

УДК 620.92

## АНАЛІЗ СТРУКТУР І ДИНАМІКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, аспіранти Д. А. Гордієнко, Г. А. Хоружевський, Р. О. Харін

## ANALYSIS OF STRUCTURES AND DYNAMIC OF WIND GENERATOR CONTROL SYSTEMS

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate students D. A. Hordiienko, H. A. Khoruzhevskiy, R. O. Kharin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267774>



***Анотація.** Подано динаміку розвитку альтернативних джерел живлення за останні декілька десятиліть, що дає підстави говорити про тенденції подальшого розвитку вітрової енергетики. За класифікацією міжнародного стандарту IEC 61400 наведено аналіз структур і технічних характеристик вітрових генераторів, а саме типи електричних двигунів, силові схеми напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують генерацію електричної енергії до загальнопромислової електричної мережі. Розглянуто питання можливості роботи вітрових генераторів у широких діапазонах вітру, питання емісії реактивної потужності та вищих гармонік струмів до загальнопромислової електричної мережі, а також питання ККД різних структур вітрогенераторів. Запропоновано систему керування вітровою турбіною з асинхронним генератором. Наведено дослідження перехідних процесів керування та енергетичної сумісності вітроустановки повного перетворення енергії з мережею живлення шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання в програмному середовищі Matlab / Simulink. Отриманий результат вказує на принципову можливість роботи асинхронного генератора з короткозамкненим ротором у складі вітроустановки, що дає змогу віддавати потужність до мережі змінного струму при низьких швидкостях вітру.*

***Ключові слова:** асинхронний генератор, вітрова турбіна, вітроенергетика, електростанція, система керування.*

**Abstract.** *The dynamics of the development of alternative power sources over the past several decades are presented, which gives reason to talk about the trends in the further development of wind energy. An analysis of the structures and technical characteristics of wind generators classified according to the international standard IEC 61400 is given. According to the classification of the international standard IEC 61400, the structures of wind generators are presented, namely, types of electric motors, power circuits of semiconductor converters that provide the generation of electrical energy to the general industrial electrical network. The use of power electronics in various types of wind turbine generation systems and offshore wind farms provides improved wind turbine performance. Semiconductor converters are used in frequency and voltage control to regulate active and reactive powers. The issue of the possibility of operation of wind generators in wide wind ranges, the issue of emission of reactive power and higher harmonics of currents to the general industrial electrical network, as well as the issue of efficiency of various structures of wind generators are considered. A wind turbine control system with an asynchronous generator is proposed. A study of transient control processes and energy compatibility of a full energy conversion wind turbine with a power supply network by simulation computer modeling in the Matlab / Simulink software environment is given. The obtained result indicates the fundamental possibility of operation of an asynchronous generator with a short-circuited rotor as part of a wind turbine operating in conditions of variable wind speed. The proposed layout of the wind turbine with full energy conversion allows power to be delivered to the AC grid at a variable frequency of rotation of the wind motor shaft, which allows to increase the control range and maximize the generated power at low wind speeds.*

**Keywords:** *asynchronous generator, wind turbine, wind energy, power plant, control system.*

**Вступ.** Енергія вітру є актуальним і перспективним видом відновлюваних видів енергії. Станом на 2020 рік було встановлено 93 ГВт нових потужностей, що на 53 % більше порівняно з показниками 2019 року. У 2020 році рекордне зростання було обумовлене сплеском установок у Китаї та США – двох найбільших світових ринках вітроенергетики, які разом встановили майже 75 % нових установок у 2020 році, що склало понад половину всієї світової вітроенергетики. У 2020 році загальна встановлена потужність усіх вітрогенераторів становила 743 ГВт, що перевищило сумарну встановлену потужність атомної енергетики (проте на практиці використана в середньому за рік потужність вітрогенераторів у кілька разів нижче встановленої потужності, у той час як атомна електростанція майже завжди працює в режимі встановленої потужності). У 2019 році кількість електричної енергії, виробленої всіма вітрогенераторами світу,

склала 1430 ТВт·год (5,3 % всієї виробленої людством електричної енергії) [1, 2].

З 2014 року 85 країн світу використовують вітроенергетику на комерційній основі. Великі вітрові електростанції включаються до загальної мережі, дрібніші використовуються для постачання електрики до віддалених районів. На відміну від викопного палива, енергія вітру практично невичерпна, повсюдно доступна та більш екологічна [3, 4]. Деякі країни особливо інтенсивно розвивають вітроенергетику. За даними WindEurope, у 2019 році в Данії за допомогою вітрогенераторів було вироблено 48 % усієї електрики, в Ірландії – 33 %, Португалії – 27 %, Німеччині – 26 %, Великобританії – 22 %, Іспанії – 21 %, Європейському Союзу загалом – 15 % [5].

Отже, кількість електроенергії, що генерується вітровою енергетикою, за останні роки експоненціально зростає (рис. 1).

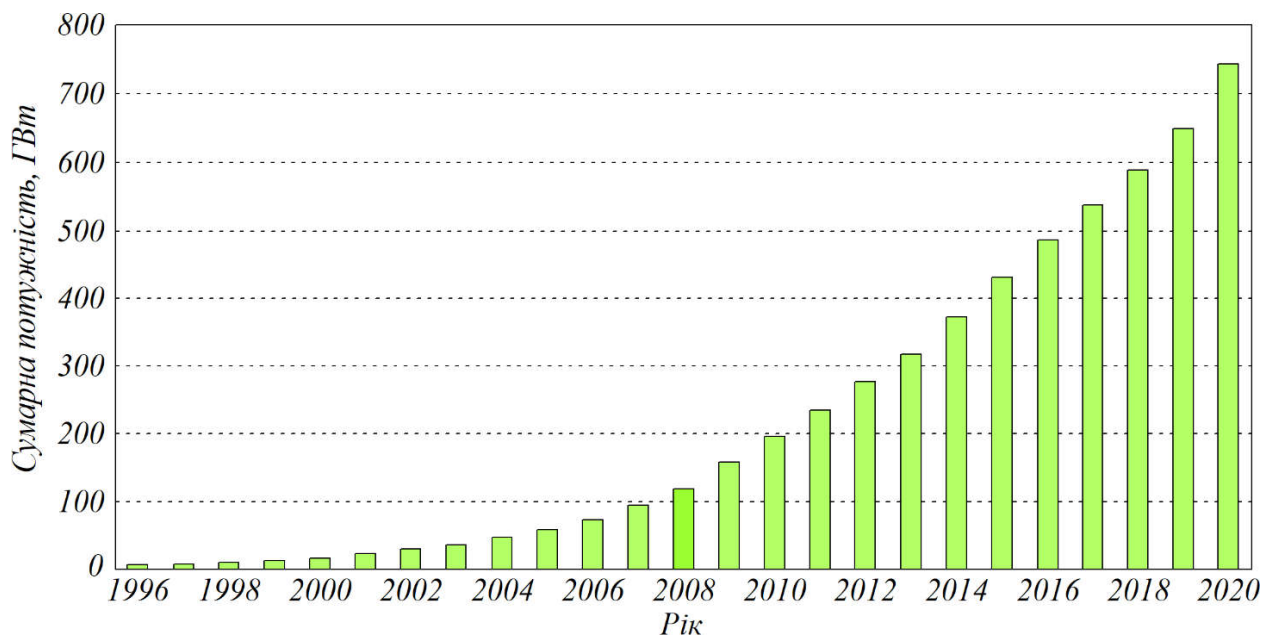


Рис. 1. Динаміка зростання вітрової енергетики

Спорудження вітрових електростанцій пов'язане з деякими труднощами технічного та економічного характеру, що уповільнюють поширення вітроенергетики. Зокрема, мінливість вітрових потоків не створює проблем при невеликій частці вітроенергетики в загальному виробництві електроенергії, проте при зростанні цієї частки збільшуються також і проблеми надійності виробництва електроенергії. Для вирішення подібних проблем використовується інтелектуальне керування розподіленням електроенергії. Завданням системи перетворення вітрових електростанцій є формування синусоїдальних вихідних напруг зі стабільною амплітудою та частотою. Для формування синусоїдальної вихідної напруги можна використовувати різні типи напівпровідникових перетворювачів, а також різні системи керування [6, 7].

Робота продовжує дослідження, проведені в попередні роки, і базується на науковому доопрацюванні та результатах, частково опублікованих у роботах [8, 9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Велика частина вітрових турбін використовує систему DFIG (асинхронні

генератори з подвійним живленням), що дає змогу генерувати електроенергію зі змінною швидкістю. Роботи [10, 11] з DFIG зробили внесок у керування вітровими системами (керування зворотним кроком, режимом ковзання, MPPT, моделлю PCHD, D-FOC). Основний недолік такого керування полягає в тому, що для синтезу воно ґрунтується на строгому математичному аспекті.

У роботі [12] запропоновано використання системи передачі постійного струму високої напруги (HVDC), що має технічні переваги у створенні асинхронного з'єднання та масового постачання електроенергії на великі відстані. Зростаюча кількість проєктів HVDC у всьому світі показує, що технологія HVDC відіграє все більш важливу роль у світовій системі передачі електроенергії. Однак до недоліків такої системи слід віднести велику вартість при побудові системи. Побудувати перетворювальну станцію набагато дорожче, ніж звичайну підстанцію змінного струму аналогічної потужності, оскільки для кращих технічних характеристик системи HVDC потрібно набагато більше компонентів. При цьому збільшується кількість гармонік, що впливають на якість

електроенергії та можуть призвести до коливань системи.

Метод ПД-регулювання, запропонований у роботі [13], забезпечує бажану поведінку замкненої системи таким чином, щоб отримати максимальну вихідну потужність і досягти зменшення структурних навантажень і втоми. Однак не враховується коливання башт. Тому в цій ситуації необхідна модель вітряної турбіни з розподіленими параметрами та опис з точки зору розподілу маси та жорсткості.

Отже, завдання визначення оптимального компонування та системи керування вітроустановки з повним перетворенням енергії є актуальним невіршеним завданням.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є аналіз впливу системи керування вітровою турбіною з асинхронним генератором на енергетичні показники вітроустановки, що дасть можливість віддавати потужність до мережі змінного струму при низьких швидкостях вітру. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– порівняння можливих топологій вітрових електростанцій та ефективності застосування вітроустановок з різним компонуванням;

– дослідження перехідних процесів керування та енергетичної сумісності вітроустановки повного перетворення енергії з мережею живлення.

**Основна частина дослідження.**  
**Керування вітровою турбіною.** Керування вітровою турбіною включає як швидко, так і повільну динаміку керування. Загалом потужність має контролюватися за допомогою аеродинамічної системи та реагувати на задане значення (або диспетчерським центром, або локально) з метою максимізації виробництва енергії на основі доступної енергії вітру. Контролер потужності також повинен мати можливість обмежувати потужність [14].

При керуванні вітроенергетичною установкою з генераторною системою

подвійного живлення вітрова турбіна зазвичай змінюватиме швидкість пропорційно швидкості вітру і підтримуватиме фіксований кут нахилу. За дуже слабкого вітру швидкість турбіни буде зафіксовано на максимально допустимому кванті, щоб не було перенапруги.

Контролер кута нахилу обмежує потужність, коли турбіна досягає номінальної потужності. Генерована електроенергія виробляється за рахунок керування генератором з подвійним живленням через перетворювач на боці ротора. Керування перетворювачем з боку мережі просто підтримує фіксовану напругу постійного струму. В обох перетворювачах використовуються внутрішні контури струму, які зазвичай є лінійними П-регуляторами. Перетворювачі потужності на боці мережі та боці ротора є перетворювачами джерела напруги [15, 16].

Іншим рішенням для керування електричною потужністю є використання багатополосного синхронного генератора [17, 18]. Подібна система дуже широко використовується в промисловості.

Пасивний випрямляч і підвищувальний перетворювач використовуються для підвищення напруги на низькій швидкості. Мережевий інвертор взаємодіє з проміжною ланкою постійного струму.

Загальним для обох систем є те, що вони здатні керувати активною та реактивною потужністю в мережі з високою динамікою.

**Конфігурації вітрової електростанції.** У багатьох країнах енергетичне планування здійснюється з високим проникненням енергії вітру, що забезпечується великими вітровими електростанціями. Ці вітрові електростанції можуть у майбутньому зробити значний внесок у національну енергосистему і, отже, відіграти важливу роль у забезпеченні якості електроенергії та керуванні складними енергосистемами. Тому до генеруючих установок висувуються дуже високі технічні вимоги, такі як керування

частотою і напругою, регулювання активної та реактивної потужності, швидке реагування на перехідні та динамічні ситуації енергосистеми, наприклад зниження потужності від номінальної до 20 % потужності протягом 2 с [19, 20].

Технологія силової електроніки є важливою частиною як конфігурації системи, так і в керуванні морським вітром. Одна морська вітрова електростанція, оснащена силовими електронними перетворювачами, може здійснювати керування як активною, так і реактивною

потужністю, а також керувати вітровими турбінами зі змінною швидкістю, щоб максимізувати корисну енергію і знизити механічну напругу та акустичний шум [21, 22]. Подібне рішення експлуатується в Данії як морська вітроелектростанція потужністю 160 МВт (рис. 2).

Вітроелектростанції на базі вітроустановки типу А безпосередньо підключені до мережі. У точці підключення використовується блок компенсації реактивної потужності, як наведено на рис. 3.

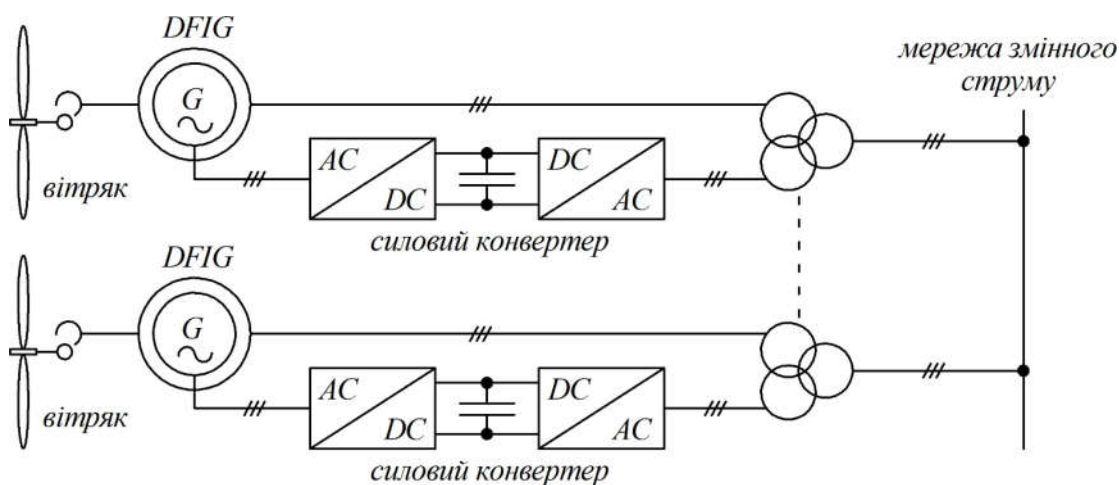


Рис. 2. Вітрова електростанція на базі DFIG з підключенням до мережі змінного струму (вітроустановка типу А)

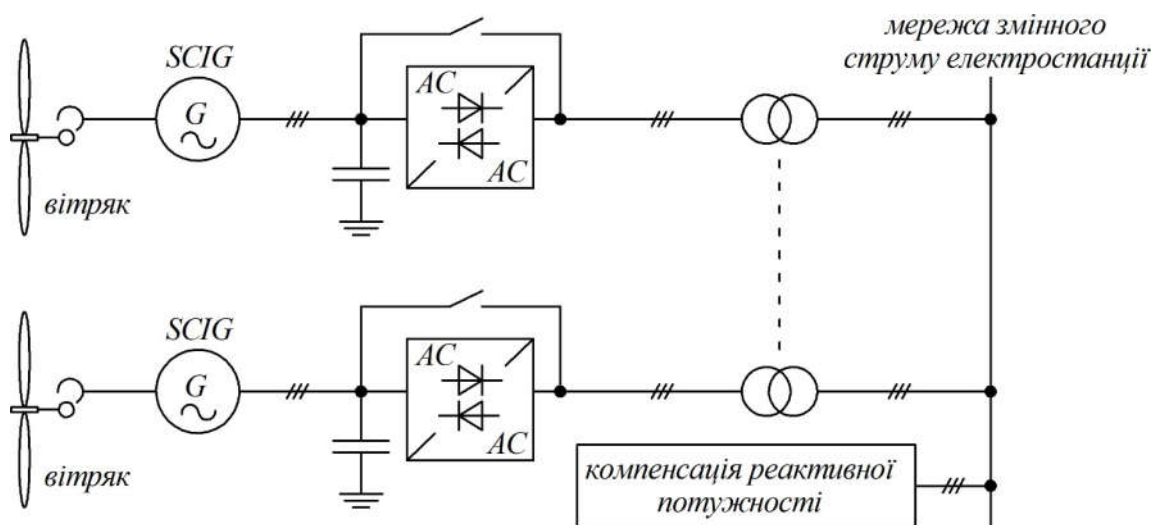


Рис. 3. Активна вітрова електростанція з підключенням до мережі змінного струму (вітроустановка типу В)

Для передачі електроенергії на великі відстані від морської вітрової електростанції цікавим варіантом може бути система HVDC [23, 24]. У системі передачі HVDC низька або середня змінна напруга на вітровій електростанції перетворюється на високу постійну напругу на боці передачі, а потужність постійного струму передається в берегову систему, де постійна напруга перетворюється на змінну напругу (рис. 4). Топологія може навіть дати змогу змінювати швидкість вітрових турбін всієї вітрової електростанції.

Іншу можливу конфігурацію системи передачі постійного струму наведено на рис. 5, де кожен вітрогенератор має свій власний силовий електронний перетворювач, що дає змогу експлуатувати кожен вітрогенератор з індивідуальною оптимальною швидкістю. На вітровій електростанції є загальна мережа постійного струму, а для підключення до берегової мережі використовується повномасштабний перетворювач енергії [25, 26].

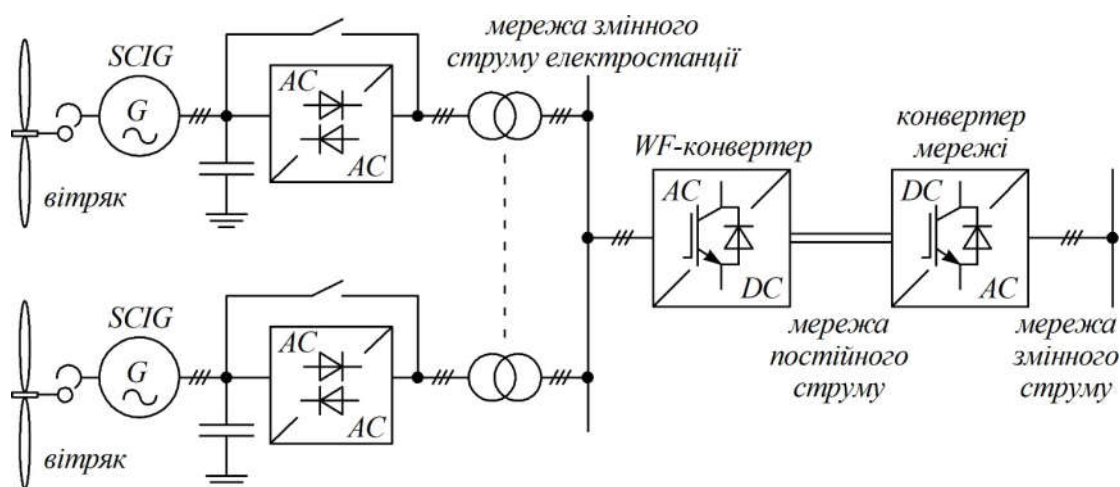


Рис. 4. Активна вітрова електростанція з підключенням до мережі постійного струму (вітроустановка типу С)

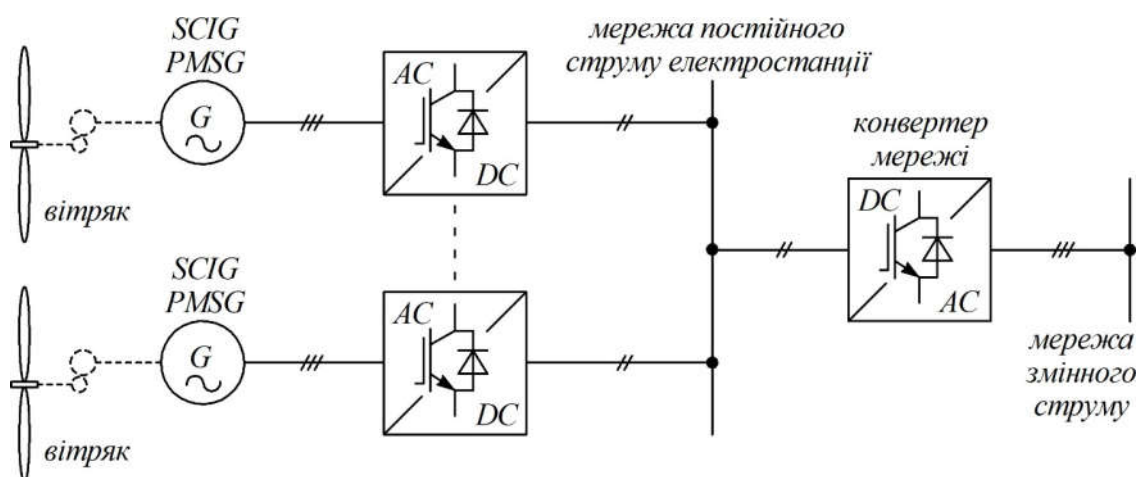


Рис. 5. Вітроелектростанція з загальною мережею постійного струму на базі вітрогенераторів зі змінною швидкістю обертання та повномасштабним перетворювачем потужності (вітроустановка типу D)

Порівняння можливих топологій вітрових електростанцій наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, вітрові електростанції мають цікаві особливості, щоб діяти як джерело енергії в мережі. Деякі мають

кращі характеристики, ніж інші. Суть завжди зводиться до сукупних витрат, включаючи виробництво, інвестиції, технічне обслуговування та надійність.

Таблиця 1

Порівняння топологій вітрових електростанцій

Параметр	Вітроустановка			
	тип А	тип В	тип С	тип D
Індивідуальний контроль швидкості	так	ні	так	ні
Електронне керування активною потужністю	так	ні	так	так
Контроль реактивної потужності	так	центра-лізований	так	так
Коротке замикання (активне)	частково	частково	ні	ні
Потужність короткого замикання	сприяє	сприяє	ні	ні
Контроль пропускної спроможності	10 мс ... 100 мс	200 мс ... 2 с	10 мс ... 100 мс	10 мс ... 10 с
Функція очікування	так	ні	так	так
Пристрій плавного пуску	ні	так	ні	ні
Пропускна спроможність до мережі	так	частково	так	так
Надмірність	так	так	ні	ні

**Вимоги підключення до мережі.**

Деякі європейські країни наразі мають спеціальні мережеві коди для вітроенергетики. Ці вимоги здебільшого відображують впровадження енергії вітру в електричну мережу.

Вимоги до вітроенергетики охоплюють широкий діапазон рівнів напруги від середньої до дуже високої напруги. Мережеві коди для вітрової енергії вирішують проблеми, які змушують вітрові електростанції діяти як звичайні електростанції в електричній мережі. Ці вимоги зосереджені на керованості, якості електроенергії, можливості усунення несправностей і підтримці мережі під час збоїв [27, 28].

**Регулювання активної потужності.**

Відповідно до вимог вітрові турбіни мають

бути здатними керувати активною точкою загального з'єднання в заданому діапазоні потужностей. Активна потужність зазвичай регулюється з урахуванням частоти системи, щоб потужність, що подається до мережі, зменшувалась, коли частота мережі перевищувала 50 Гц. Так, наприклад, типову характеристику регулювання частоти для вітрових турбін, підключених до мережі в Данії, наведено на рис. 6.

Навпаки, інші коди мережі, наприклад у Великобританії, вказують на те, що активна вихідна потужність має підтримуватися сталою для діапазону частот від 49,5 до 50,5 Гц. Падіння потужності, що віддається, допускається не більш ніж на 5 % при зниженні частоти до 47 Гц.



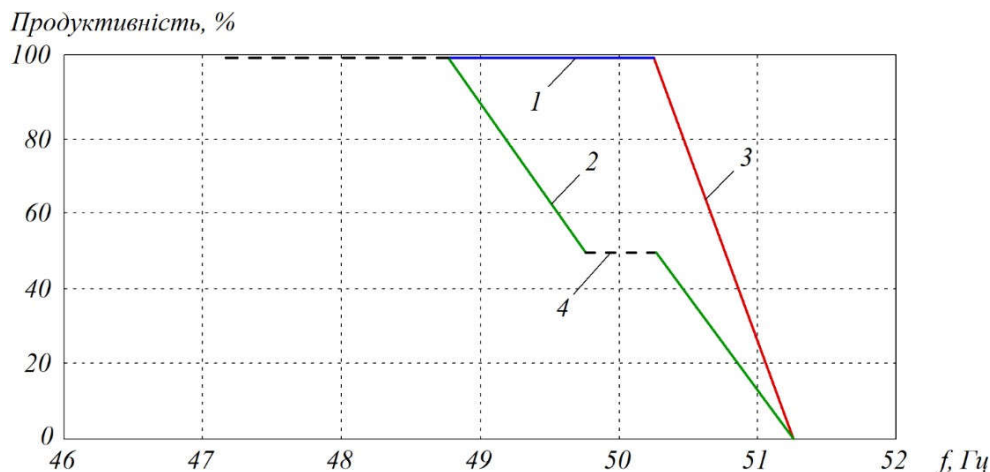


Рис. 6. Характеристика регулювання частоти для вітрових турбін:  
 1 – можлива продуктивність; 2 – з 50 % знижувальним регулюванням;  
 3 – без знижувального регулювання; 4 – мертва зона

У Данії висуваються найвищі вимоги до керованості електроенергії, що виробляється. Вітрові електростанції, підключені на рівні передачі, мають діяти як звичайні електростанції, забезпечуючи широкий діапазон керування вихідною потужністю на основі вимог оператора системи передачі, а також участь у первинному і вторинному керуванні. Для

керування вітровою електростанцією потрібні сім функцій регулювання. Серед таких пріоритетних функцій регулювання активної потужності, реалізованих у контролері вітрової електростанції відповідно до вимог мережевих норм, мають бути такі: дельта-контроль, контроль балансу, абсолютна продуктивність і захист системи (рис. 7).

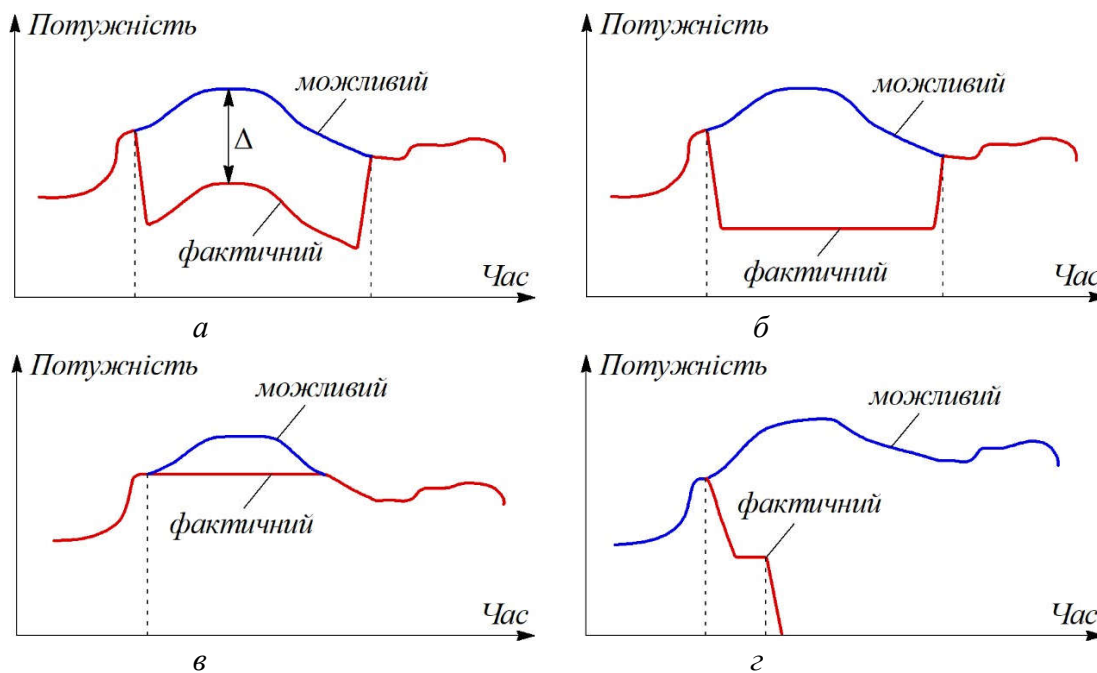


Рис. 7. Функції регулювання активної потужності:  
 а – дельта-контроль; б – контроль балансу; в – абсолютна продуктивність; г – захист системи



Контроль реактивної потужності і стабільність напруги. Реактивна потужність зазвичай регулюється в заданому діапазоні. Коди мережі по-різному визначають цю можливість керування. Наприклад, датський мережвий кодекс визначає діапазон керування реактивною

потужністю з урахуванням вихідної активної потужності (рис. 8).

Ірландський мережвий кодекс визначає вимоги до регулювання реактивної потужності для вітрових турбін з урахуванням коефіцієнта потужності (рис. 9).

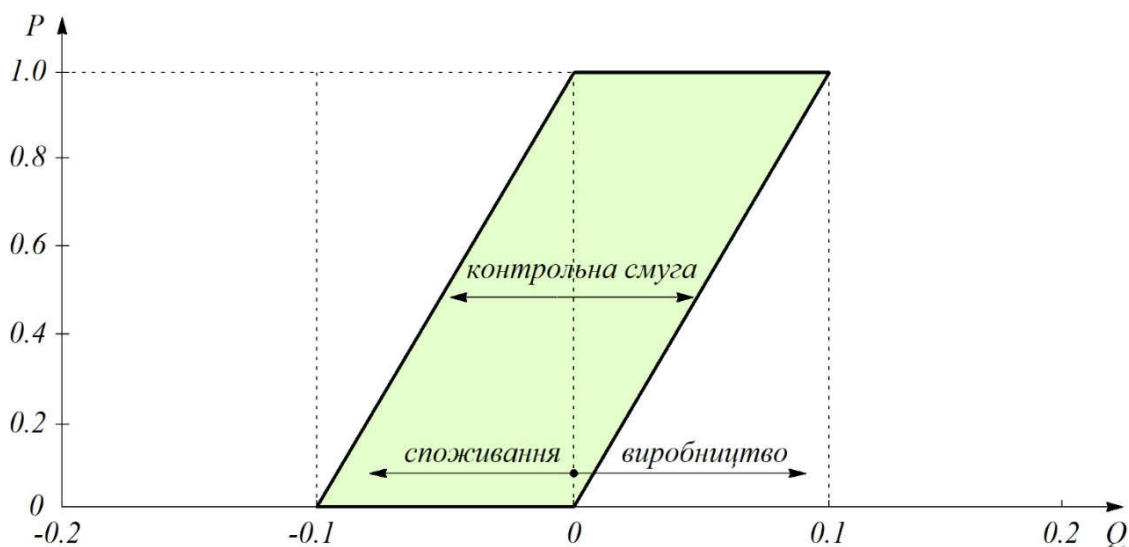


Рис. 8. Діапазон керування реактивною потужністю

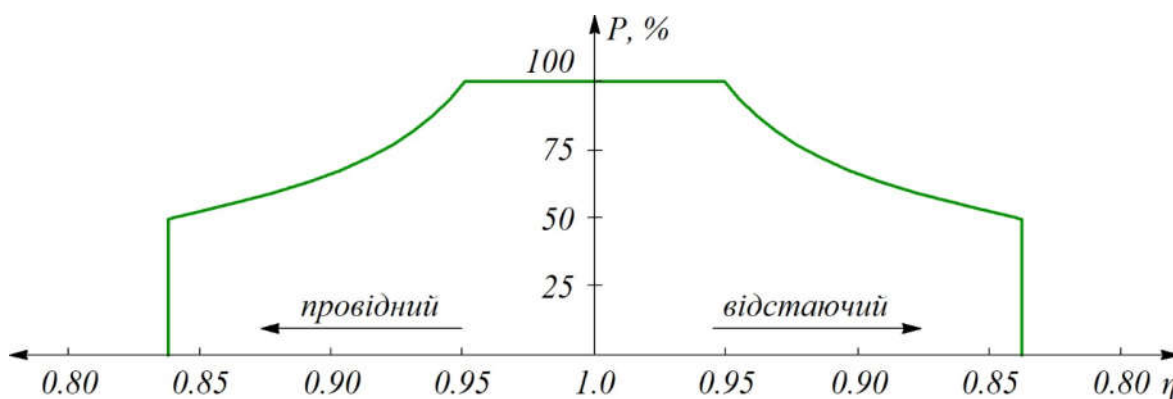


Рис. 9. Вимоги до регулювання реактивної потужності

У німецькому стандарті мережі передачі вітрової енергії зазначено, що вітроенергетичні установки мають забезпечувати подачу реактивної

потужності в точці підключення без обмеження вихідної активної потужності (рис. 10).

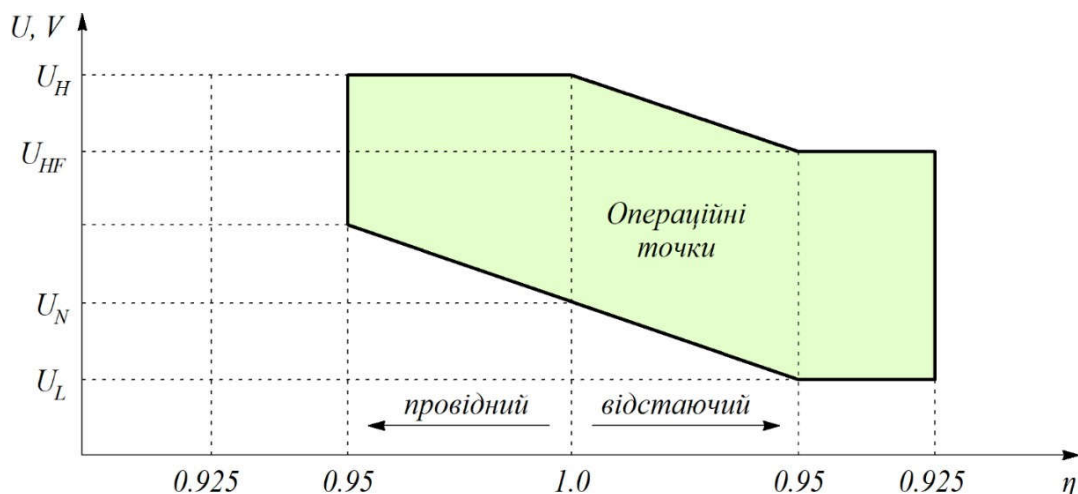


Рис. 10. Вимоги до забезпечення реактивною потужністю генеруючих установок без обмеження вироблення активної потужності

*Якість електроенергії.* Питання якості електроенергії вирішуються насамперед для вітрових турбін, підключених до мереж середньої напруги [29, 30]. У Данії та Ірландії також є вимоги на рівні передачі. В основному використовуються два стандарти для визначення параметрів якості електроенергії, а саме IEC 61000-х-х та EN 50160. Конкретні значення наводяться для швидких змін напруги, сили короткострокового мерехтіння, сили

довготривалого мерехтіння та загального гармонічного спотворення.

*Пропускна спроможність системи.* Усі розглянуті мережні норми вимагають можливості усунення несправностей для вітрових турбін. Одна з проблем полягає в тому, що розрахунок напруги при всіх типах несиметричних замикань не дуже чітко визначено в деяких мережевих нормах. Профіль напруги для стійкості до несправностей у європейських мережевих нормах для вітроенергетики наведено на рис. 11.

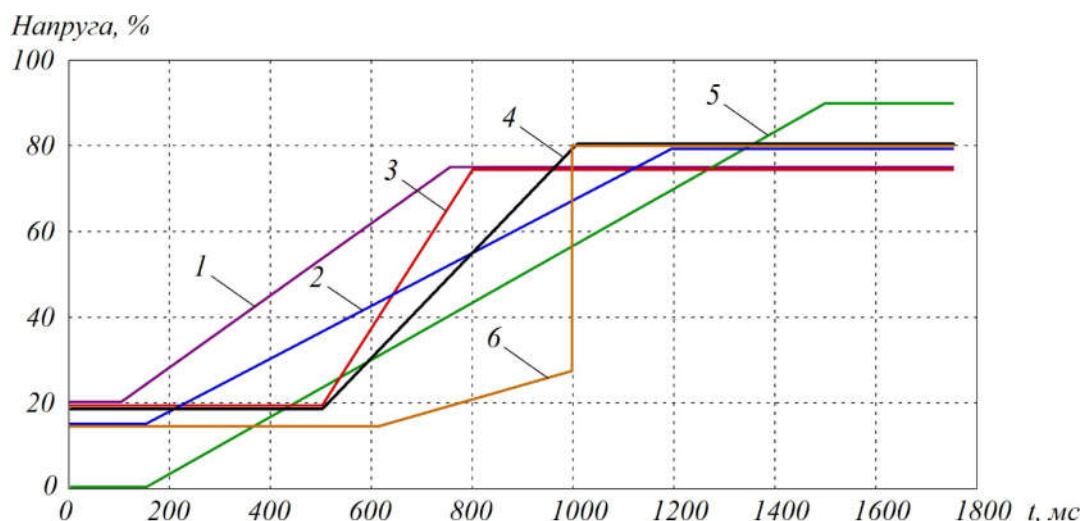


Рис. 11. Профіль напруги для стійкості до несправностей у європейських мережевих нормах: 1 – Данія (< 100 кВ); 2 – Великобританія (> 110 кВ); 3 – Італія (< 30 кВ); 4 – Іспанія (> 100 кВ); 5 – Німеччина (> 100 кВ); 6 – Ірландія (< 110 кВ)

Мережевий кодекс Ірландії дуже вимогливий щодо тривалості короткого замикання, тоді як у Данії найнижча тривалість короткого замикання лише 100 мс. Проте мережевий кодекс Данії вимагає, щоб вітрова турбіна залишалася підключеною до електричної мережі під час

послідовних збоїв, що є технічною проблемою.

З іншого боку, у Німеччині та Іспанії потрібна підтримка мережі під час короткого замикання за рахунок подачі реактивного струму до 100 % номінального, як наведено на рис. 12.

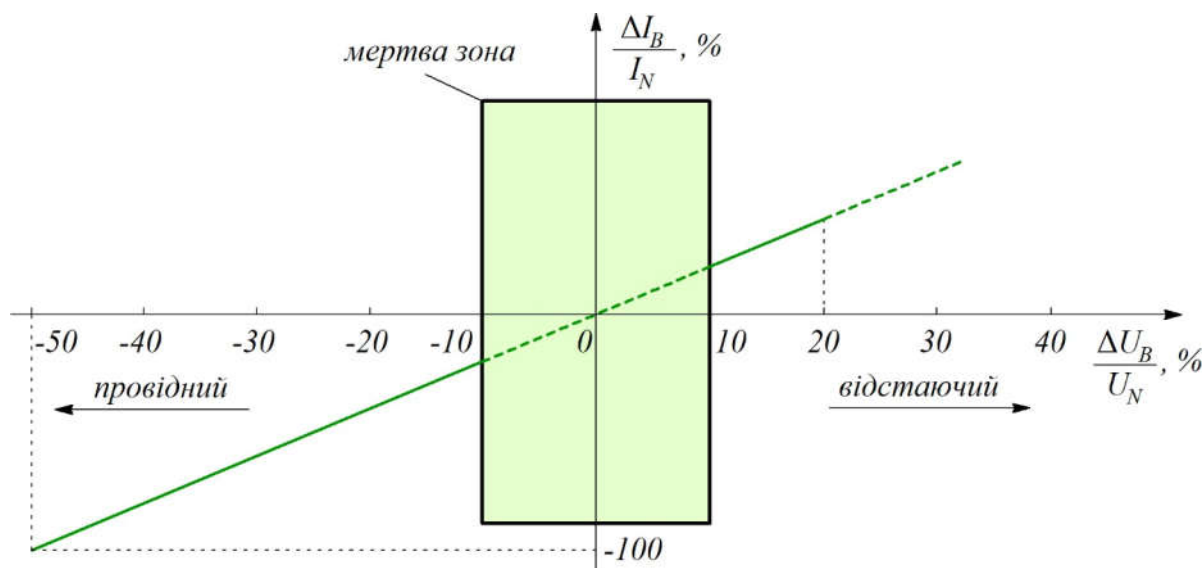


Рис. 12. Підтримка реактивного струму під час аварій

Таку вимогу важко задовольнити за допомогою деяких концепцій вітрових турбін, наприклад вітрова турбіна з активною зупинкою та безпосередньо підключеним до мережі асинхронним

генератором із короткозамкненим ротором (WT Type A).

Короткий виклад вимог до підключення вітрових електростанцій у Європі наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Огляд вимог до підключення для вітроенергетики

Параметр	Данія	Ірландія	Німеччина	Велико-британія	Іспанія	Італія
1	2	3	4	5	6	7
Рівень напруги	TS	DS (TS)	TS (DS)	TS (DS)	TS	> 35 кВТ
Рівень потужності	всі	≥ 5 МВт	всі	всі	всі	> 10 МВт
Допуск на діапазон частот	так	так	так	так	–	так
Частота	Контроль частоти	всі	всі	всі	всі	> 25 МВт
	Скорочення енергії, МВт	20...100 % $P_r$	так	так	–	–
	Максимальна підвищувальна швидкість	10...100 % $P_r / \min$	1...30 МВт/хв	так	–	–

		1	2	3	4	5	6	7
Напруга	Контроль напруги	ні	так	ні	ні	–	–	ні
	Контроль реактивної потужності	так	так	так	так	так	–	так
Якість напруги	Швидкість зміни напруги	$\leq 3 \%$	–	$\leq 2 \%$	$\leq 3 \%$	–	–	EN 50160
	Інтенсивність короткотривалого мерехтіння	$\leq 0,3$	$\leq 0,35$	–	$\leq 0,8$	–	–	EN 50160
	Інтенсивність довготривалого мерехтіння	$\leq 0,2$	$\leq 0,35$	$\leq 0,46$	$\leq 0,6$	–	–	EN 50160
	Рівні гармонічної сумісності	–	конкретні рівні	EN 50160	IEC 61000-3-2	–	–	EN 50160
	THD	$\leq 1,5 \%$	$\leq 1,5 \%$	$\leq 8 \%$	N / A	–	–	EN 50160
Прохідна несправність	Тривалість несправності	100 мс	625 мс	150 мс	140 мс	500 мс	500 мс	
	Мінімальна напруга	$25 \% U_r$	$15 \% U_r$	$0 \% U_r$	$15 \% U_r$	$20 \% U_r$	$20 \% U_r$	
	Час відновлення	1 с	3 с	1,5 с	1,2 с	1 с	0,3 с	
	Профіль напруги	1, 2, 3-ph	1, 2, 3-ph	загальний	загальний	загальний	загальний	
	Введення реактивного струму	ні	ні	$> 100 \%$	ні	$> 100 \%$	ні	
Сигнали, зв'язок і керування	Доступність	так	так	так	так	–	–	так
	Вихідна активна потужність	так	так	так	так	–	–	так
	Вихідна реактивна потужність	так	так	так	так	–	–	так
	Скорочення енергії МВт	так	так	так	так	–	–	–
	Регулювання частоти	так	так	так	так	–	–	–
	Стан автоматичного вимикача	так	так	так	так	–	–	так
	Метеорологічні дані: швидкість вітру, напрям вітру, атмосферний тиск і температура	так	так	–	–	–	–	так

**Програмне моделювання імітаційної моделі вітроустановки.** Для оцінювання ефективності застосування вітроустановок того чи іншого компонування вимагає проведення досліджень перехідних процесів керування та енергетичної сумісності з мережею. У програмному середовищі

Matlab/Simulink було розроблено імітаційну модель вітроустановки з повним перетворенням енергії потужністю 120 кВт (рис. 13). Така вітроустановка належить до класу середньої потужності та найчастіше використовується з асинхронним генератором.

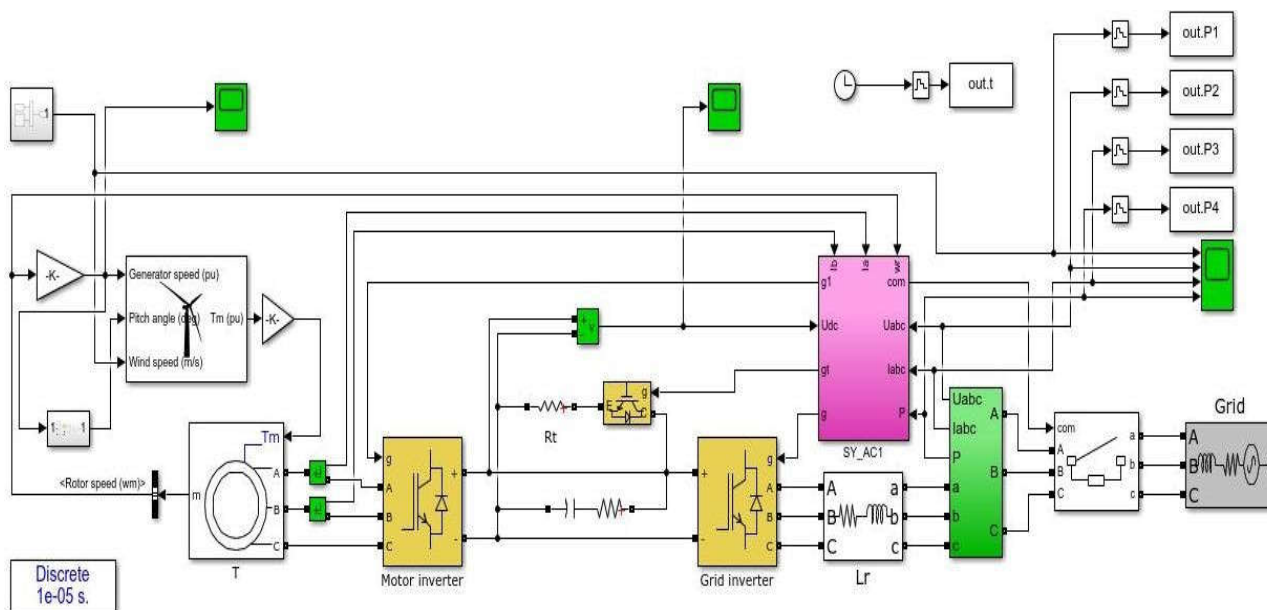


Рис. 13. Зовнішній вигляд імітаційної моделі вітроустановки з повним перетворенням енергії

Імітаційна модель вітроустановки складається з турбіни потужністю 130 кВт, асинхронного генератора потужністю 110 кВт, двох інверторів – збудження та мережевого, блока керування та мережі. Таке компонування дає змогу віддавати потужність до мережі змінного струму при непостійній частоті обертання вала вітродвигуна, що забезпечує збільшення діапазону керування та використання вітроустановки при низьких швидкостях вітру. Використання асинхронного генератора пов'язане з його низькою вартістю і великою надійністю, що є важливими параметрами для установок малої та середньої потужності.

У рамках імітаційної моделі робота вітроустановки полягає в перетворенні механічної енергії вітродвигуна, що реалізований за допомогою блока «Wind Turbine». Слід зауважити, що цей блок не враховує момент інерції вітродвигуна, тому його слід враховувати в імітаційній моделі асинхронного генератора. Інвертор збудження асинхронного генератора

реалізований блоком «Motor inverter», керується за допомогою просторово-векторної модуляції та забезпечує керування асинхронним генератором.

З'єднання з мережею змінного струму забезпечується за рахунок блока «Grid inverter». Мережевий інвертор перетворює енергію кола постійного струму в енергію змінного струму для передачі її до мережі з параметрами, що регламентовані вимогами до якості електричних мереж.

Систему керування асинхронним генератором побудовано за частотно-струмовим принципом, що є достатнім, оскільки у схемі використовується датчик частоти обертання генератора. Частоту комутації напівпровідникових вентилів прийнято на рівні 2 кГц.

У разі втрати з'єднання з мережею (обрив лінії або аварійне відключення) у схемі передбачено гальмівний резистор «Rt».

Результат моделювання роботи вітроустановки при зміні швидкості з 4 до 6 м/с наведено на рис. 14.

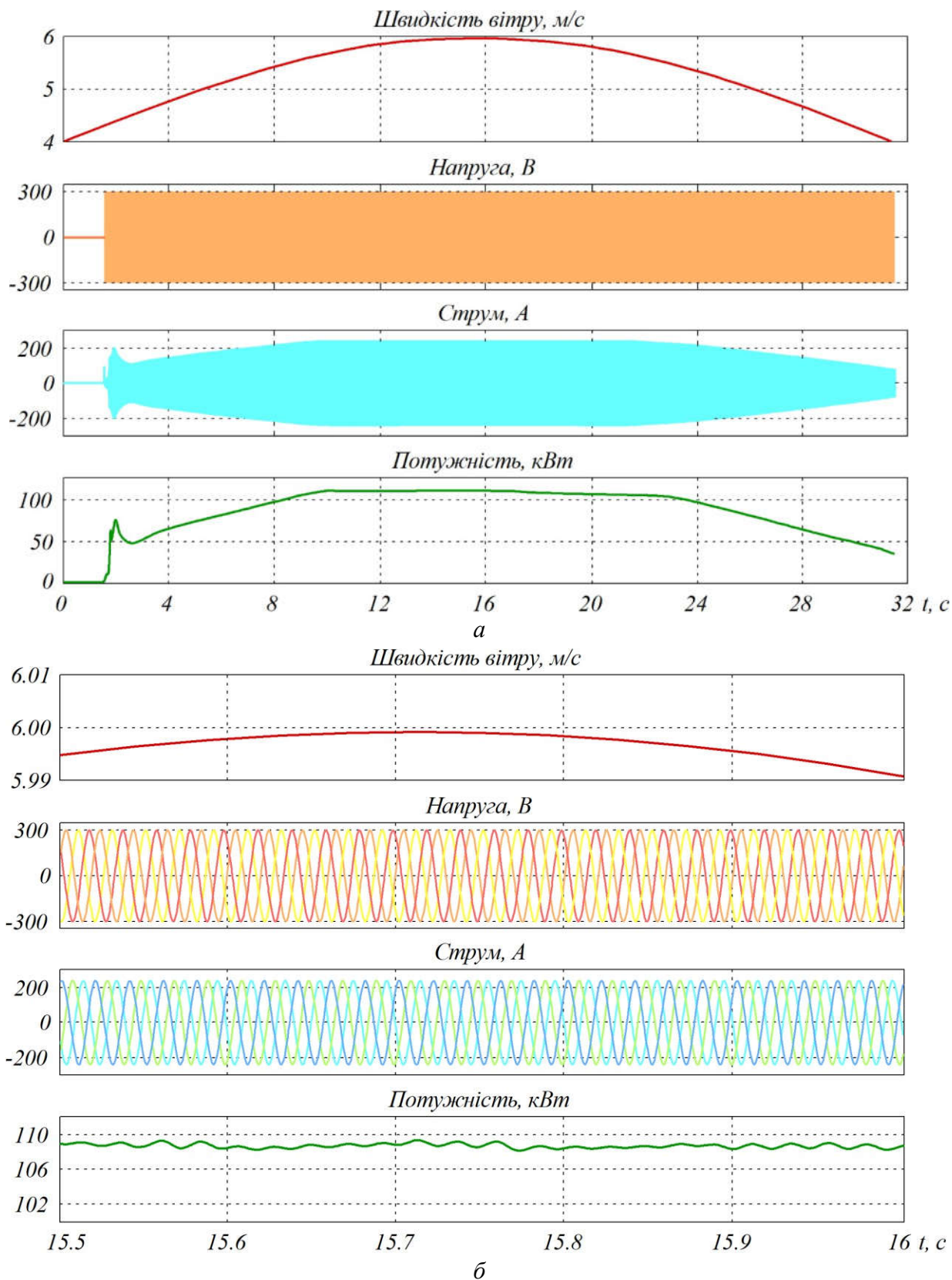


Рис. 14. Перехідний процес роботи вітроустановки: *а* – повний цикл при зміні швидкості з 4 до 6 м/с; *б* – масштабований процес при досягненні 6 м/с



Отриманий результат вказує на принципову можливість роботи асинхронного генератора з короткозамкненим ротором у складі вітроустановки, що працює в умовах змінної швидкості вітру. Це може бути використано для розроблення алгоритму керування вітроустановкою, що дасть змогу максимізувати вироблену потужність.

**Висновки і рекомендації щодо подальшого використання.** На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– проведено порівняння структур і технічних характеристик вітрових генераторів відомих електростанцій. Найбільш ефективним є компонування вітроустановки з асинхронним генератором;

– запропоноване компонування вітроустановки з повним перетворенням енергії дає змогу віддавати потужність до мережі змінного струму при непостійній частоті обертання вала вітрогенератора, що забезпечує збільшення діапазону керування та використання вітроустановки при низьких швидкостях вітру.

*Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).*

### Список використаних джерел

1. Ortega Izquierdo M., Del Rio P. An analysis of the socioeconomic and environmental benefits of wind energy deployment in Europe. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 160. P. 1067–1080. DOI: 10.1016/j.renene.2020.06.133.
2. Fouad A., Alali Ch., Gainullina L. Increasing the efficiency of wind farms. *iPolytech Journal*. 2022. Vol. 26. P. 217–227. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-2-217-227.
3. Muhammad Shahzad N., Nisar A., Muhammad B., Hafiz M. N. Potential environmental impacts of wind energy development. *A global perspective. Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2020. Vol. 13. P. 85–90. DOI: 10.1016/j.coesh.2020.01.002.
4. Chaudhuri A., Datta R., Kumar M. P., Davim J. P., Pramanik S. Energy Conversion Strategies for Wind Energy System: Electrical, Mechanical and Material Aspects. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 3, 1232. P. 1–36. DOI: 10.3390/ma15031232.
5. Watson S., Moro A., Reis V., Baniotopoulos C., Barth S., Bartoli G., Bauer F. Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 113, 109270. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109270.
6. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.
7. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
8. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 118–121.
9. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium*



*Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.

10. Hamiani H., Abdellah M., Tadjeddine A., Abdelkader B., Salim R. A wind turbine sensorless automatic control systems, analysis, modelling and development of IDA-PBC method. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 45–55. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp45-55.

11. Stock S., Babazadeh D., Becker C. Applications of Artificial Intelligence in Distribution Power System Operation. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 150098–150119. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3125102.

12. Zhao Q., Garcia-Gonzalez J., Garcia-Cerrada A., Renedo J., Rouco L. HVDC in the Future Power Systems. *Transmission Expansion Planning: The Network Challenges of the Energy Transition*. 2020. P. 117–151. DOI: 10.1007/978-3-030-49428-5\_6.

13. Cao D., Hu W., Zhao J., Zhang G., Zhang B., Liu Z., Chen Z., Blaabjerg F. Reinforcement learning and its applications in modern power and energy systems: A review. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2020. Vol. 8, No. 6. P. 1029–1042.

14. Ohya Y., Karasudani T., Nagai T., Watanabe K. Wind lens technology and its application to wind and water turbine and beyond. *Renew. Energy Environ. Sustain*. 2017. Vol. 2. P. 1–6. DOI: 10.1051/rees/2016022.

15. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskyi A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. *Modern engineering and innovative technologies*. 2022. Issue 19, Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.

16. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Scherbak Ya., Mashura A., Khomenko I. Energy efficiency criterion of power active filter in a three-phase network. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 165–170. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250073.

17. Chumack V., Tsyvinskyi S., Kovalenko M., Ponomarev A., Tkachuk I. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. P. 30–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193495.

18. Devederkin I., Nikitenko G., Konoplev E., Edakaev A. Device of synchronous generator with increased magnetic efficiency for use in wind power plants with capacity of up to 5 kW. *Engineering for Rural Development*. 2021. P. 1672–1678. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF363.

19. Hasan A., Elgammal T., Jackson R., Amano R. Comparative Study of the Inline Configuration Wind Farm. *Journal of Energy Resources Technology*. 2019. Vol. 142, No. 6. P. 1–23. DOI: 10.1115/1.4045463.

20. Alhadj Hassan F., Alali Ch., Gainullina L. Increasing the efficiency of wind farms. *iPolytech Journal*. 2022. Vol. 26. P. 217–227. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-2-217-227.

21. Wisatesajja W., Roynarin W., Intholo D. Comparing the effect of rotor tilt angle on performance of floating offshore and fixed tower wind turbines. *J. Sustain. Dev*. 2019. Vol. 12. P. 84–95. DOI: 10.5539/jsd.v12n5p84.

22. Hand B., Cashman A. A review on the historical development of the lift-type vertical axis wind turbine: From onshore to offshore floating application. *Sustain. Energy Technol. Assess*. 2020. Vol. 38, 100646. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100646.

23. Ryndzionek R., Sienkiewicz L. Evolution of the HVDC Link Connecting Offshore Wind Farms to Onshore Power Systems. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 8, 1914. P. 1–17. DOI: 10.3390/en13081914.

24. Korompili A., Wu Q., Zhao H. Review of VSC HVDC connection for offshore wind power integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1405–1414. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.064.

25. Thangavelu S. K., Wan T. G., Piraiarasi C. Flow simulations of modified diffuser augmented wind turbine. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 886, 012023. P. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899x/886/1/012023.
26. Joshi N., Sharma J. Analysis and Control of Wind Power Plant. *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. 2020. P. 412–415. DOI: 10.1109/ICECA49313.2020.9297620.
27. Torres-Madronero J. L., Alvarez-Montoya J., Restrepo-Montoya D., Tamayo-Avendano J. M., Nieto-Londono C., Sierra-Perez J. Technological and operational aspects that limit small wind turbines performance. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 22, 6123. DOI: 10.3390/en13226123.
28. Bechtle P., Schelbergen M., Schmehl R., Zillmann U., Watson S. Airborne wind energy resource analysis. *Renew. Energy*. 2019. Vol. 141. P. 1103–1116. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.118.
29. Qadr H. An Exploration into Wind Turbines, Their Impacts and Potential Solutions. *Journal of Environmental Science and Public Health*. 2018. Vol. 2, Issue 1. P. 64–69. DOI: 10.26502/jesph.96120029.
30. Falani S., Gonzalez M., Barreto F., Toledo J., Torkomian A. Trends in the technological development of wind energy generation. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*. 2020. Vol. 19. P. 43–68. DOI: 10.1386/tmsd\_00015\_1.
- 

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Хоружевський Григорій Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Харін Руслан Олександрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730-10-76.

E-mail: kharinruslan07@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (057) 730-10-76.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andrievych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (093) 917-60-20.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Khoruzhevskiy Hryhorii Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Kharin Ruslan Olexsandrovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (057) 730-10-76.

E-mail: kharinruslan07@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X.

Статтю прийнято 19.09.2022 р.