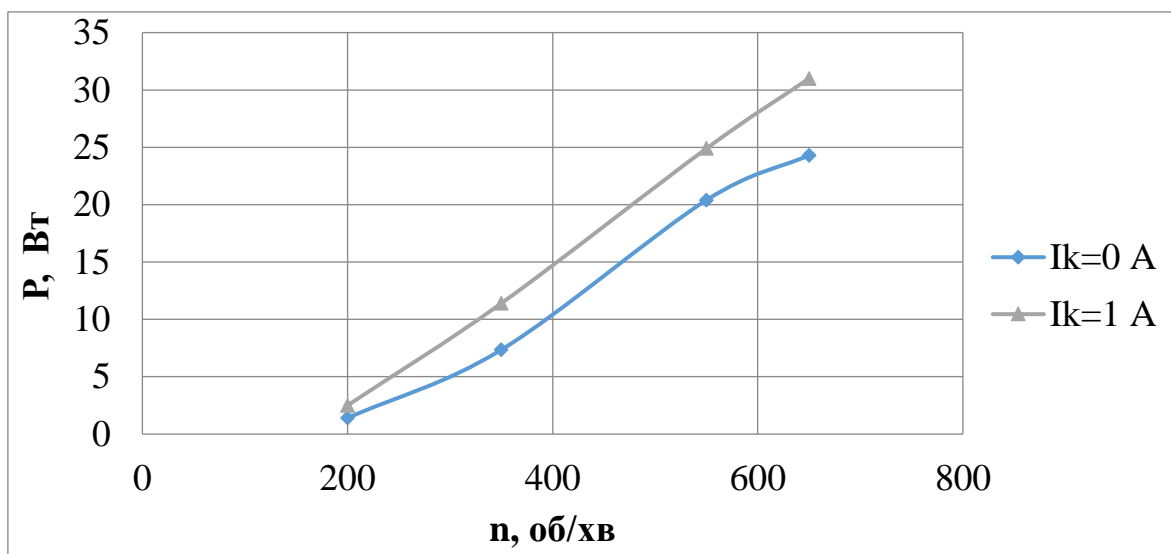


Рис. 4.16 Залежність вихідної потужності від швидкості обертання при застосуванні обмотки підмагнічування

При проведенні дослідів, результати якого наведені на рис. 4.16, 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 реакції розмагнічування якоря. Це призводить до зменшення глибини регулювання при збільшенні швидкості обертання ротора.

За підтримки постійної величини напруги на затискачах генератора, наприклад при живленні споживачів, для яких критичне значення вихідної напруги, залежність вихідної потужності від струму керування має вигляд, як наведено на рис. 4.17.

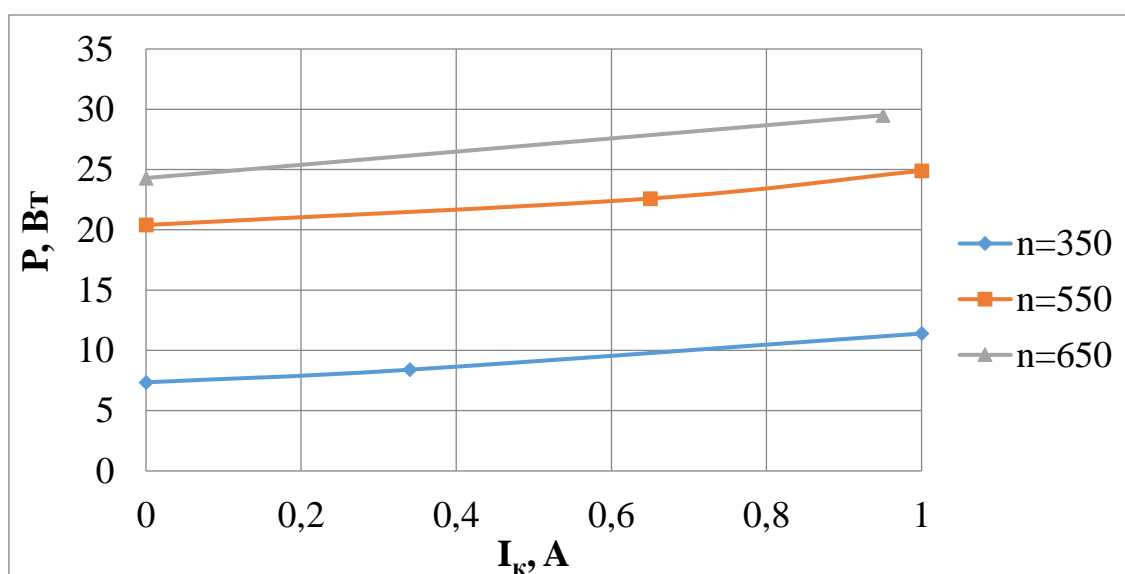


Рис. 4.17 Залежність вихідної потужності від струму обмотки підмагнічування

Експериментальні дослідження, результати яких наведені на рис. 4.18, проводились для трьох значень швидкості обертання ротора, при цьому величина струму в обмотці змінювалась таким чином, щоб підтримувати  $U_1 = \text{const}$ .

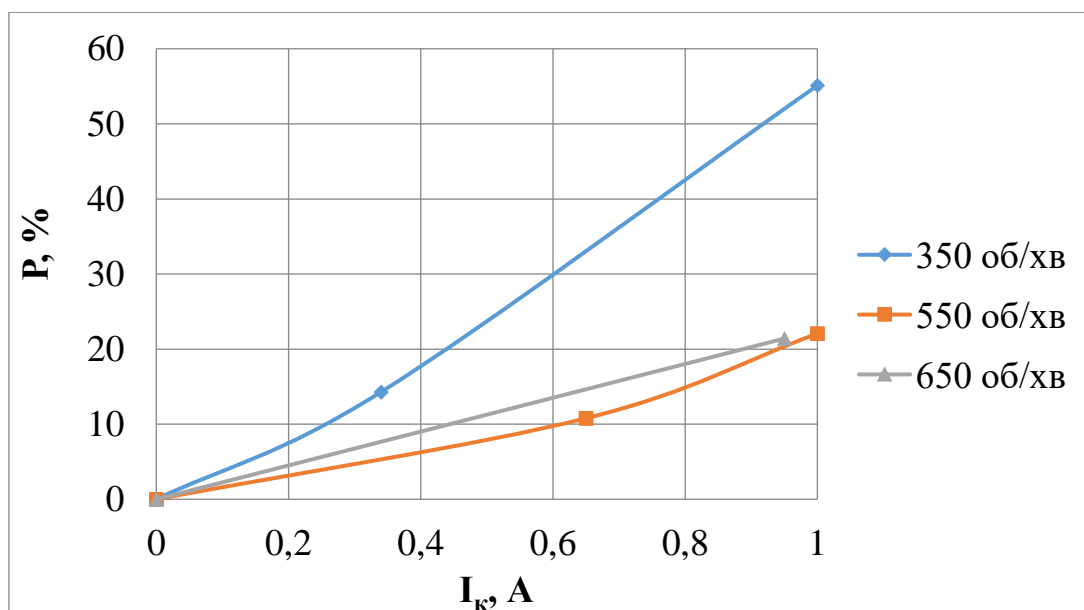


Рис. 4.18 Глибина регулювання при  $U_1 = \text{const}$

З рис. 4.18 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  $I_k = 1$  A. 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  $I_k = 1$  A.

При підтримці постійної напруги  $U_1 = \text{const}$  на затискачах генератора вдається збільшити величину потужності, що приймається від ротора вітротурбіни (на рис. 4.19).

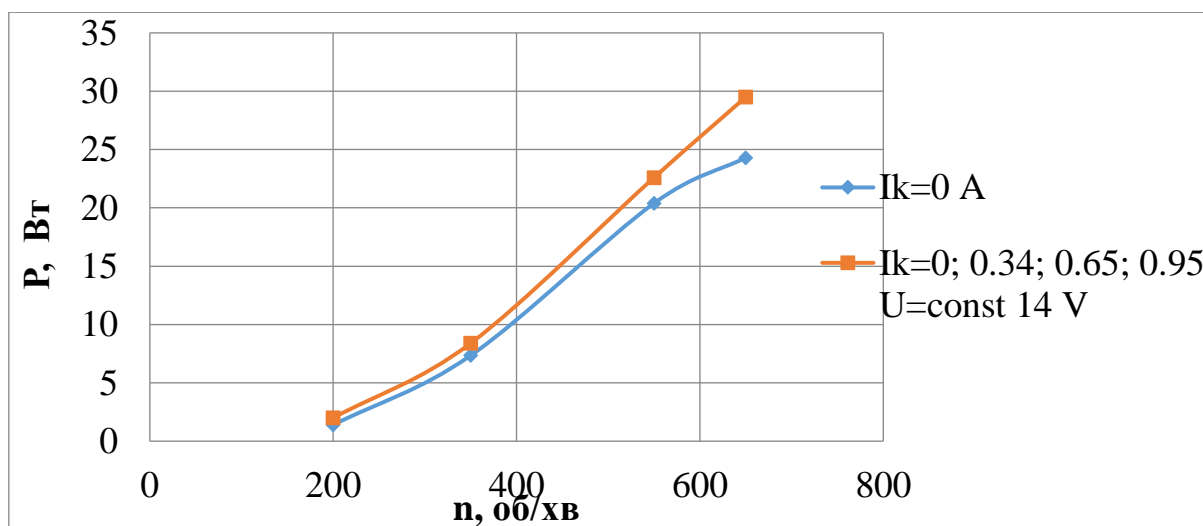


Рис. 4.19 Залежність вихідної потужності від обертів ротора при  $U_1 = \text{const}$

При регулюванні струму додаткової обмотки за умови  $U_1 = 14,4 \text{ В} = \text{const}$  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.

#### 4.3.2 Порівняльний аналіз результатів експерименту та імітаційного моделювання корекції потужності генератора

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

Експериментальні дослідження проведені із використанням виготовленого прототипу магнітоелектричного генератора із аксіальним магнітним потоком. Порівняння результатів імітаційного моделювання та експериментальних досліджень проводиться із використанням параметрів електрогенератора, що наведені в табл. 4.2.



Таблиця 4.2

**Основні параметри та характеристики 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=1,21Тл, 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

В попередніх розділах показано, що максимальний приріст вихідної потужності та напруги генератора спостерігається при приєднанні додаткової ємності до обмотки якоря генератора величиною  $C=100\text{мкФ}$  та при подачі напруги на додаткову обмотку підмагнічування. В даному випадку наведені порівняльні результати досліджень робота генератора за напруги  $\approx 14,4\text{ В}$  (що достатньо для заряджання акумуляторної батареї) та при одному значенні додаткової ємності.

На рис. 4.23 показано залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру при приєднанні до обмотки якоря генератора додаткової ємності  $C=100\text{мкФ}$ .

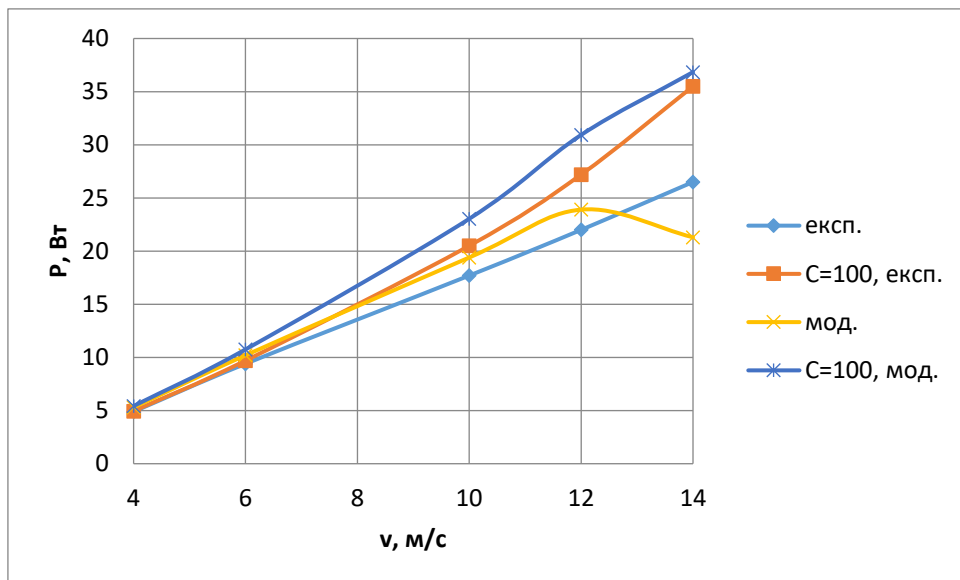


Рис. 4.20 залежність потужності від швидкості вітру при приєднанні додаткової ємності  $C=100\text{мкФ}$

З рис. 4.20 видно, що розбіжність між результатами імітаційного моделювання та експериментальних досліджень знаходиться в межах 8-10%, що підтверджує адекватність та достовірність отриманих 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. 4.21 наведена залежність вихідної потужності від швидкості вітру при подачі постійної за величиною напруги на додаткову обмотку підмагнічування.

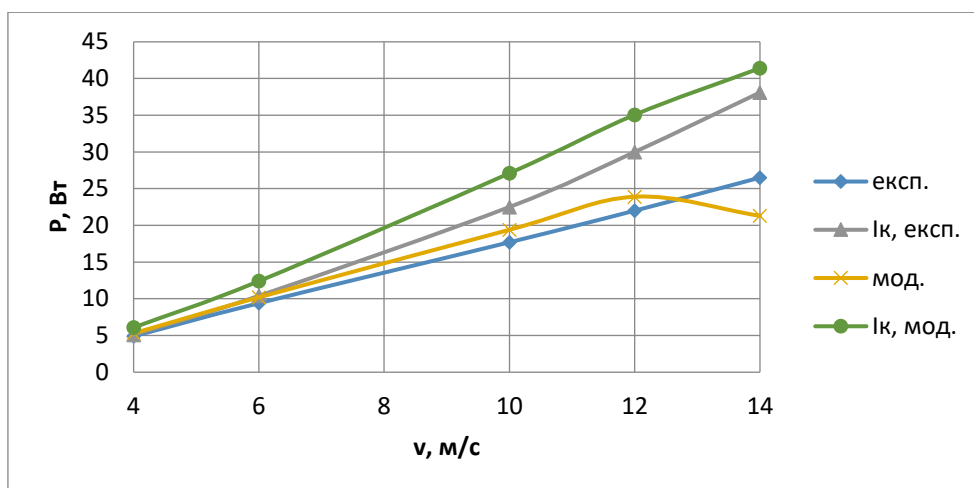


Рис. 4.21 залежність потужності генератора від швидкості вітру при подачі напруги на додаткову обмотку

Із рис. 4.21 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 аналізом глибини регулювання потужності. Залежність приросту потужності для кожного значення швидкості вітру наведена на рис. 4.22.

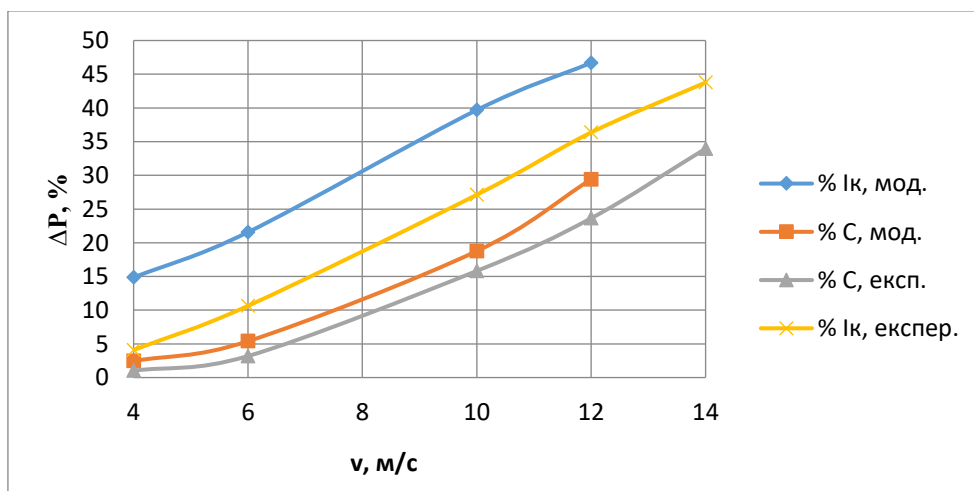


Рис. 4.22 Глибина регулювання потужності при подачі напруги на додаткову обмотку та приєднанні додаткової ємності

З рис. 4.22 видно, що при збільшенні швидкості вітру та постійних значеннях параметрів глибина регулювання потужності досягає 40-45 %. За середньостатистичній швидкості вітру застосування підмагнічування дозволяє підвищити вихідну потужність генератора на 10-15% при підключенні додаткової ємності та 17-25% при подачі напруги на додаткову обмотку підмагнічування. 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. 4.23. В даному досліді струм додаткової обмотки регулюється таким чином, щоб отримати постійну за величиною напругу на затискачах генератора.

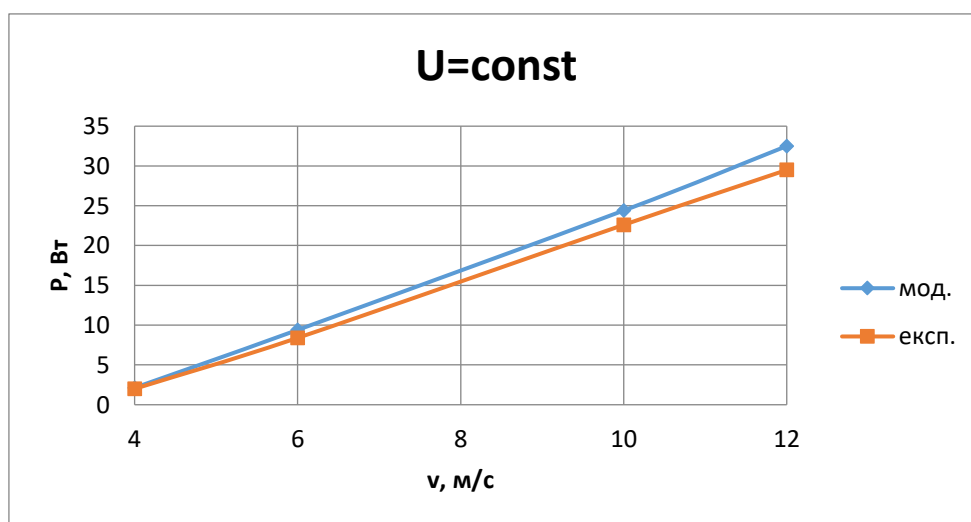


Рис. 4.23 залежність потужності генератора від швидкості вітру

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

Таким чином, отримані експериментальні дані корелюються із результатами розрахунку для обраного профілю, наведених в розділі 2 даної роботи (рис. 2.4, 2.5 та 2.6). Розрахункова величина корекції вихідної потужності (рис. 2.6) для швидкості вітру 5 м/с складає  $\approx 10-38\%$ , а для швидкості вітру 6 м/с –  $\approx 10-20\%$ . В той же час результати експериментальних досліджень показують приріст потужності до 18-22% при швидкості вітру 5 м/с.

#### Висновки до розділу 4.

1. 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.

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

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

4. 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. Отримані значення мають достатнє співпадання із теоретичними дослідженнями можливості корекції вихідної потужності, проведені в другому розділі даної роботи.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, що полягає в обґрунтуванні методів регулювання вихідної потужності та розробці математичної моделі генераторного обладнання безмультиплікаторної автономної вітроелектроустановки, з урахуванням даних методів, шляхом імітаційного моделювання за змінної частоти обертання ротора вітроустановки.

Відповідно до поставленої мети в роботі отримано наступні наукові та практичні результати:

1. За результатами аналізу літературних джерел показано, що безмультиплікаторні системи складають  $\approx 20\%$  від загальної кількості вітроустановок на ринку агрегатів малої потужності. Встановлено, що для безмультиплікаторні вітроелектричних установок доцільно використовувати синхронні генератори з аксіальним магнітним потоком із збудженням від постійних магнітів (торцевого типу).

2. Порівняльний аналіз аеродинамічних характеристик роторів вітроустановок проведений для профілів, що в залежності від коефіцієнта оберненої якості були поділені на дві групи: 1 – традиційні профілі: P-II, A-6, BS-10, BS-10, p-11-18 – дані профілі дозволяють отримати найкращі показники коефіцієнта використання енергії вітру ротором в межах  $\xi = 0,36 \dots 0,4$  в діапазоні швидкохідності  $z = 4 \dots 5$ . 2 – профілі серії GA(W)-1 та ламіновані профілі FX – профілям даної групи притаманні значення коефіцієнта використання енергії вітру  $\xi = 0,53 \dots 0,57$  в діапазоні швидкохідності  $Z = 6 \dots 11$ , а при  $Z = 5 \dots 6$  забезпечують коефіцієнт потужності  $\xi = 0,49 \dots 0,53$ . При розрахунку енергетичних характеристик генератора вітроустановки встановлено, що ротори вітроустановок з профілями лопатей групи 1 дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності  $91,8 \dots 93,3 \text{ Вт/м}^2$  при значеннях коефіцієнтів використання енергії вітру  $\xi = 0,33 \dots 0,44$  в діапазоні швидкохідності  $z = 4 \dots 5$ . Ротори з профілями групи 2 дозволяють отримати максимальні значення механічної потужності  $114,3 \dots 115,7 \text{ Вт/м}^2$  при  $\xi = 0,54 \dots 0,55$  в діапазоні швидкохідності  $z = 6 \dots 7$ . Проведено узгодження

аеродинамічних характеристик ротора вітротурбіни з механічною характеристикою електрогенератора, що дало можливість встановити межі корекції його за моментом та потужністю за різних значень номінальної швидкості вітру. Так для профілю лопаті серії GA(W) вона складає за моментом 22%, а за потужністю 9,5%, (за номінальної швидкості 5м/с відносно верхньої межі діапазона номінальних значень 8м/с).

3. Розроблено числову математичну модель для дослідження параметрів та характеристик синхронного генератора із постійними магнітами торцевого типу, що враховує двосторонню активну зону статора та аеродинамічні параметри ротора вітротурбіни та розроблено імітаційну математичну модель корекції вихідної потужності магнітоелектричного генератора з двостороннім розташуванням постійних магнітів на роторі та аксіальним магнітним потоком, що працює у складі безмультіплікаційної вітроустановки при дискретних та випадкових значеннях швидкості вітру. При підключенні додаткової статичної ємності до затискачів генератора спостерігається збільшення вихідної потужності на  $\approx 5-10\%$ . Більш ефективним способом корекції вихідної потужності є використання додаткової обмотки підмагнічування магнітоелектричного генератора. При подачі напруги на обмотку збудження  $U_f=8$  В спостерігається приріст вихідної потужності генератора  $\approx 30-40\%$  ніж без регулювання.

4. Розроблено математичну модель для оцінки величини ємності конденсаторів для впливу на ефективне перетворення механічної енергії вітрового потоку на електричну. Встановлено, що величина ємності залежить від параметрів обмотки якоря електрогенератора, величини взаємодукції, характеру та величини навантаження. За допомогою розробленої імітаційної моделі проведено оцінку впливу додаткової ємності, що використовується для підмагнічування, на величину потужності та вихідної напруги генератора при зміні швидкості обертання ротора вітроагрегату та постійній швидкості вітру. Для швидкості вітру 4 м/с при приєднанні ємності 10мкФ спостерігається робота генератора при максимальній потужності в порівнянні із ємністю 30мкФ та 100мкФ. На відміну від ємності 30мкФ



і 100мкФ, в разі приєднання ємності 10мкФ для швидкості вітру 4 м/с генератор працює з максимальною потужністю.

5. 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. 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. 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.

6. Результати дисертаційного дослідження передано для використання у навчальному процесі кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова ННІ енергетики, автоматики і енергозабезпечення Національного університету біоресурсів та природокористування України, на кафедру відновлюваних джерел енергії факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та до Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Васько П.Ф., Васько В.П., Даниленко О.І., Долюк В.В. Експериментальні дослідження режимів генерування та споживання реактивної потужності серійною вітроелектричною установкою з асинхронним генератором. Відрновлювана енергетика. 2008. № 1. С. 34–38.
2. Васько П.Ф., Вербовий А.П., Пазич С.Т. Реалізація стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відрновлювана енергетика. 2017. №3. С. 54–61.
3. Васько П.Ф., Пекур П.П. Електромеханічна стала часу вітроелектричних установок з асинхронними генераторами в навантажувальних режимах роботи. Відрновлювана енергетика. 2006. № 2. – С. 70 – 76.
4. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми «хвіст на косому шарнірі» на статичні характеристики вітроустановки.[Головко В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О., Будько В.І.] Відрновлювана енергетика. 2016. Київ. № 1(44). С. 45-54.
5. Г Півняк, Ф Шкрабець, Н Нойбергер, Д Ципленков. Основи вітроенергетики: Підручник, (укр.). Дніпропетровськ, Україна: Національний гірничий університет, 2015.
6. Головко В.М, Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Визначення впливу геометричних параметрів лопаті на енергетичні характеристики ротора. Відрновлювана енергетика, Київ. 2014. №3. С. 58-63.
7. Головко В.М., Коваленко М.А., Коваленко І.Я. Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. Відрновлювальна енергетика. 2020. 4(63), С. 50-58. doi: 10.36296/1819-8058.2020.4(63).
8. Головко В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Аналіз характеристик параметрів лопаті ротора автономної вітроенергетичної установки. Відрновлювана енергетика. 2013. № 3. Стор. 49-53.

9. Головка В.М., Коханевич В.П., Коваленко І.Я. Вплив аеродинамічних характеристик профілю лопаті на енергетичні характеристики ротора вітроустановки. Відновлювана енергетика, Київ. 2019. №4(59). –С.49-55.
10. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Аналіз систем орієнтації ротора вітроустановки малої потужності. Відновлювана енергетика. 2015. № 2. С. 55-60
11. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Математична модель системи орієнтації ротора вітроустановки флюгерною площиною. Відновлювана енергетика. 2017. № 3. С. 48-54.
12. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О., Марченко Н.В. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста на статичні характеристики вітроустановки. Відновлювана енергетика. 2015. № 3. С. 30-39.
13. ДСТУ4859:2007 Вітроенергетика. Установки електричні вітряні малої потужності. Загальні технічні вимоги. Держстандарт України. К.-2009. С.20
14. Кириленко О. В., Праховник А. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови. Праці Інституту електродинаміки НАН України. Київ, 2010. Спецвипуск. С. 10–16.
15. Коваленко І.Я. Робота синхронного генератора з постійними магнітами при підмагнічуванні сторонньою ємністю. Відновлювана енергетика, Київ.- 2021. - №1(64), с.50-58
16. Коваленко М. А., Чумак В. В., Пономарьов А. І. Ланцюгово-польова математична модель генератора постійних магнітів автономної силової установки.1 Вісник Національного технічного університету "КПІ". 2015. №42. С. 44-51.
17. Корендій В.М., Зінько Р.В. Аналіз переваг і недоліків горизонтально-осьових вітроустановок. Вісник Національного університету«Львівська політехніка». – 2012. № 729. С. 53–58.
18. Коханевич В.П. Умови стійкості системи регулювання ротора вітроустановки з відцентровим регулятором при антифлюгерному регулюванні. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2011. No2. С.28–36.9.

19. Коханєвич В.П., Головка В.М., Шихайлов М.О.. Розробка стенду та методики дослідження відцентрових регуляторів для вітроустановок. Відрновлювана енергетика. 2017. №4(51). С.43–51
20. Кудря С.О., Головка В.М., Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навчальний посібник, НТУУ «КПІ». 2011. - 184с.
21. Кудря С.О., Тучинський Б.Г., Іванченко І.В. Аналітичний огляд оновлених оцінок щодо перспектив розвитку вітроенергетики. Відрновлювана енергетика. 2019. №3. С.42–47.
22. Кузьо І.В., Корендій В.М. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2010. № 679. С. 61–68.
23. Мазуренко Л.І. Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням методу припасовування . Л.І.Мазуренко, В.І.Романенко. Технічна електродинаміка. 2014. №4. С.19-24.
24. Мазуренко Л.І., Василів К.М., Джура О.В., Коцюруба А.В. Імітаційна модель та алгоритм керування автономною гідро-вітровою системою електроживлення. Технічна електродинаміка. 2020. № 1. С. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.017>
25. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Шихненко М.О. Математичне моделювання і алгоритми керування електромеханічної системи з генератором на постійних магнітах і напівпровідниковим регулятором напруги. Обчислювальні проблеми електротехніки. Національний університет «Львівська політехніка». 2020. Вип. 10. № 2. – С.
26. Мазуренко Л.І., Джура О.В. Математична модель та алгоритм керування автономної нерегульованої вітроустановки з асинхронним вентильним генератором. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ. 2018. Вип. 3/2018(43). С. 24–30.

27. Особливості ОЕС України та науково-технічні проблеми забезпечення її розвитку / Б. С. Стогній та ін. Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. 2010. № 1. С. 25–30.
28. Порівняння традиційного генератора із постійними магнітами з торцевим генератором із двосторонньою активною поверхнею для вітроустановок. [Головко В.М., Монахов Е.А., Коваленко І.Я., Пономарьов О.І.] Відновлювана енергетика. Київ. 2018. №2(53). С. 30-38.
29. Проектування та аналіз кінцевих елементів гібридної синхронної машини збудження / YinhangNing, Chuang Liu, Shushu Zhu та Jie Tang // Міжнародний журнал прикладної електромагнітики та механіки. 2015. С.11–19.
30. Робота синхронного генератора вітроустановки зі збудженням від постійних магнітів на мережув. [В.М. Головко, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, Н.В. Марченко] Відновлювана енергетика, Київ. (2(65), 53-60. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).53-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).53-60)
31. Сандрін Ле Баллуа Порівняння двох конструкцій контролерів для гібридного синхронного генератора збудження для вітрових застосувань / Сандрін Ле Баллуа, Ліонель Відо // Міжнародна конференція з відновлюваних джерел енергії та якості електроенергії. Ла-Корунья (Іспанія), 25–27 березня 2015 р. С. 51–56.
32. Хоменко І. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації : монографія / Харків: НТУ «ХПІ», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с
33. Чумак В.В., Коваленко М.А., Коваленко І.Я.. Аналітичний огляд електромеханічних перетворювачів енергії для вітрової енергетики// Відновлювана енергетика. Екологічні науки. Київ/ 2018. №2 (21), С. 36-39
34. Чумак В.В., Монахов Є.А. Управління постійним генератором осьового потоку .Технічна електродинаміка. 2016. №2.С.55 - 57.
35. Albertos, P.; Mareels, I. Feedback and Control for Everyone. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Germany; 2010; pp. 3–27.
36. Ancuti M.-C., Musuroi S., Sorandaru C. Wind Turbines Optimal Operation at Time Variable Wind Speeds. Appl. Sci. 2020. №10. Pp. 4232, doi:10.3390/app10124232.

37. Bajpai P., Dash V. Hybrid renewable energy systems for power generation instand alone applications: a review. *Renew Sustainable Energy Rev.* 2012. № 16 (5). Pp. 2926–2939.
38. Büyüközkan, G.; Karabulut, Y. Energy project performance evaluation with sustainability perspective. *Energy* 2017, 119, 549– 560, doi:10.1016/j.energy.2016.12.087.
39. Byung-Oh Tak, Jong-Suk Ro Analysis and Design of an Axial Flux Permanent Magnet Motor for in-Wheel System Using a Novel Analytical Method Combined With a Numerical Method. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 203994 – 204011. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036666.
40. Ch. Mohammed, Z. Hassan, El. Mohammed, Z. Smail. “Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage”. *Energy*, vol. 227, 120444, 2021. DOI:10.1016/j.energy.2021.120444
41. Chermiti D., Khedher A. A new method voltage and frequency regulation of self excited induction generator operating in stand alone. *WSEAS Trans Envi-ron Dev.* 2014. №10. Pp. 150–159.
42. Chitsaz, N.; Banihabib, M.E. Comparison of Different Multi Criteria Decision-Making Models in Prioritizing Flood Management Alternatives. *Water Resour. Manag.* 2015, 29, 2503–2525, doi:10.1007/s11269-015-0954-6.
43. Chumack V., Bazenov V., Tymoshchuk Oks., and others. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114), 56–62. doi:10.15587/1729-4061.2021.246601, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3993765>. DOI: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3993765](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3993765).
44. Chumack V., Tsyvinskyi S., Kovalenko M. and others. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1, 5 (103) (Feb. 2020), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193495.

45. Cui Y., Geng Z., Zhu Q. Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving. *Energy* 2017, 125, 681–704, doi:10.1016/j.energy.2017.02.174.
46. Dehghanzadeh A., Behjat V., Banaei M. Dynamic modeling of wind turbine based axial flux permanent magnetic synchronous generator connected to the grid with switch reduced converter / Ali Reza Dehghanzadeh, Vahid Behjat, Mohamad Reza Banaei // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9(1), pp. 125-135. doi: 10.1016/j.asej.2015.11.002.
47. E. J. Brunner, D. J. Schwegman. “Commercial wind energy installations and local economic development: Evidence from U.S. counties”. *Energy Policy*, vol. 165, 112993, 2022. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112993
48. E. Zhao, S. Sun, S. Wang. New developments in wind energy forecasting with artificial intelligence and big data: A scientometric insight. *Data Science and Management*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2022.05.002>
49. 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. doi:10.3906/elk-1711-402.
50. Erich Hau. *Windkraftanlagen: Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit* [Hardcover] Aerodynamik Energielieferung Energietechnik Regenerative Energie Rotor Rotorblätter Schwingung Strom Windenergie Windmühl. Springer Berlin Verlag. 2017. 997 p.
51. Erol Kurt1, Serdal Arslan, Mehmet Demirtaş. Design and Analysis of an Axial-Field Permanent Magnet Generator with Multiple Stators and Rotors // *Conference: Power Engineering, Energy and Electrical Drives Torremolinos (Málaga), Spain. May 2011.* – p. 34-38.
52. 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.

53. Ferhat Daldaban, Emrah Çetin. Prototyping of Axial Flux Permanent Magnet Motors // Conference: isites 15 At: Valencia. – 2015. – p. 3-9.
54. Fitzgerald B., Basu B., Nielsen S.R.K. Active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades. *Struct. Control. Heal. Monit.* 2013, 20, 1377–1396, doi:10.1002/stc.1524.
55. Fragoso S., Garrido J., Vázquez F. Comparative Analysis of Decoupling Control Methodologies and  $H_\infty$  Multivariable Robust Control for Variable-Speed, Variable-Pitch Wind Turbines: Application to a Lab-Scale Wind Turbine. *Sustainability* 2017, 9, 713, doi:10.3390/su9050713.
56. Fragoso S., Ruz M.L., Garrido J.. Educational software tool for decoupling control in wind turbines applied to a lab-scale system. *Comput. Appl. Eng. Educ.* 2016, 24, 400–411, doi:10.1002/cae.21718.
57. Gambier, A.; Nazaruddin, Y.Y. Collective Pitch Control with Active Tower Damping of a Wind Turbine by Using a Nonlinear PID Approach. *IFAC-PapersOnLine* 2018, 51, 238–243, doi:10.1016/j.ifacol.2018.06.072.
58. Garrido J., Lara M., Ruz M. Decentralized PID control with inverted decoupling and superheating reference generation for efficient operation: Application to the Benchmark PID. *IFAC 2018*, 51, 710–715, doi:10.1016/j.ifacol.2018.06.187.
59. H. Liu, & C. Chen. Data processing strategies in wind energy forecasting models and applications: A comprehensive review. *Applied Energy*, vol. 249, pp. 392–408, 2019. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.04.188
60. 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.
61. I. Pakere, M. Kacare, A. Grāvelsiņš. Spatial analyses of smart energy system implementation through system dynamics and GIS modelling. Wind power case study in Latvia. *Smart Energy*. vol. 7. 100081 2022. DOI: 10.1016/j.segy.2022.100081
62. Jafari S., Pishkenari M.M., Sohrabi S. Advanced modeling and control of 5 MW wind turbine using global optimization algorithms. *Wind. Eng.* 2019, 43, 488–505, doi:10.1177/0309524x18807471.



63. Janon A. Making a case for a Non-standard frequency axial-flux permanent-magnet generator in an ultra-low speed direct-drive hydrokinetic turbine system / Akraphon Janon, Krittattee Sangounsak, Warat Sriwannarat // AIMS Energy, 2019, №.8(2), pp. 156-168. doi: 10.3934/energy.2020.2.156.
64. Jonkman J.M., Buhl M.L.J. FAST User's Guide; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, USA, 2005.
65. Kong X., Cai C.-S., Hu J. The State-of-the-Art on Framework of Vibration-Based Structural Damage Identification for Decision Making. *Appl. Sci.* 2017, 7, 497, doi:10.3390/app7050497.
66. Kumar A.A., Bossanyi E.A., Scholbrock A.K. Field testing of LIDAR assisted feedforward control algorithms for improved speed control and fatigue load reduction on a 600 kW wind turbine. In *Proceedings of the European Wind Energy Association Annual Conference and Exhibition 2015*, Paris, France, 17–20 November 2015; pp. 31–35.
67. Kumar D., Chatterjee K. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 55, 957–970, doi:10.1016/j.rser.2015.11.013.
68. Lara M. Computer Science and Numerical Analysis Department University of Córdoba. Spain. Garrido J.; Vázquez F. Adaptive PI control and active tower damping compensation of a wind turbine. *Renew. Energy Power Qual. J.* 2020, 18, 339–344, doi:10.24084/repqj18.323.
69. Lee H.-C., Chang C.-T. Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 92, 883–896, doi:10.1016/j.rser.2018.05.007.
70. Lin Z., Chen Z., Wu Q. Coordinated pitch & torque control of large-scale wind turbine based on Pareto efficiency analysis. *Energy* 2018, 147, 812–825, doi:10.1016/j.energy.2018.01.055.
71. Liu H., Tang Q., Chi Y. Vibration reduction strategy for wind turbine based on individual pitch control and torque damping control. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2016, 26, 2230–2243, doi:10.1002/etep.2201.

72. Luo L., Zhang X., Song D. Minimizing the Energy Cost of Offshore Wind Farms by Simultaneously Optimizing Wind Turbines and Their Layout. *Appl. Sci.* 2019, 9, 835, doi:10.3390/app9050835.
73. M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov. Synchronous Axial-Flux Generator with Hybrid Excitation in Stand Alone Mode. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine. 2019. pp. 455-459. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879849.
74. M. Ostroverkhov, V. Chumack, E. Monakhov and A. Ponomarev, "Hybrid Excited Synchronous Generator for Microhydropower Unit," 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 219-222.
75. M. R. Islam, S. Mekhilef, R. Saidur. "Progress and recent trends of wind energy technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 456–468, 2013. DOI:10.1016/j.rser.2013.01.007
76. Maryam Shokri, Naghi Rostami, Vahid Behjat Comparison of Performance Characteristics of Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Machine With Different Magnet Shapes // *IEEE Transactions on Magnetics* · December 2015 – p. 16-24
77. Mathematical statistics: a collection of problems: textbook; I. Yu. Kaniovska, O. V. Stus Ed. Kyiv, Ukraine: KPI im. Igor Sikorsky, 2019.
78. Mehmet Recep Minaz, Mehmet Çelebi Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in Physics*, 2017, vol. 7, pp. 183-188. doi:10.1016/j.rinp.2016.10.026.
79. Mensah, A.F.; Dueñas-Osorio, L. Improved reliability of wind turbine towers with tuned liquid column dampers (TLCs). *Struct. Saf.* 2014, 47, 78–86, doi:10.1016/j.strusafe.2013.08.004.
80. Minguez, E.L.; Kolios, A.J.; Brennan, F.P. Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures. *Renew. Energy* 2011, 36, 2831–2837, doi:10.1016/j.renene.2011.04.020.
81. Modeling of Dynamical Objects with Hypercomplex Numbers for Railway Non Traction Consumers with Renewable Energy Sources. Oleksandr Ostapchuk and

others. 3rd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2021. DOI: 10.1109/ICECCE52056.2021.9514151

82. Mohammadi, E.; Fadaeinedjad, R.; Moschopoulos, G. Implementation of internal model based control and individual pitch control to reduce fatigue loads and tower vibrations in wind turbines. *J. Sound Vib.* 2018, 421, 132–152, doi:10.1016/j.jsv.2018.02.004.

83. N. Ostroverkhov and N. Buryk, "Control System with Field Weakening of Synchronous Motor Drive," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240903.

84. Nedjar, B.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Vido, L.; Gabisi, M.; Lécrivain, M. A new parallel double excitation synchronous machine. *IEEE Trans. Magn.* 2011, 47, 2252–2260.

85. Njiri, J.G.; Söffker, D. State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 60, 377–393, doi:10.1016/j.rser.2016.01.110.

86. O. Dobzhanskyi, E. Hossain, E. Amiri, R. Gouws, V. Grebenikov, L. Mazurenko, M. Prymak and R. Gamaliia. Axial-Flux PM Disk Generator with Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting // *IEEE Access*. March 26, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2908.348

87. Odgaard, P.F.; Larsen, L.F.; Wisniewski, R.; Hovgaard, T.G. On using Pareto optimality to tune a linear model predictive controller for wind turbines. *Renew. Energy* 2016, 87, 884–891, doi:10.1016/j.renene.2015.09.067.

88. Oleksandr Ostapchuk and others. Lyapunov function in the Hyper-Complex Phase Space. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 870. 2022. pp. 537-553.

89. Ostapchuk O., Kuznetsov V., Bydko M., Kuznetsov V. & Kuznetsova, Y. Integrated Use of Photovoltaic and Wind Power Plants in Power Supply Systems. *Control Applications in Modern Power Systems*. 2022. 567.

90. Ostapchuk O., Kuznetsov V., Kruczek W., & Tsyplenkov D. Analysis of the neutral grounding modes influence on the reliability characteristics of local systems with renewable energy sources. *Diagnostyka*. 2021. 22(1), p.p.45-56.

91. Park, S.; Glade, M.; Lackner, M.A. Multi-objective optimization of orthogonal TLCDs for reducing fatigue and extreme loads of a floating offshore wind turbine. *Eng. Struct.* 2020, 209, 110260, doi:10.1016/j.engstruct.2020.110260.
92. Pascu, V.; Kanev, S.; Van Wingerden, J.-W. Adaptive tower damping control for offshore wind turbines. *Wind. Energy* 2016, 20, 765–781, doi:10.1002/we.2058.
93. Patrascu, M.; Ion, A. Evolutionary Modeling of Industrial Plants and Design of PID Controllers. *Studies in Systems, Decision and Control* 2015, 40, 73–119, doi:10.1007/978-3-319-26230-7\_4.
94. Radwan-Pragłowska N. Parameters identification of coreless axial flux permanent magnet generator / Natalia Radwan-Pragłowska, Tomasz Wegiel, Dariusz Borkowski // *Archives Of Electrical Engineering*, 2018, vol. 67(2), pp. 391-402. doi:10.24425/119648.
95. Radwan-Pragłowska N., Wegiel T., Borkowski D. Modeling of Axial Flux Permanent Magnet Generators. *Energies*, 2020, no.13 (21), p. 5741. doi:10.3390/en13215741.
96. Renewable energy sources, (in Ukrainian), S. Kudria, Ed. Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020.
97. Ruz, M.L.; Garrido, J.; Fragoso, S.; Vazquez, F. Improvement of Small Wind Turbine Control in the Transition Region. *Process.* 2020, 8, 244, doi:10.3390/pr8020244.
98. S. Sinha, S. S. Chandel. “Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 755–769, 2015. DOI:10.1016/j.rser.2015.05.040
99. Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 173848 – 173854. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957046.
100. Sandip Mazumder Numerical Methods for Partial Differential Equations. Finite Difference and Finite Volume Methods / Sandip Mazumder // Chapter 2 - The Finite Difference Method. – 2016. – p. 51-101.

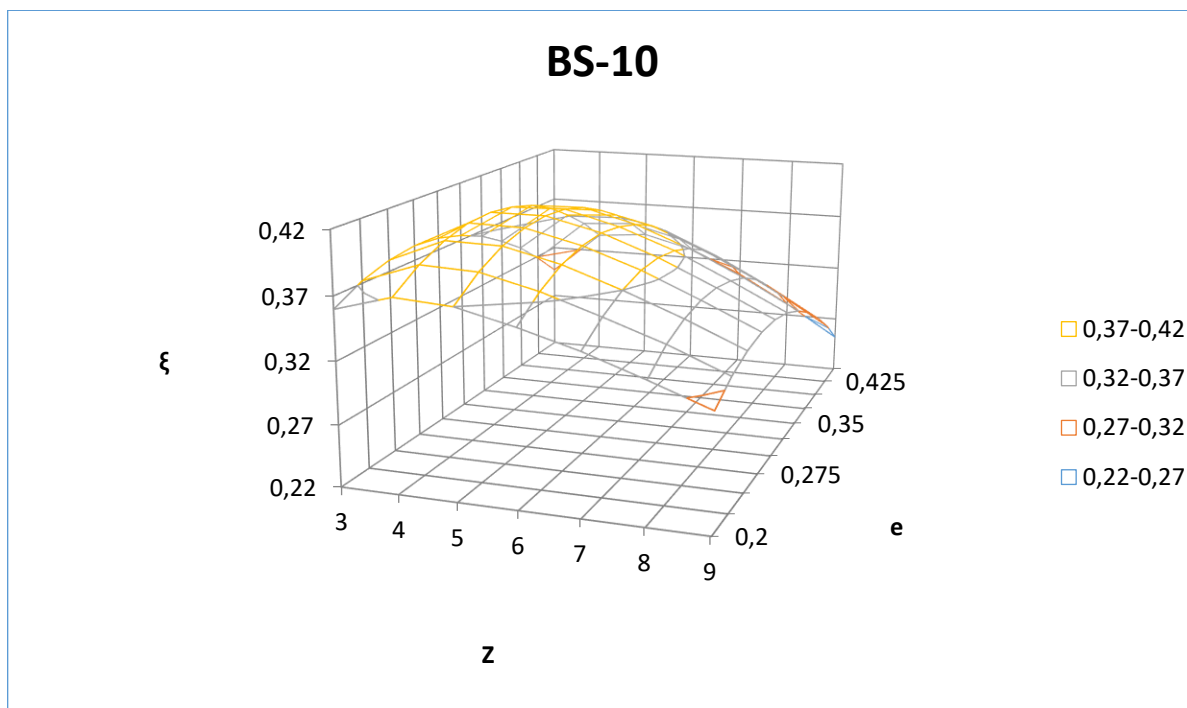
101. Scholbrock, A.; Fleming, P.; Schlipf, D.; Wright, A.; Johnson, K.; Wang, N. Lidar-enhanced wind turbine control: Past, present, and future. In Proceedings of the American Control Conference, Boston, MA, USA, 8 July 2016; pp. 1399–1406, doi:10.1109/ACC.2016.7525113.
102. Şengül, Ümran; Eren, M.; Shiraz, S.E.; Gezder, V.; Şengül, A.B. Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renew. Energy* 2015, 75, 617–625, doi:10.1016/j.renene.2014.10.045.
103. Shakoor, A. Adaptive application of multi-attribute decision making methods in determining the level of existence of a case study: Rural areas of Kamyaran Towns. *Rural Stud.* 2015, 6, 679–698.
104. Sierra-Garcia, J.E.; Santos, M. Improving Wind Turbine Pitch Control by Effective Wind Neuro-Estimators. *IEEE Access* 2021, 9, 10413–10425, doi:10.1109/access.2021.3051063.
105. Sierra-Garcia, J.E.; Santos, M. Performance Analysis of a Wind Turbine Pitch Neurocontroller with Unsupervised Learning. *Complex.* 2020, 2020, 1–15, doi:10.1155/2020/4681767
106. Simani, S.; Castaldi, P. Robust Control Examples Applied to a Wind Turbine Simulated Model. *Appl. Sci.* 2017, 8, 29, doi:10.3390/app8010029.
107. Small Wind: Planning and Building Successful Installations. Nolan Clark Ed. Academic Press, 2013.
108. Song, D.; Fan, X.; Yang, J.; Liu, A.; Chen, S.; Joo, Y.H. Power extraction efficiency optimization of horizontal-axis wind turbines through optimizing control parameters of yaw control systems using an intelligent method. *Appl. Energy* 2018, 224, 267–279, doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.114
109. Sun, C.; Jahangiri, V. Bi-directional vibration control of offshore wind turbines using a 3D pendulum tuned mass damper. *Mech. Syst. Signal Process.* 2018, 105, 338–360, doi:10.1016/j.ymssp.2017.12.011.
110. T. Li, Y. Zhang, Y. Liang, Q. Ai and H. Dou, "Multiphysics analysis of an axial-flux in-wheel motor with an amorphous alloy stator", *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 27414-27425. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972017.

111. T. Takahashi, M. Takemoto, S. Ogasawara, W. Hino and K. Takezaki, "Size and weight reduction of an in-wheel axial-gap motor using ferrite permanent magnets for electric commuter cars", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 3927-3935. doi: 10.1109/TIA.2017.2684739.
112. Ungurán, R.; Petrović, V.; Pao, L.Y.; Kühn, M. Uncertainty identification of blade-mounted lidar-based inflow wind speed measurements for robust feedback–feedforward control synthesis. *Wind. Energy Sci.* 2019, 4, 677–692, doi:10.5194/wes-4-677-2019.
113. Vadim Chumack, Serhii Tsyvinskyi, Mykhailo Kovalenko. 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.
114. 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. doi:10.3390/en11113162.
115. What Is Gauge Fixing? A Theoretical Introduction: (COMSOL Blog) [Електронний ресурс] Magnus Olsson COMSOL Blog. – 2020. – Режим доступу до журналу: <https://www.comsol.com/blogs/what-is-gauge-fixing-a-theoretical-introduction/>
116. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Trevor M. Letcher Ed. Academic Press, 2017.
117. Yang, F.; Li, S.-S.; Wang, L.; Zuo, S.; Song, Q.-W. Adaptive Backstepping Control Based on Floating Offshore High Temperature Superconductor Generator for Wind Turbines. *Abstr. Appl. Anal.* 2014, 2014, 1–11, doi:10.1155/2014/139752.
118. Yaramasu, V.; Wu, B.; Sen, P.C.; Kouro, S.; Narimani, M. High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. *Proc. IEEE* 2015, 103, 740–788.
119. Zhang Z. Design Optimization of ironless multi-stage axial-flux permanent magnet generators for offshore wind turbines / Zhaoqiang Zhang, Robert Nilssen, S. M. Mueeen, Arne Nysveen, Ahmed Al-Durra // *Engineering Optimization*, 2017, vol. 49, pp. 815-827. doi:10.1080/0305215X.2016.1208191.

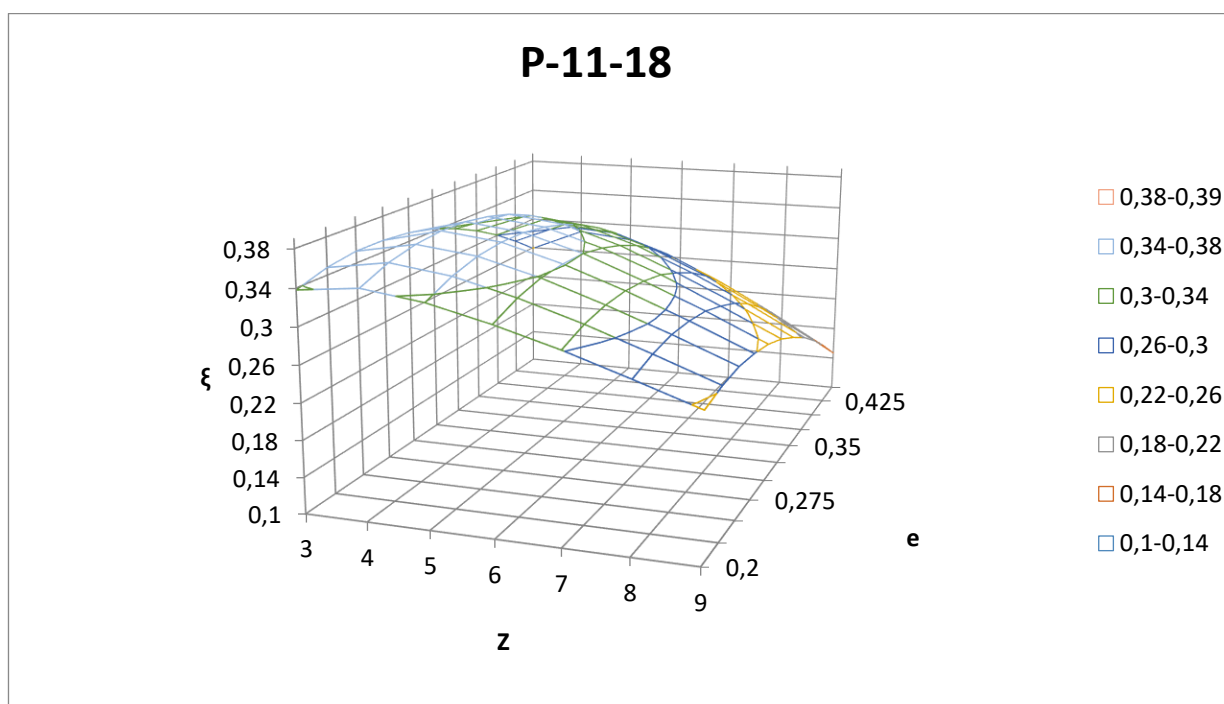
## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

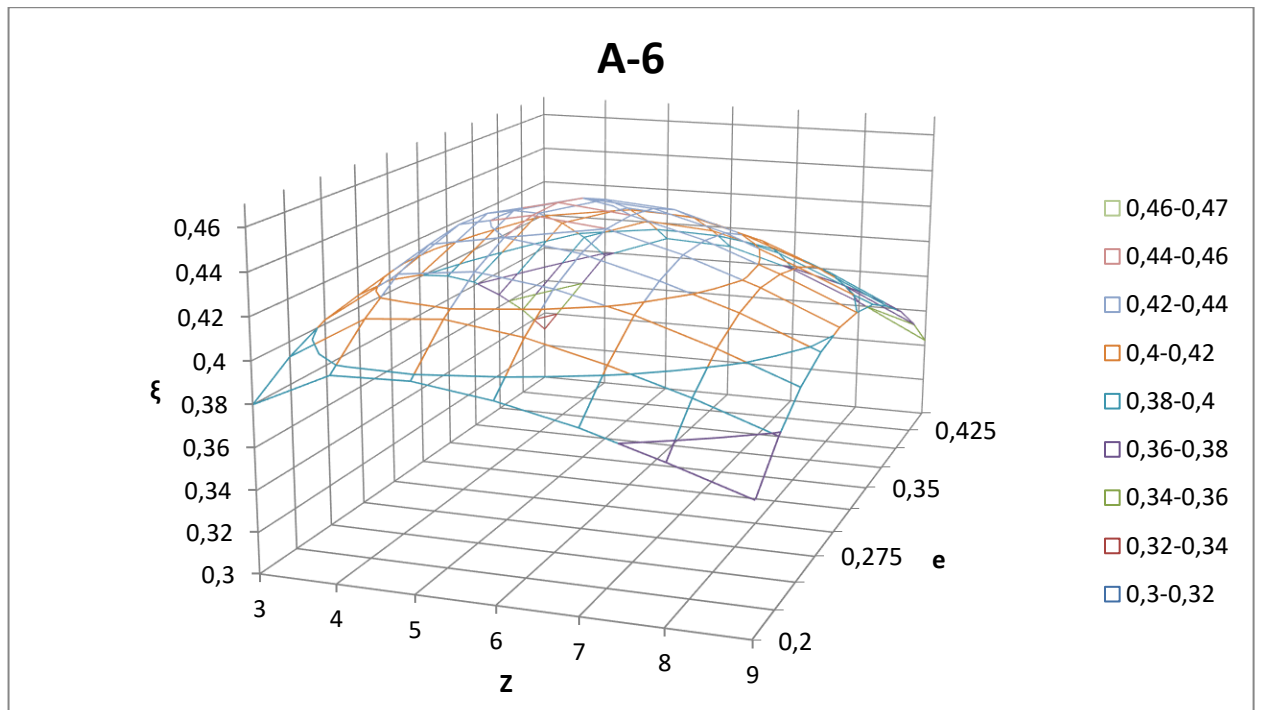
Залежності коефіцієнта використання енергії вітру (коефіцієнта потужності) від швидкості ротора та коефіцієнта гальмування повітряного потоку в його площині для різних видів профілю.



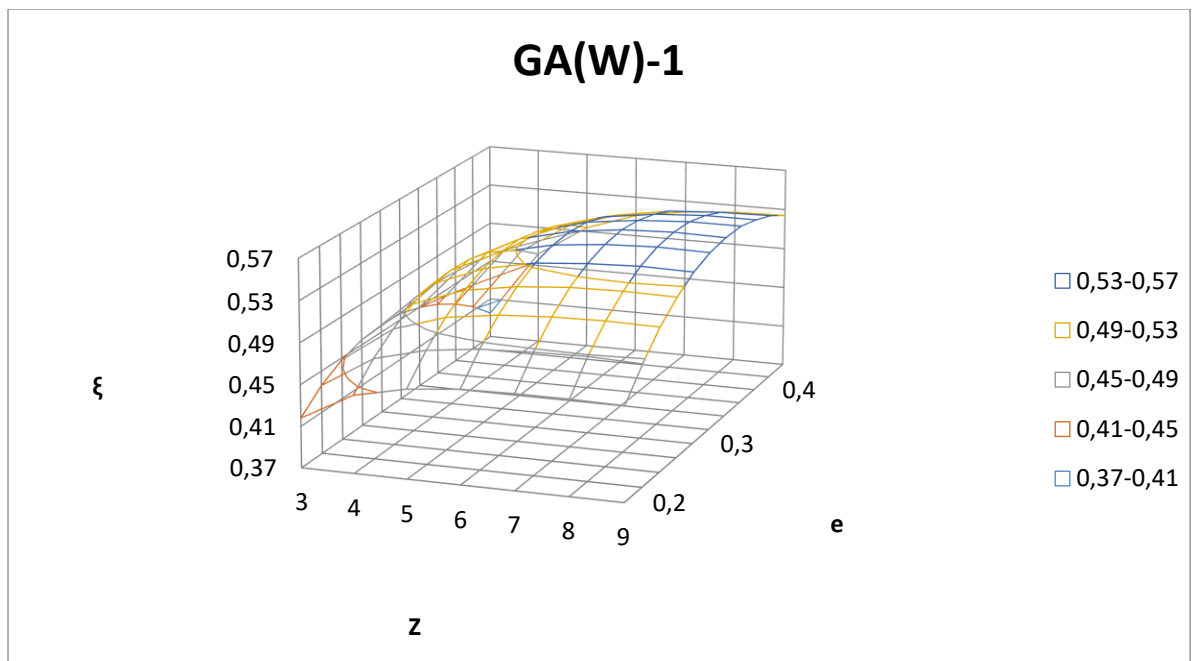
a)



б)

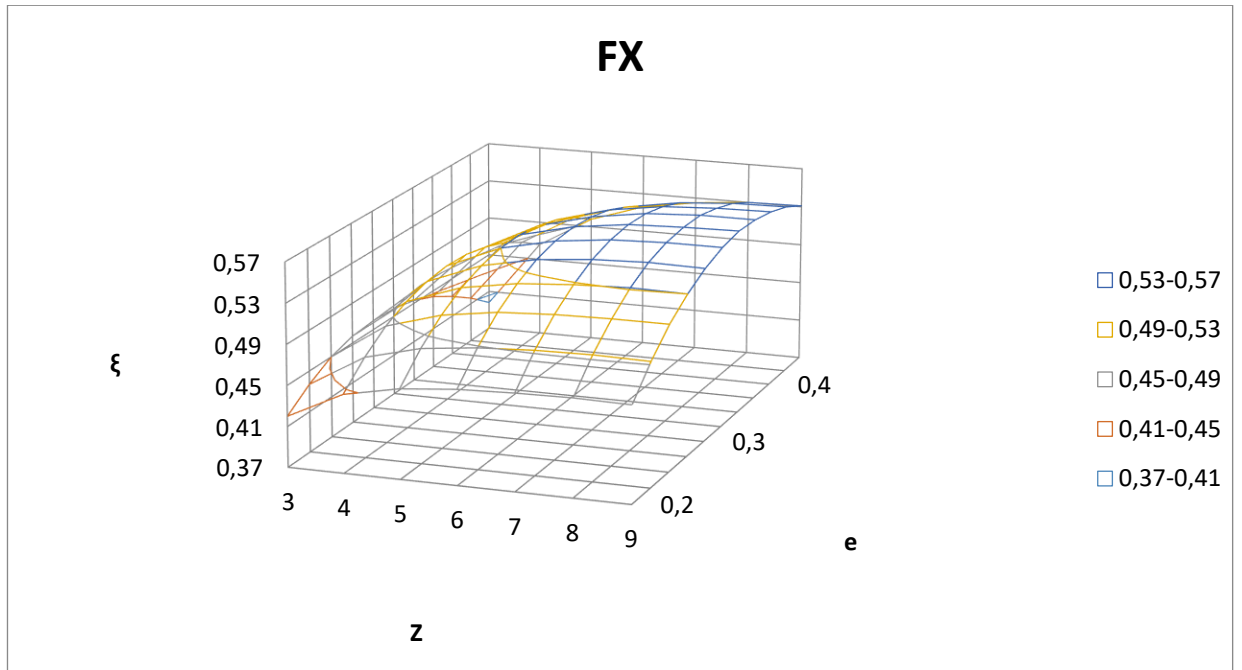


B)



Г)

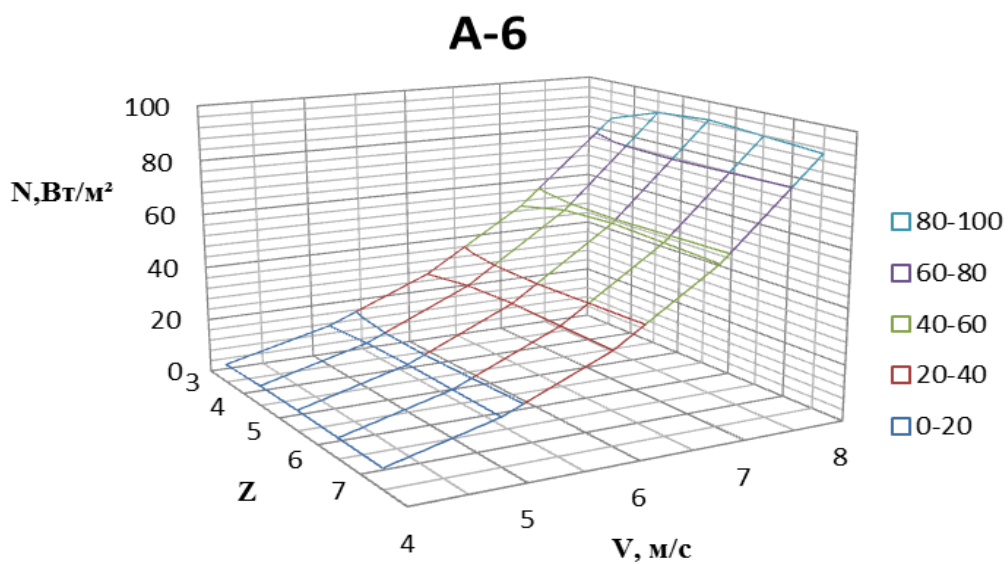




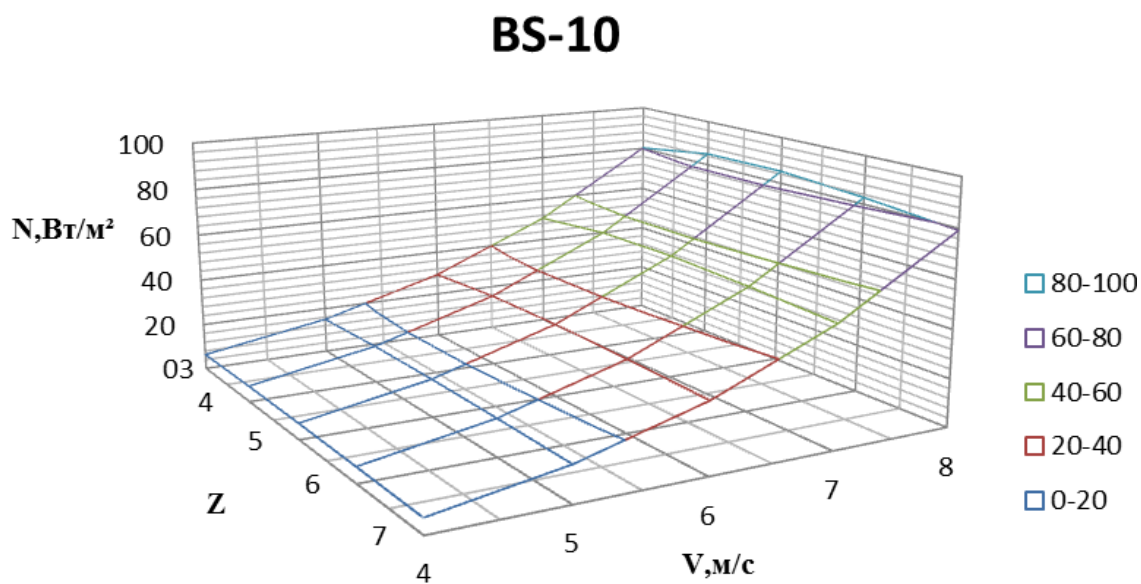
д)

**ДОДАТОК Б**

Залежність питомої потужності на валу ротора вітроустановки від модуля швидкохідності та швидкості вітру для профілів першої групи.

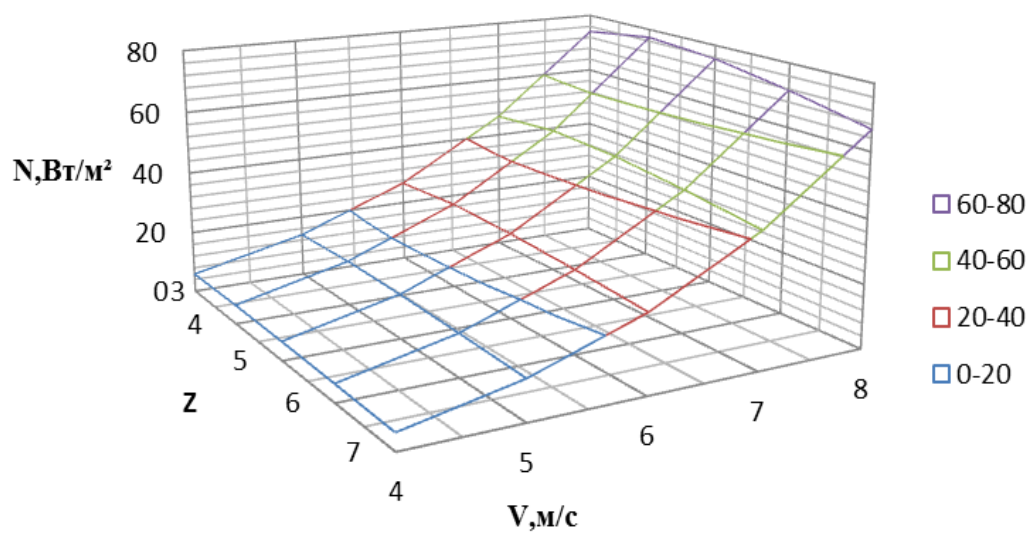


a)



б)

**p-11-18**



**B)**

## ДОДАТОК В

### Алгоритм розрахунку основних розмірів генератора

Розрахункове значення об'єму постійного магніту:

$$V_M = 23,1 \cdot \frac{P_{рас} \cdot \sigma_o \cdot (1 + \sin \varphi) \cdot K_{yo} \cdot K_{кз} \cdot 10^7}{\alpha_i \cdot K_o K_\phi \cdot f \cdot B_{mo} \cdot H_{mk}} = \frac{37,9 \cdot 1,12 \cdot (1 + \sin \varphi) \cdot 1,2 \cdot 2,5 \cdot 10^7}{0,55 \cdot 1,11 \cdot 0,95 \cdot 50 \cdot 1,024 \cdot 859,5} = 1844 \text{ мм}^2$$

де  $K_{yo}=1,2$  – коефіцієнт ударності;

$K_{кз}=2,5$  – кратність струму короткого замикання;

$\sigma_o=1,12$  – коефіцієнт розсіяння;

$\alpha_i=0,55$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття;

$K_o=0,95$  – обмотковий коефіцієнт;

$K_\phi=1,11$  – коефіцієнт форми поля;

Розрахункова потужність генератора:

$$P_{рас} = \frac{K_e \cdot P_{ном}}{\cos \varphi} = \frac{1,2 \cdot 0,3}{0,95} = 0,379 \text{ Вт}$$

де  $K_e$  – коефіцієнт ЕДС, який враховує падіння напруги в обмотці статора

генератора  $\left( K_e = \frac{E}{U_\phi} = 1,1 \div 1,4 \right)$

$B_{mo}$  – індукція в режимі холостого ходу ;

$$B_{mo} = 0,8 \cdot 1,28 = 1,024 \text{ Тл}$$

$H_{mk}$  – напруженість поля в режимі сталого КЗ

$$H_{mk} = 0,9 \cdot 955 = 859,5 \text{ А / мм}$$

Зовнішній діаметр осердя статора

$$D_{вн} = \sqrt[3]{\frac{8V_M}{2\pi a_p \lambda_M (1-a^2)(1+a)}} = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot 1838}{2\pi 0,55 \cdot 0,04 (1-0,678^2)(1+0,678)}} = 135,58 \text{ мм}$$

де  $\lambda_M$  – геометричний коефіцієнт ( $\lambda_M = 0,04$ );

$\alpha_p=0,55$  – конструктивний коефіцієнт полюсного перекриття

Задамо коефіцієнта=0,63

Приймаємо  $D_3=135$ мм

Внутрішній діаметр осердя статора

$$D_{\text{BH}} = a \cdot D_3 = 0,629 \cdot 135 = 84,99 \text{ мм}$$

Приймаємо  $D_{\text{BH}} = 85 \text{ мм}$

Середній діаметр осердя статора

$$D_{cp} = \frac{D_{\text{BH}} + D_3}{2} = \frac{85 + 135}{2} = 110 \text{ мм}$$

Остаточне значення коефіцієнта

$$a = 0,629$$

В торцевих електричних машинах довжина осердя статора, однозначно пов'язана із зовнішнім і внутрішнім діаметрами, тому

$$L = \frac{D_3 - D_{\text{BH}}}{2} = \frac{135 - 85}{2} = 25 \text{ мм}$$

У розглянутій конструкції довжина магніту дорівнює:

$$L_m = 8 \text{ мм}$$

Ширина магніту (попередньо)

$$b_m = \alpha_p \cdot \tau_{cp} = 0,55 \cdot 36,128 = 19,871 \text{ мм}$$

Приймаємо  $b_m = 20 \text{ мм}$

Проміжок між магнітами

$$\Delta_M = \tau_{cp} - b_m = 36,128 - 19,871 = 16,258 \text{ мм}$$

Площа поперечного перерізу магніту

$$S_M = b_m \cdot L_M = 20 \cdot 10 = 200 \text{ мм}^2$$

Висота магніту

$$h_m = \frac{V_M}{S_M \cdot 2 \cdot p} = \frac{1844}{314,159 \cdot 2 \cdot 4} = 7,336 \text{ мм}$$

Приймаємо  $h_m = 8$

Об'єм магнітів для двох половин машини:

$$V_M = 2 p h_m S_m = 2 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 314,159 = 2011 \text{ мм}^3$$

Конструктивний повітряний проміжок (проміжок між постійним магнітом і стороною котушки статора), повинен бути мінімальним, але при цьому таким, щоб виключити зачеплення магнітів з котушками статора.

Конструктивний повітряний проміжок  $\delta$ , мм

$$\delta = 0,1 \cdot \sqrt{0,02 \cdot D_{\text{вн}} \cdot L_M} = 0,1 \cdot \sqrt{0,02 \cdot 110 \cdot 20} = 0,663 \text{ мм}$$

Приймаємо  $\delta = 0,6 \text{ мм}$

Немагнітний проміжок з урахуванням висоти котушки  $\Delta_1 = \delta$ , мм

## ДОДАТОК Г

Результати розрахунку для 4 м/с,  $C=0$  мФ,  $U_f=\text{const}$ 

Швидкість обертання турбіни, в.о.	0,4	0,6	0,8	1	1,2
Струм генератора, А	0,5445	0,69	0,47	0,155	0,1345
Напруга генератора, В	21,77	27,6	18,76	6,2	5,38
Активна потужність генератора, Вт	35,57	57,1	26,4	2,887	2,171

На рис. наведена залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру для трьох випадків: характеристика без додаткового регулювання; при приєднанні додаткової ємності ( $C$ ); при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).

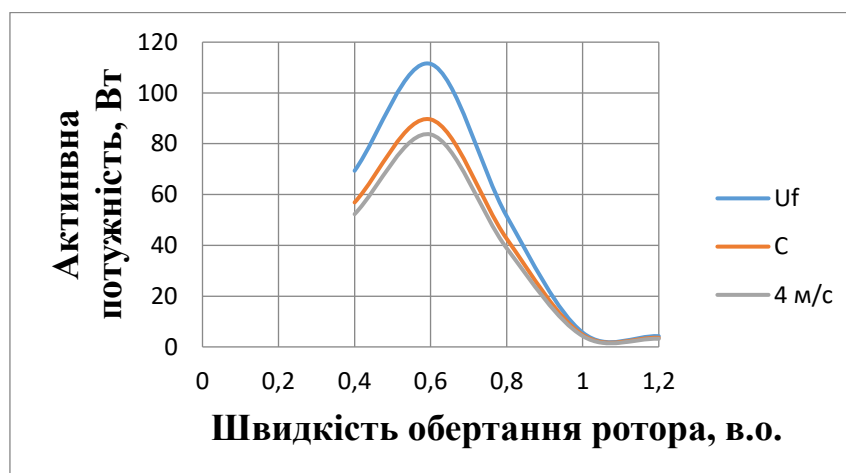


Рис.1 Залежність потужності генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f=\text{const}$

На рис. наведена залежність вихідної напруги генератора від швидкості вітру для трьох випадків: характеристика без додаткового регулювання; при приєднанні додаткової ємності ( $C$ ); при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).

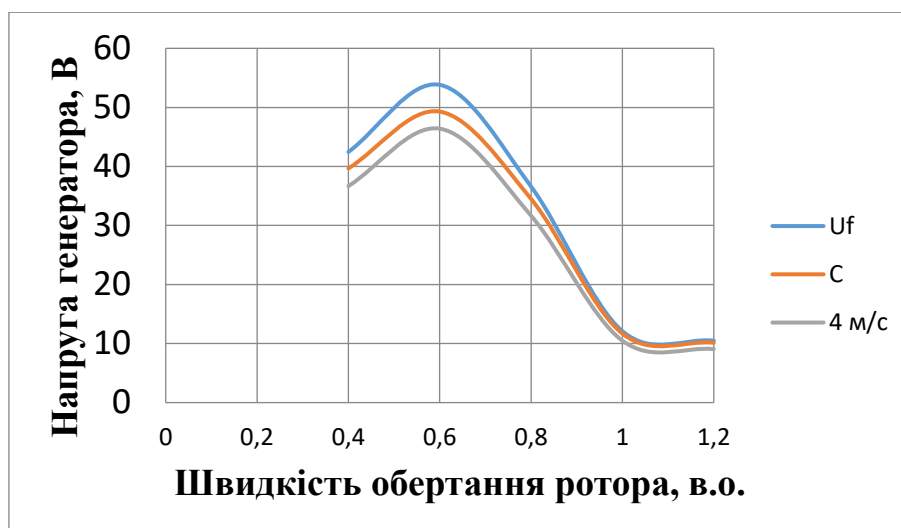


Рис. 2 Залежність напруги генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f = \text{const}$

Результати моделювання параметрів системи вітроагрегат-електрогенератор для швидкості вітру 5 м/с, змінній швидкості обертання, постійній напрузі додаткової обмотки та  $C=0$  мФ наведено в табл.

Таблиця

Результати розрахунку для 5 м/с,  $C=0$  мФ,  $U_f = \text{const}$

Швидкість обертання турбіни, в.о.	0,4	0,6	0,8	1	1,2
Струм генератора, А	0,553	1,059	1,057	0,74	0,34
Напруга генератора, В	22,11	42,33	42,25	29,55	13,64
Активна потужність генератора, Вт	36,69	134,4	133,9	65,52	13,95

На рис.3 наведена залежність вихідної потужності генератора від швидкості вітру для трьох випадків:

- характеристика без додаткового регулювання;
- при приєднанні додаткової ємності ( $C$ );
- при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).



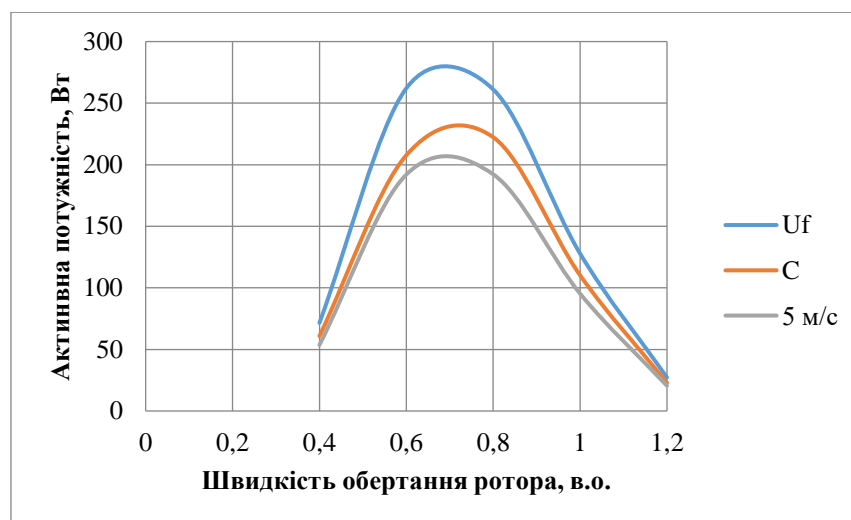


Рис. 3 Залежність потужності генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f = \text{const}$

На рис. 4 наведено залежність вихідної напруги досліджуваного генератора від швидкості вітру для трьох випадків: характеристика без додаткового регулювання; при приєднанні додаткової ємності (C); при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).

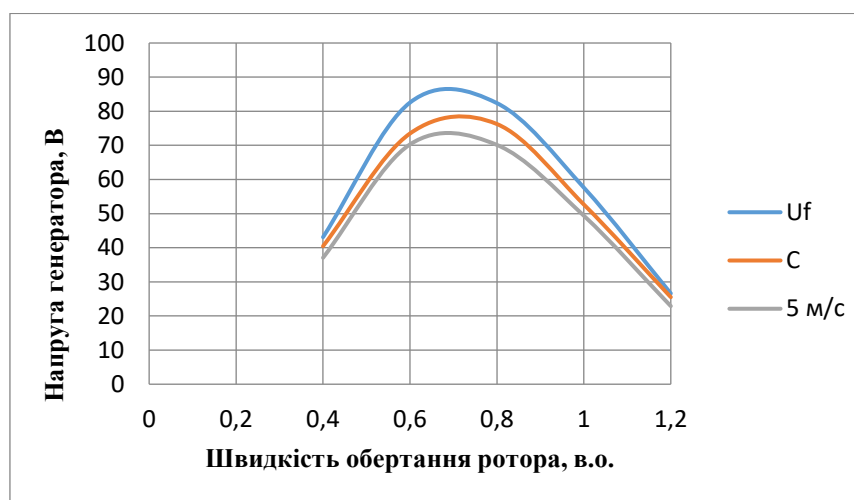


Рис.4 Залежність напруги генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f = \text{const}$

## ДОДАТОК Д

Результати розрахунку для 4 м/с,  $C=0$  мФ,  $U_f=\text{const}$ 

Швидкість обертання турбіни, в.о.	0,4	0,6	0,8	1
Струм генератора, А	0,33	0,316	0,26	0,09
Напруга генератора, В	67,26	82,41	52,18	18,67
Активна потужність генератора, Вт	26,88	42,64	20,00	2,34
Швидкість обертання ротора генератора, об/хв	204,5	261	176,5	57,08

На рис.5 наведена залежність вихідної потужності генератора, що досліджується від швидкості вітру для трьох випадків: характеристика без додаткового регулювання; при підключенні додаткової ємності (mF); при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).

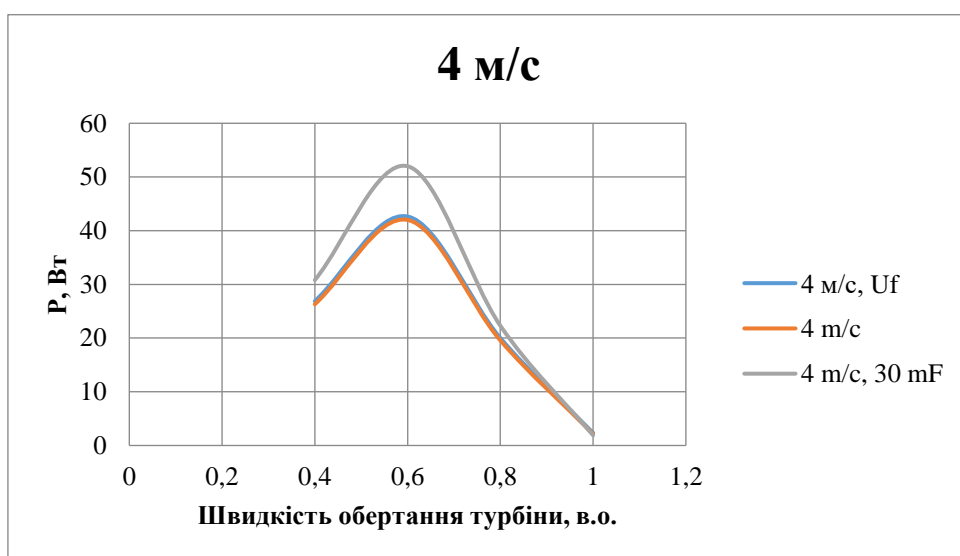


Рис.5 Залежність потужності генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f=\text{const}$

На рис. 6 наведено залежність вихідної напруги генератора, що досліджується від швидкості вітру для трьох випадків: характеристика без додаткового регулювання; при підключенні додаткової ємності (mF); при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).

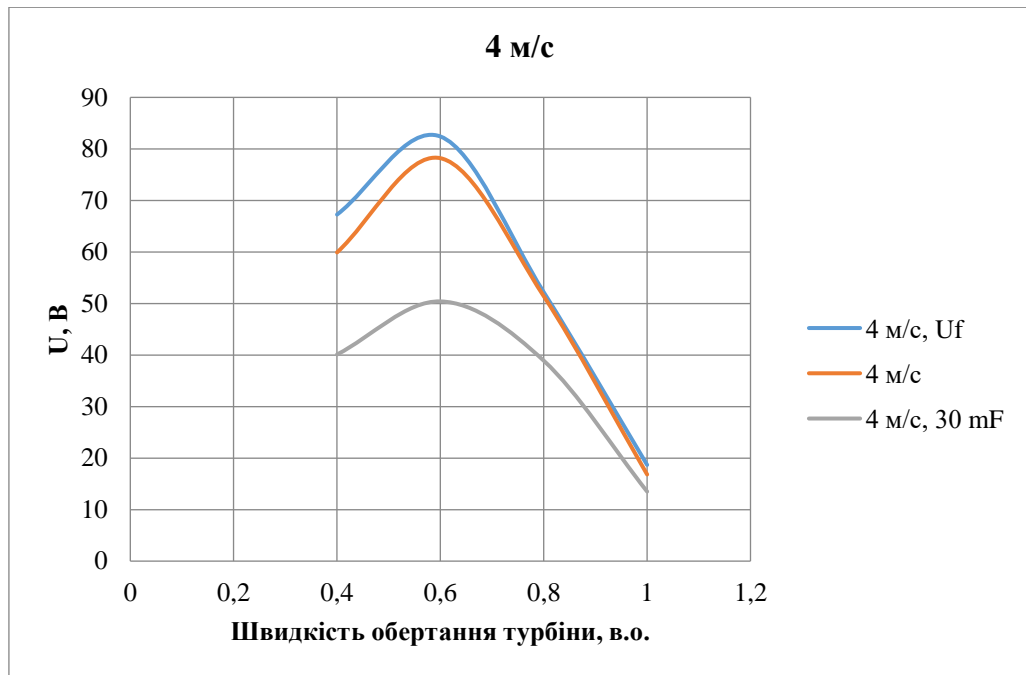


Рис. 6 Залежність напруги генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f = \text{const}$

Результати моделювання параметрів системи вітроагрегат-електрогенератор для швидкості вітру 5 м/с, змінній швидкості обертання, постійній напрузі додаткової обмотки та  $C=0$  мФ наведено в таблиці.

**Результати розрахунку для 5 м/с,  $C=0$  мФ,  $U_f = \text{const}$**

Швидкість обертання турбіни, в.о.	0,4	0,6	0,8	1
Струм генератора, А	0,322	0,62	0,618	0,36
Напруга генератора, В	69,42	129,6	127,5	91
Активна потужність генератора, Вт	27,77	95,89	95,51	48,77
Швидкість обертання ротора генератора, об/хв	207,6	401,4	400,7	279,3

На рис.7 наведена залежність вихідної потужності генератора, що досліджується від швидкості вітру для трьох випадків: характеристика без додаткового регулювання; при підключенні додаткової ємності (mF); при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).

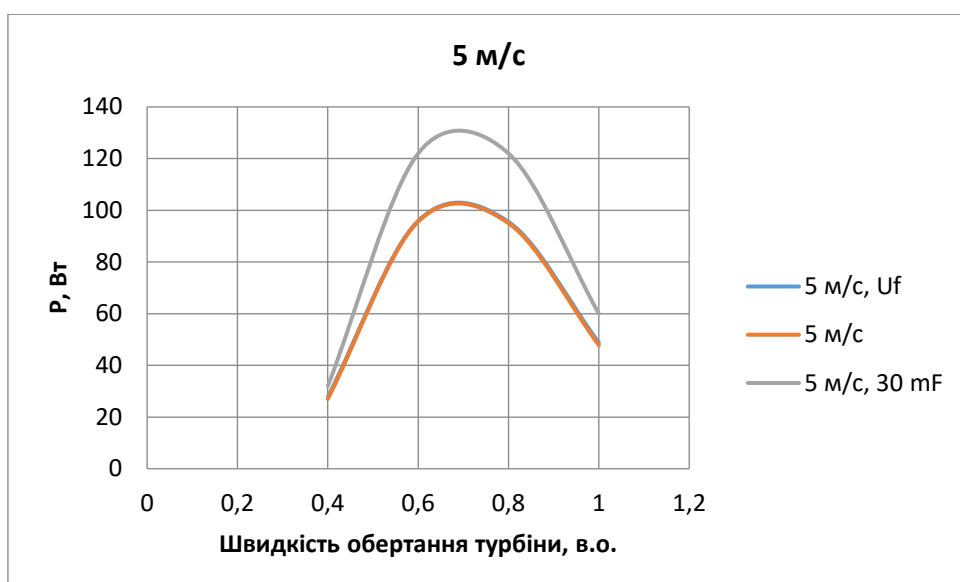


Рис.7 Залежність потужності генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f = \text{const}$

На рис.8 наведено залежність вихідної напруги генератора, що досліджується від швидкості вітру для трьох випадків: характеристика без додаткового регулювання; при підключенні додаткової ємності (mF); при подачі напруги на додаткову підмагнічувальну обмотку ( $U_f$ ).

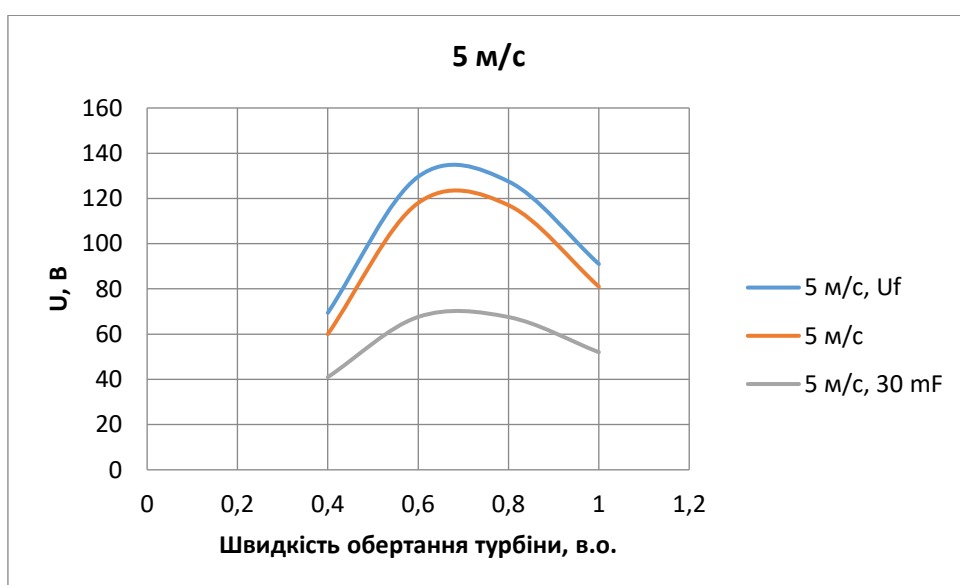


Рис.8 Залежність напруги генератора від швидкості обертання ротора при  $U_f = \text{const}$

## ДОДАТОК Е

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІНІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
НУБІП України

д-р техн. наук, професор

В.В. Камлюк

«28» 12. 2021р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор  
Інституту відновлюваної енергетики  
НАН України

д-р техн. наук, чл. кор. НАНУ

С.О. Кудря

«28» 12. 2021р.

## АКТ

## використання результатів НДР

За темою: «Розроблення безмультиміплекаторної вітроелектроустановки в системі підвищення економічності та екологічності традиційного генераторного обладнання», що виконувалась за Договором з НАН України № Н.Е. 4.11-19 від 02.05.2019р., була виконана

робота «Розроблення математичної моделі для визначення параметрів генератора безмультиміплекаторної вітроелектроустановки»;

у вигляді: звіту з НДР;

опиє впроваджені продукції: в роботі наведені методичні засади визначення параметрів генератора безмультиміплекаторної вітроелектроустановки та вплив на них додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів

передана для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри електропостачання ім. проф. В.М.Синькова ІНІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБІП України, 0341, м.Київ-41, вул. Героїв Оборони, 12.

Результати впровадження продукції мають наступні переваги:

Новизна та перспективність запропонованих рішень запропоновані методичні положення до визначення параметрів генератора безмультиміплекаторної вітроелектроустановки та вплив на них додаткової обмотки підмагнічування і



конденсаторів, що дозволяють провести аналіз процесів, які проходять в даній системі.

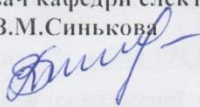
2. Технічні і економічні переваги в порівнянні з відомими аналогами запропонована модель дозволяє більш чітко уявити характеристики процесів, що проходять в вітроенергетичній установці на першому етапі дослідження такої системи.

3. Інші переваги: використання методичних положень до визначення параметрів генератора безмультіплікаторної вітроелектроустановки та вплив на них додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів, дозволяє скороти час на проведення дослідницьких робіт.

#### Підписи

Від ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
НУБіП України  
завідувач кафедри електропостачання ім.  
проф. В.М.Синькова

Від Інституту відновлюваної енергетики  
НАН України  
Інж. II кат.  
відділу вітроенергетики



В.В. Козирський

«    »

2021 р.

І.Я.Коваленко

«    »

2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора  
Інституту механіки та автоматичного  
агропромислового виробництва НААН України  
д-р техн. наук, академік НААН України



В.В. Адамчук

10 2022р.

## АКТ

## використання результатів НДР

Під час проведення дисертаційної роботи за темою: «Автономна безмультиміліаторна вітроелектрична установка на базі генератора торцевого типу», що виконувалась за планом аспірантської підготовки, була виконана

асистента кафедри відновлювальних джерел енергії Коваленко Ірини Яківни

робота «Порівняльний аналіз експериментальних досліджень та імітаційного моделювання корекції потужності генератора безмультиміліаторної вітроелектроустановки за допомогою додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів»;

у вигляді звіту;

опис впровадженної продукції: в роботі наведений результат порівняльного аналізу експерименту та імітаційного моделювання корекції потужності генератора безмультиміліаторної вітроелектроустановки за допомогою додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів

передана для використання у наукових дослідженнях інституту.

Результати впровадження продукції мають наступні переваги:  
Новизна та перспективність запропонованих рішень запропоновані методичні положення порівняльного аналізу експерименту та імітаційного моделювання корекції потужності генератора безмультиміліаторної вітроелектроустановки та вплив на них додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів, що дозволяють провести аналіз процесів, які проходять в даній системі.

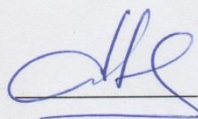
2. Технічні і економічні переваги в порівнянні з відомими аналогами запропоновані результати дозволяють більш чітко уявити характеристики процесів,



що проходять в вітроенергетичній установці на першому етапі дослідження такої системи.

3. Інші переваги: використання результатів дослідження до визначення параметрів генератора безмультіплікаторної вітроелектроустановки та вплив на них додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів, дозволяє скоротити час на проведення дослідницьких робіт.

Зав.каф. ВДЕ,  
докт. техн. наук, доцент



Василь БУДЬКО



**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Декан факультету  
електроенерготехніки та автоматики  
Національного технічного університету  
України "Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського",  
д.т.н., професор



Олександр ЯНДУЛЬСЬКИЙ

**АКТ**

**використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи на тему  
«Автономна безмультиплікаторна вітроелектрична установка на базі генератора  
торцевого типу»**

**асистента кафедри відновлюваних джерел енергії**

**Коваленко Ірини Яківни**

Акт складено в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Автономна безмультиплікаторна вітроелектрична установка на базі генератора торцевого типу» асистента кафедри відновлюваних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського Коваленко Ірини Яківни використано на кафедрі відновлюваних джерел енергії факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" при виконанні НДР "Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання відновлюваних джерел енергії" (тема №2037, № ДР 0117U004325).

Коваленко І.Я. провела порівняльний аналіз результатів експерименту та імітаційного моделювання корекції потужності генератора безмультиплікаторної вітроелектроустановки за допомогою додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів. Новизна та перспективність запропонованих рішень запропоновані методичні положення порівняльного аналізу експерименту та імітаційного моделювання корекції потужності генератора безмультиплікаторної вітроелектроустановки та вплив на

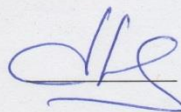
них додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів, що дозволяють провести аналіз процесів, які проходять в даній системі.

Технічні і економічні переваги в порівнянні з відомими аналогами запропоновані результати дозволяють більш чітко уявити характеристики процесів, що проходять в вітроенергетичній установці на першому етапі дослідження такої системи.

Використання результатів дослідження до визначення параметрів генератора безмультіплікаторної вітроелектроустановки та вплив на них додаткової обмотки підмагнічування і конденсаторів, дозволяє скоротити час на проведення дослідницьких робіт.

Отримані І.Я. Коваленко наукові результати використано в курсі навчальної дисципліни "Вітроенергетика", зокрема в розділі "Вітроелектричні установки" при підготовці бакалаврів за спеціальністю 141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, згідно освітньої-професійної програми підготовки «Нетрадиційні та відновлювані джерел енергії».

Зав.каф. ВДЕ,  
докт. техн. наук, доцент



Василь БУДЬКО