

УДК 620.92

ПЛАХТІЙ О. А., к.т.н. (Український державний університет залізничного транспорту),  
НЕРУБАЦЬКИЙ В. П., к.т.н. (Український державний університет залізничного транспорту),  
ГОРДІЄНКО Д. А., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту),  
ШЕЛЕСТ Д. А., аспірант (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»),  
СИНЯВСЬКИЙ А. В., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

## Динаміка, концепції та перспективи розвитку вітрової енергетики

*У статті розглянуто розробки в галузі вітрової енергетики. Наведено аналіз технічних характеристик основних типів вітрових генераторів. Розглянуто питання можливості регулювання швидкості обертання лопастей вітрогенератора, параметри силової напівпровідникової частини, що забезпечує режими плавного пуску генератора. Представлено різні методи керування вітровими турбінами, що встановлюють у віддалених районах з хорошими вітровими умовами та різними можливими конфігураціями. Приведено аналіз фотоелектричної технології, включаючи необхідне електронне базове перетворення потужності. Наведено силові перетворювачі та описано більш сучасні функції керування. Представлено загальний технологічний статус вітроенергетики та фотоелектричних технологій, що демонструє ефективніші та привабливіші джерела енергії для майбутнього. Запропоновано систему двоконтурного авторегулювання гібридного інвертора. Наведено дослідження перехідних процесів керування вітрогенератором шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі Matlab / Simulink.*

**Ключові слова:** вітрова енергетика, вітрогенератор, лопать, напівпровідниковий перетворювач, силова електроніка, система керування.

### Вступ

Світове споживання електроенергії зростає, тому є попит на подвоєння потужності протягом наступних 20 років. Виробництво, розподілення та використання енергії мають бути настільки технологічно ефективними, наскільки є можливості і стимули для економії енергії у кінцевого користувача. Дерегулювання енергетики знизило інвестиції у великі електростанції, а це означає, що потреба в нових джерелах електроенергії може бути дуже високою у найближчому майбутньому [1, 2].

Дві основні тенденції відіграватимуть важливу роль у вирішенні майбутніх проблем. Одна полягає у зміні джерел виробництва електроенергії з традиційної, викопної і короткострокової, на відновлювальні джерела енергії. Інша передбачає використання високоєфективної силової електроніки в електроенергетиці, передачі та розподіленні електроенергії до кінцевих користувачів [3, 4].

У класичних енергосистемах великі електростанції, що розташовані у відповідних географічних точках, виробляють більшу частину енергії, яка потім передається на великі відстані лініями електропередач. Центри керування постійно контролюють та регулюють енергосистему, щоб

забезпечити якість електроенергії, а саме частоту та напругу [5, 6].

Однак загальна енергосистема змінюється, з'являється велика кількість блоків розосередженої генерації, що включають як відновлювані, так і невідновлювані джерела, такі як вітрові турбіни, хвильові генератори, фотоелектричні генератори, малі гідроелектростанції, паливні елементи та газові (парові) комбінації теплоелектроцентралей. У багатьох місцях спостерігається широке використання відновлюваних джерел енергії у розподільних мережах та високий рівень проникнення. Наприклад, у Данії висока потужність проникнення енергії вітру зосереджена в основних районах країни, і загалом споживання електроенергії покривається за рахунок енергії вітру. Основними перевагами використання відновлюваних джерел енергії є усунення шкідливих викидів та невичерпні ресурси первинної енергії [7, 8]. Доступність відновлюваних джерел енергії має чіткі добові та сезонні закономірності, а попит на електроенергію з боку споживачів може відрізнитися характеристиками. Отже, важко експлуатувати енергосистему, в якій встановлено лише блоки відновлюваної генерації, через відмінності в характеристиках та високу невизначеність у доступності відновлюваних джерел енергії.

© О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко, Д. А. Шелест, А. В. Синявський, 2022

**Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій**

Технологія вітрових турбін є однією з технологій використання відновлюваних джерел енергії, що розвивається. Відповідно до робіт [9, 10] технологію, що використовується у вітрових турбінах, спочатку було засновано на короткозамкненому роторі асинхронного генератора, підключеного безпосередньо до мережі. Виробництво енергії вітру спочатку не впливало на керування енергосистемою, але тепер через розвиток потужностей має відігравати активну роль в енергосистемі та вимагає нових технічних рішень.

Відповідно до робіт [11, 12] пульсації потужності вітру майже безпосередньо передаються в електричну мережу. Крім цього, відсутній контроль активної та реактивної потужностей, які зазвичай є важливими параметрами керування для регулювання частоти та напруги. У міру збільшення діапазону потужності турбін ці параметри керування стають все більш важливими, і необхідно ввести силову електроніку як інтерфейс між вітровою турбіною та мережею.

Силову електроніку змінює базову характеристику вітрової турбіни з джерела енергії на джерело активної потужності [13, 14]. Технологія, що використовується у вітрових турбінах, не нова, проте є актуальною, оскільки сприяє розвитку напівпровідникових пристроїв і зниженню ціни на силову електроніку.

**Мета та завдання дослідження**

Метою роботи є дослідження динаміки, концепцій та перспектив розвитку вітрової енергетики, що дасть можливість визначення впливу системи керування двоконтурного гібридного інвертора на енергетичні показники вітроустановки для авторегулювання швидкості обертання лопастей вітрогенератора. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- визначення технічних характеристик основних типів вітрових генераторів;
- порівняння методів керування вітровою турбіною;
- дослідження енергетичних характеристик вітрогенератора з системою керування гібридного інвертора шляхом імітаційного моделювання.

**Викладення основного матеріалу**

**Технічні характеристики основних типів вітрових генераторів.** Протягом останніх тридцяти років кількість компонентів силової електроніки збільшувалася, головним чином, завдяки розвитку напівпровідникових пристроїв та мікропроцесорної технології [15, 16]. Типову силову систему, що складається з силового перетворювача, навантаження (генератора) і блоку керування, наведено на рис. 1 [17, 18].

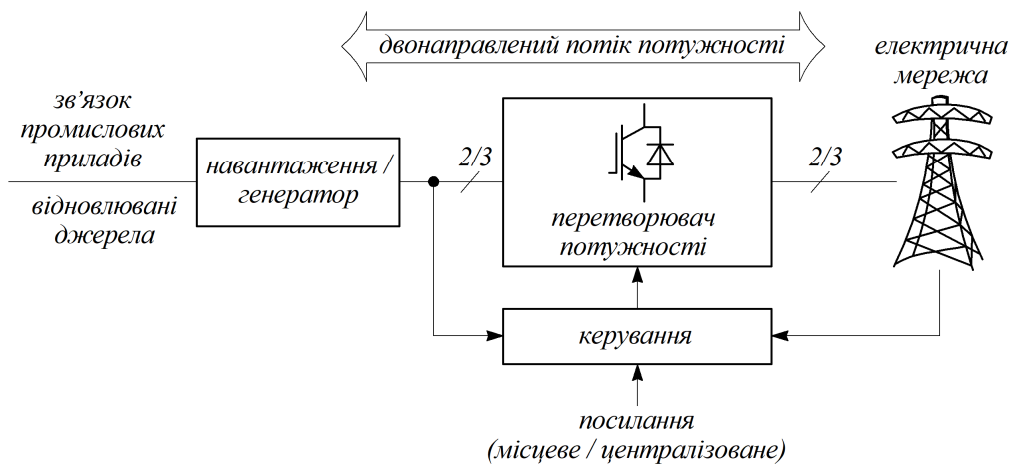


Рис. 1. Силова система перетворення енергії вітру

Перетворювач потужності (рис. 1) є інтерфейсом між навантаженням (генератором) та електричною мережею. Потужність може проходити в обох напрямках залежно від топології. Використання такої системи викликає занепокоєння з трьох важливих питань. Перше – це надійність, друге – ефективність, а третє – вартість. На сьогодні вартість силових напівпровідникових пристроїв щорічно знижується на 1...5% при тих же вихідних характеристиках для силової електронної системи. Прикладом електронної

системи, що серійно випускається та конкурентоспроможна за потужністю, є привод з регульованою швидкістю (ASD). Перетворення силової електроніки скорочується в об'ємі та вазі. Ключовою рушійною силою цього розвитку є те, що технологія силових електронних пристроїв все ще перебуває на стадії розробок. На рис. 2 наведено різні силові пристрої та компоненти, де розробки ще продовжуються.

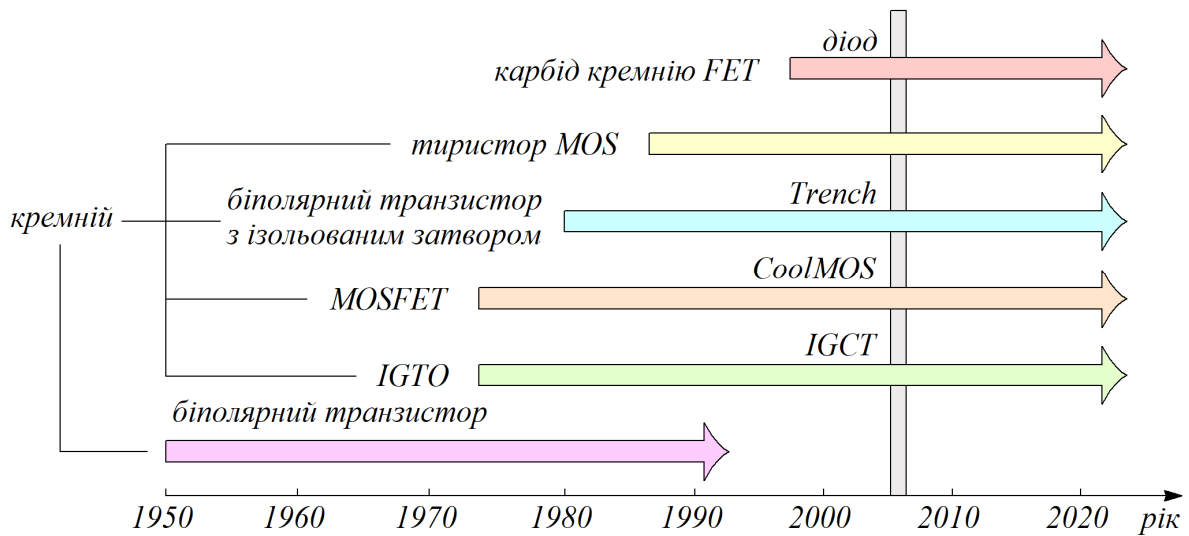


Рис. 2. Розвиток силової електронiки

Нинi розробляються силові бiполярнi транзистори на основi кремнiю, оскiльки такi пристрої кращi з точки зору простоти керування. Напряга пробою i пропускна спроможнiсть струму компонентiв також постiйно збiльшуються. Продовжуються дослiдження з метою змiни матерiалу з кремнiю на карбiд кремнiю, що може рiзко збiльшити питому потужнiсть силових перетворювачiв.

Вiтровi турбiни захоплюють енергiю вiтру за допомогою лопатей аеродинамiчної конструкцiї, що обертається, i перетворюють її в механiчну енергiю [19, 20]. Кiлькiсть лопатей зазвичай дорiвнює трьом. Оскiльки швидкiсть кiнця лопатi має бути меншою за половину швидкостi звуку, швидкiсть обертання буде зменшуватися в мiру збiльшення рiдiусу лопатi. Для вiтроустановок потужнiстю кiлька МВт частота обертання становитиме 10...15 об/хв. Найбiльш

економiчний спiсiб перетворення потужностi з низькою швидкiстю i високим обертальним моментом в електричну енергiю – це використання коробки передач i стандартного генератора з фiксованою швидкiстю, як наведено на рис. 3.

Коробка передач не обов'язкова, оскiльки можливими рiшеннями є багатополоснi генераторнi системи. Мiж мережею та генератором може бути встановлено силовий перетворювач.

Можливих технiчних рiшень багато [21, 22]. Технолiгiчну карту, починаючи з енергiї вiтру та закрiнюючи перетворенням механiчної енергiї на електричну, наведено на рис. 4. Розвиток вiтрових турбiн був стiйким протягом останнiх 25 рокiв, тому вiдомо чотири-п'ять поколiнь вiтрових турбiн, i зараз це перевiрена технологiя.

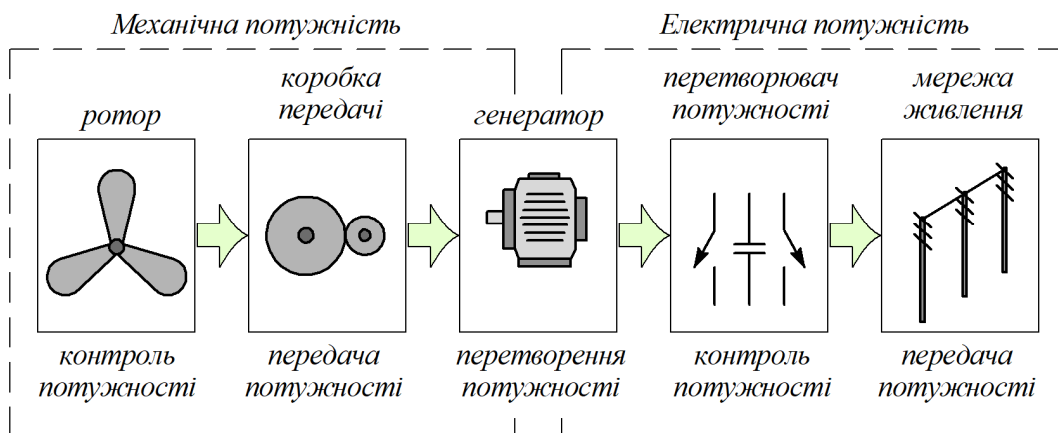


Рис. 3. Перетворення механiчної енергiї вiтру на електричну

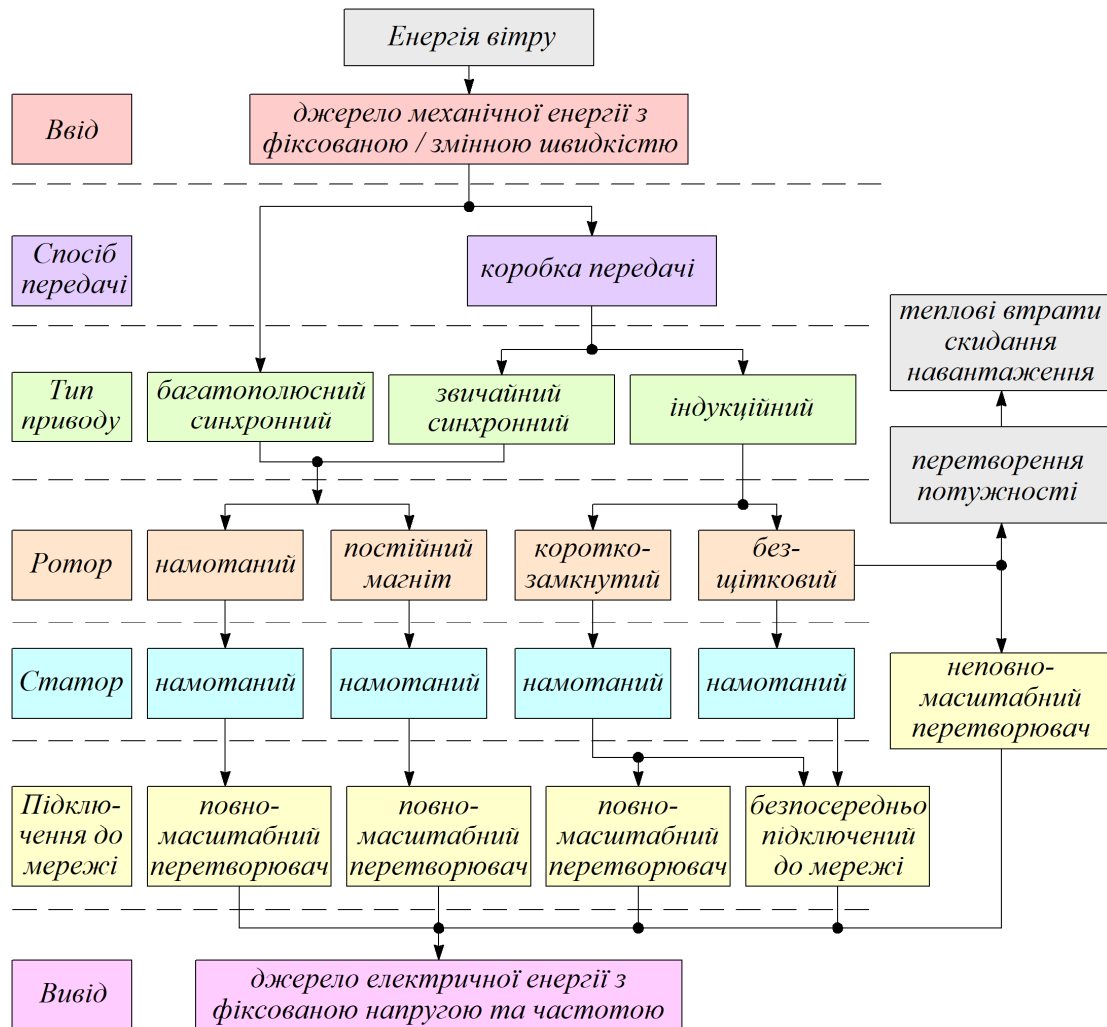


Рис. 4. Технологічна карта систем вітрогенераторів

Важливо мати можливість контролювати та обмежувати перетворену механічну потужність за більш високої швидкості вітру.

Обмеження потужності може бути виконано або шляхом керування завалюванням (становище лопаті фіксується, але зрив вітру з'являється вздовж лопаті при вищій швидкості вітру), або активним зривом (кут лопаті регулюється для створення зриву вздовж лопатей), або керуванням за тангажем (лопаті направлено проти вітру). Основні вихідні енергетичні характеристики цих методів керування потужністю наведено на рис. 5.

Іншою регульованою змінною у системі вітрової турбіни є швидкість [23, 24]. За цим критерієм вітрові турбіни поділяються на дві основні категорії: вітрові турбіни з фіксованою та регульованою швидкістю відповідно.

Завдяки роботі з фіксованою швидкістю коливання швидкості вітру перетворюються на механічні

коливання обертового моменту [25, 26]. Перевага вітрової турбіни з фіксованою швидкістю полягає в тому, що вона проста, міцна, надійна, має низьке енергоспоживання та низьку вартість електричної частини. Недоліками такої системи є неконтрольоване споживання реактивної потужності, механічні навантаження та обмежений контроль якості електроенергії.

Вітрові турбіни з регульованою швидкістю призначено для досягнення максимальної аеродинамічної ефективності в широкому діапазоні частот [27, 28]. Роботу зі змінною швидкістю можна безперервно адаптувати (прискорювати або уповільнювати швидкість обертання вітрової турбіни) до швидкості вітру так, щоб передавальне відношення швидкості лопаті залишалося постійним до заданого значення, що відповідає максимальному коефіцієнту потужності. На відміну від системи з фіксованою швидкістю, система з регульованою швидкістю

підтримує обертальний момент генератора майже постійним. З погляду вітрової турбіни найбільш важливі переваги роботи зі змінною швидкістю порівняно зі звичайною роботою з фіксованою

швидкістю: знижене механічне навантаження на механічні компоненти, такі як вал та редуктор, збільшене вироблення потужності і знижений рівень шуму.

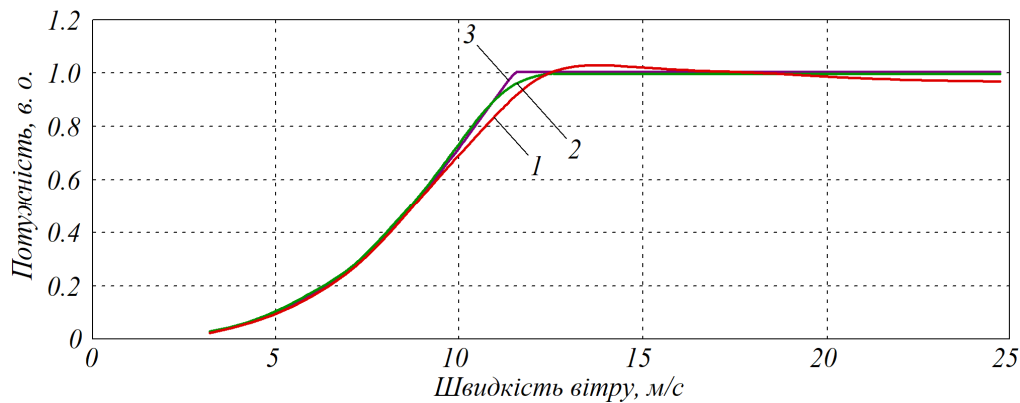


Рис. 5. Характеристики різних систем вітрових турбін з фіксованою швидкістю: 1 – керування звалюванням; 2 – активний зрив; 3 – керування за тангажем

Крім того, наявність перетворювачів енергії у вітрових турбінах також забезпечує високі потенційні можливості керування як для великих сучасних вітрових турбін, так і для вітрових електростанцій, щоб задовольнити високі технічні вимоги операторів мережі, такі як:

- регульована активна та реактивна потужності (керування частотою та напругою);
- швидке реагування на перехідні та динамічні ситуації енергосистеми;
- вплив на стабільність мережі та покращення якості електроенергії.

**Методи керування вітровою турбіною.** Найчастіше конструкції вітрових турбін, що застосовуються, можна поділити на чотири концепції [29, 30]. Основні відмінності між цими поняттями стосуються системи генерації і способу обмеження аеродинамічного ККД ротора вище за номінальне значення для запобігання навантаженню.

*Вітрові турбіни з постійною швидкістю (класифікатор WT Type A).* Вітрову турбіну з фіксованою швидкістю та асинхронним генератором з короткозамкненим ротором, підключеним безпосередньо до мережі, наведено на рис. 6.

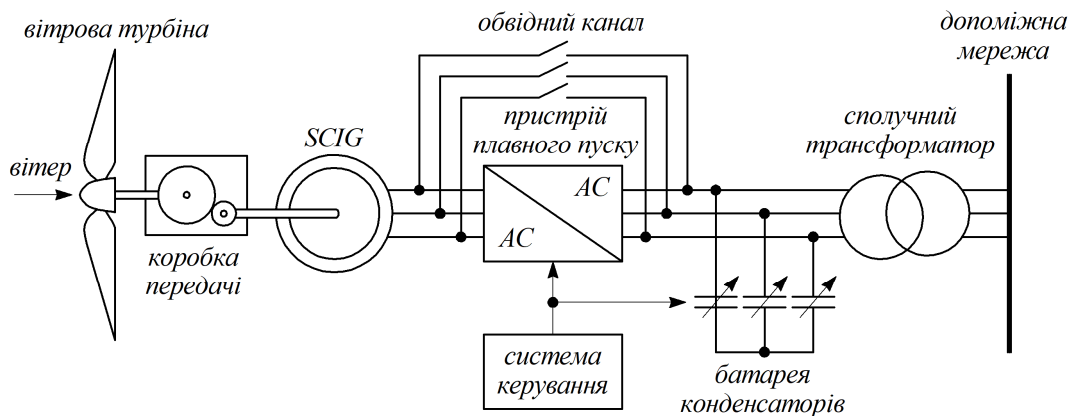


Рис. 6. Вітрова турбіна типу А

Дана концепція вимагає компенсатора реактивної потужності, щоб зменшити (майже виключити) передачу реактивної потужності турбогенераторів до мережі. Це зазвичай здійснюється шляхом безперервного перемикання конденсаторних батарей

відповідно до виробничих змін (5...25 кроків). Більш плавне підключення до мережі досягається за рахунок увімкнення пристрою плавного пуску. Незалежно від принципу керування потужністю вітрової турбіни з фіксованою швидкістю коливання вітру

перетворюються на механічні коливання і далі коливання електричної потужності. Це може призвести до коливань напруги у точці підключення у разі слабкої сітки. Через ці коливання напруги вітрова турбіна з фіксованою швидкістю споживає різну кількість реактивної потужності (у разі відсутності конденсаторної батареї), що збільшує як коливання напруги, так і втрати в мережі.

Отже, основними недоліками цієї концепції є те, що вона не підтримує жодного контролю швидкості, вимагає жорсткої сітки, а її механічна конструкція має

підтримувати високі механічні навантаження, спричинені поривами вітру.

*Вітрові генератори з частотно-регульованою швидкістю турбіни зі змінним опором ротора (класифікатор WT Type B).* Дана конфігурація відповідає обмеженій вітровій турбіні з регульованою швидкістю і змінним опором ротора, відомої як OptiSlip (VestasTM) (рис. 7).

У конфігурації використовується асинхронний генератор з фазним ротором (WRIG), що застосовано датським виробником Vestas Wind Systems із середини 1990-х років.

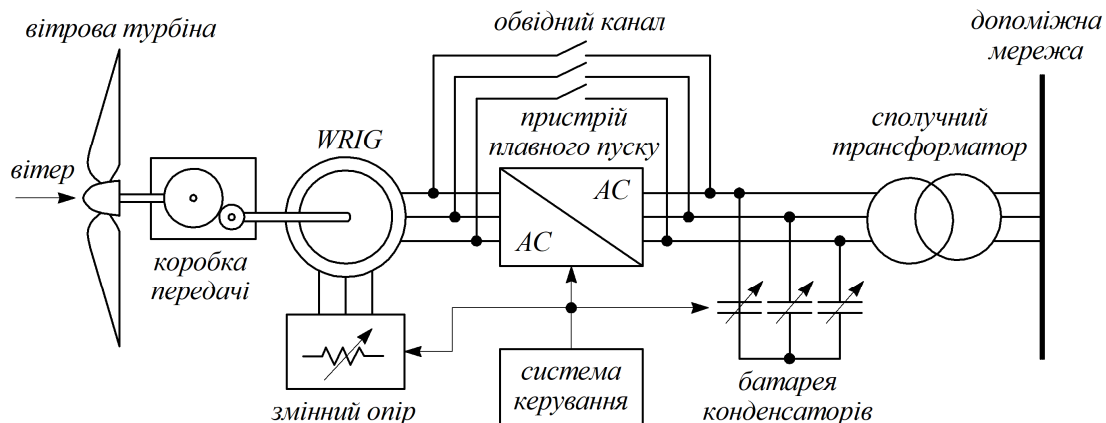


Рис. 7. Вітрова турбіна типу В

Генератор підключено безпосередньо до мережі. Обмотку ротора генератора послідовно з'єднано з регульованим опором, величина якого визначає діапазон змінної швидкості (зазвичай на 0...10 % вище синхронної швидкості). Конденсаторна батарея компенсує реактивну потужність, і плавне підключення до мережі відбувається за допомогою пристрою плавного пуску. До кола ротора додається додатковий опір, яким може керувати силова електроніка. Отже, можна контролювати загальний опір ротора, ковзання і вихідну потужність в системі. Діапазон динамічного регулювання швидкості залежить від розміру змінного опору ротора. Зазвичай діапазон швидкостей на 0...10 % вище за синхронну швидкість. Енергія, що надходить від зовнішнього блоку перетворення енергії, скидається в якості теплових втрат.

*Вітрові генератори з регульованою швидкістю та частково застосованим перетворювачем частоти (класифікатор WT Type C).* Дана конфігурація, відома як концепція асинхронного генератора з подвійним живленням (DFIG), відповідає вітровій турбіні з регульованою частотою обертання з асинхронним генератором з фазним ротором (WRIG) і частотним перетворювачем (з частотою приблизно 30 % від номінальної потужності) за схемою ротора, як наведено на рис. 8.

Статор безпосередньо підключений до мережі, а перетворювач потужності з частковою шкалою керує частотою і швидкістю ротора. Номінальна потужність цього перетворювача частоти з частковою шкалою визначає діапазон швидкостей (зазвичай  $\pm 30$  % синхронної швидкості).

Крім того, цей перетворювач виконує компенсацію реактивної потужності та плавне підключення до мережі. Діапазон регулювання швидкості ротора широкий порівняно з OptiSlip. Більше того, він уловлює енергію, яка в концепції OptiSlip спалюється у керованому опорі ротора. Перетворювач частоти меншого розміру робить цю концепцію привабливою з економічного погляду. Більш того, силова електроніка дає змогу вітровій турбіні діяти як динамічне джерело енергії в мережі. Однак його основними недоліками є використання струмозмінальних кілець і схем захисту при збоях у мережі.

*Вітрові генератори з регульованою швидкістю з повним перетворенням електроенергії (класифікатор WT Type D).* Дана конфігурація відповідає повністю регульованій вітровій турбіні з регульованою швидкістю, при цьому генератор підключено до мережі через повномасштабний перетворювач частоти, як наведено на рис. 9.

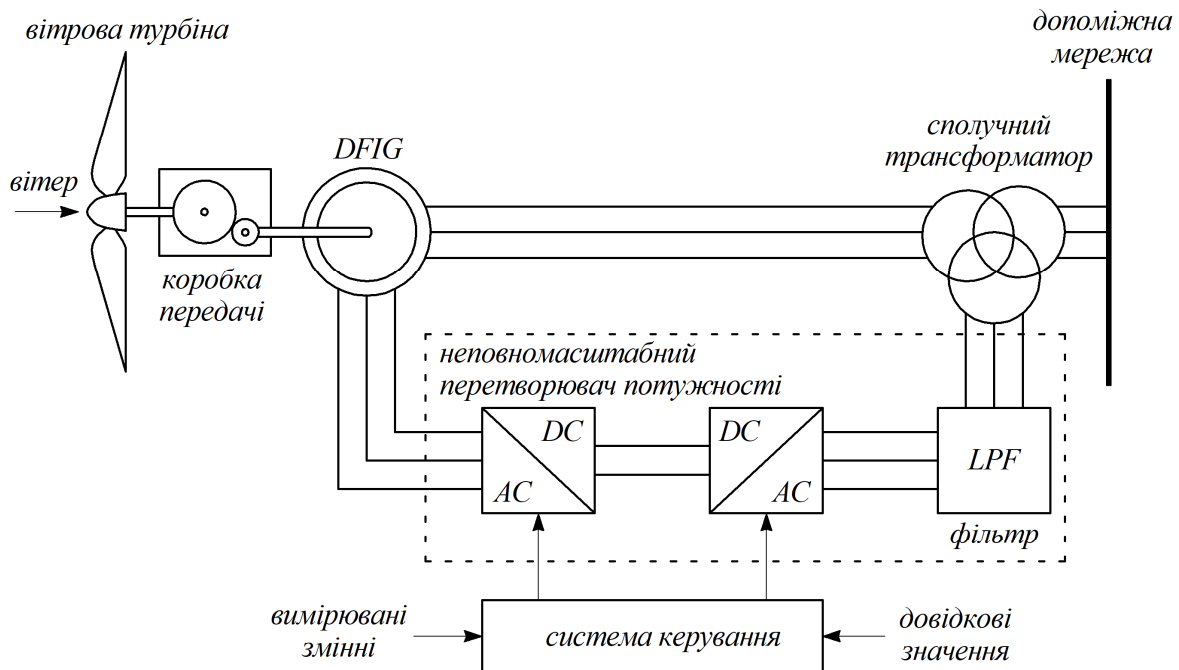


Рис. 8. Вітрова турбіна типу С

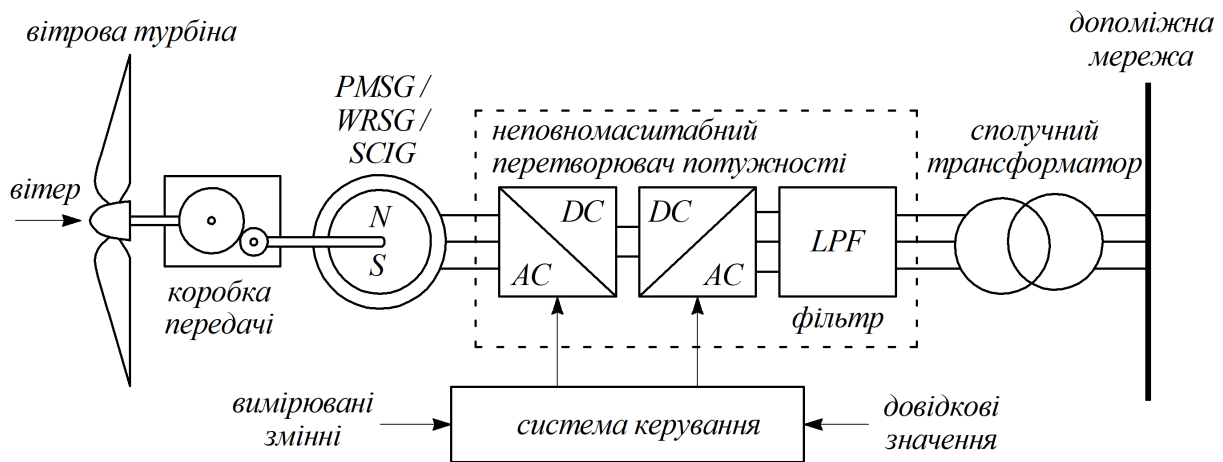


Рис. 9. Вітрова турбіна типу D

Перетворювач частоти виконує компенсацію реактивної потужності і плавне підключення до мережі для всього діапазону швидкостей. Генератор може бути зі збудженням електричним (синхронний генератор з фазним ротором WRSG) або зі збудженням від постійних магнітів (синхронний генератор з постійними магнітами PMSG). Обмотки статора підключено до мережі через повноцінний силовий перетворювач.

Деякі системи вітрових турбін з регульованою швидкістю є безредукторними. У цих випадках використовується громіздкий багатополосний

генератор з прямим приводом. Компанії-виробники вітрових турбін Enercon, Siemens Wind Power, Made та Lagerwey є прикладами виробників, що використовують дану конфігурацію.

Технічне порівняння основних типів вітрових турбін наведено у табл. 1.

Порівняльний аналіз технічних характеристик вітрових турбін

Параметр	Тип вітрової турбіни			
	тип А	тип В	тип С	тип D
Регулювання швидкості	немає	немає	є	є
Регулювання генерованої активної потужності	частково	частково	є	є
Регулювання генерованої реактивної потужності	немає	немає	є	є
Швидкодія системи	1...10 с	100 мс	1 мс	0.5...1 мс
Режим очікування	немає	немає	є	є
Наявність дози флікера в генерованій електричній енергії	є	є	немає	немає
Необхідність наявності режиму плавного пуску генератора	є	є	немає	немає
Наявність проміжної ланки постійного струму	немає	немає	є	є

Порівняння різних топологій вітрових турбін виявляє протиріччя продуктивності мережі.

**Імітаційне моделювання системи керування гібридного інвертора.** Для визначення енергетичних характеристик вітрогенераторів четвертого покоління

(типу D) у програмному середовищі Matlab / Simulink було проведено імітаційне моделювання. Імітаційну модель системи «асинхронний вітрогенератор – випрямляч – гібридний інвертор – електрична трифазна мережа» наведено на рис. 10.

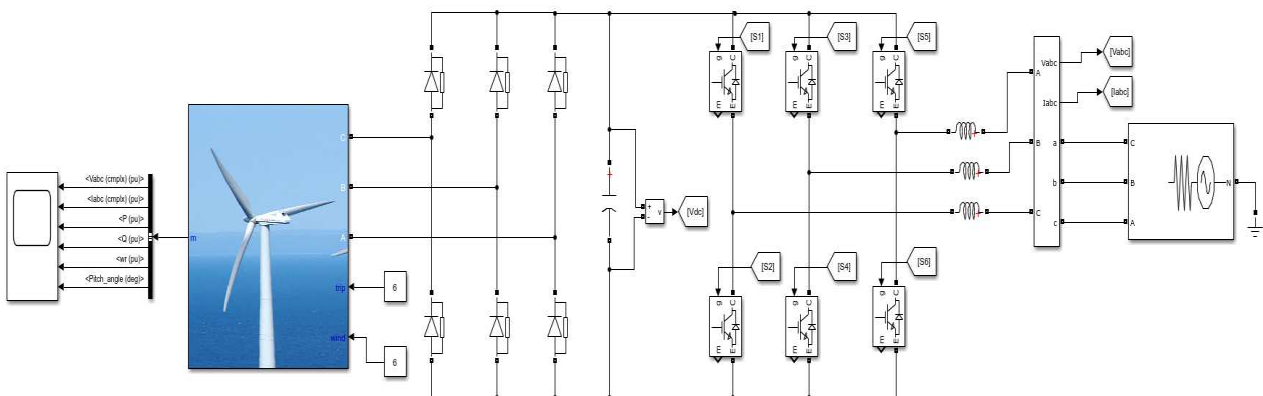


Рис. 10. Імітаційна модель вітроустановки

Особливістю розробленої моделі є застосування гібридного інвертора, що забезпечує генерацію електроенергії до трифазної електричної мережі в режимі джерела струму з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці ( $> 0,99$ ) та досить низьким вмістом вищих гармонік струму ( $THD < 5\%$ ), що відповідає вимогам українських та міжнародних стандартів щодо якості електричної енергії та електромагнітної сумісності.

Параметри асинхронного вітрогенератора наведено на рис. 11.

Силкові характеристики вітрової турбіни вітрогенератора наведено на рис. 12.



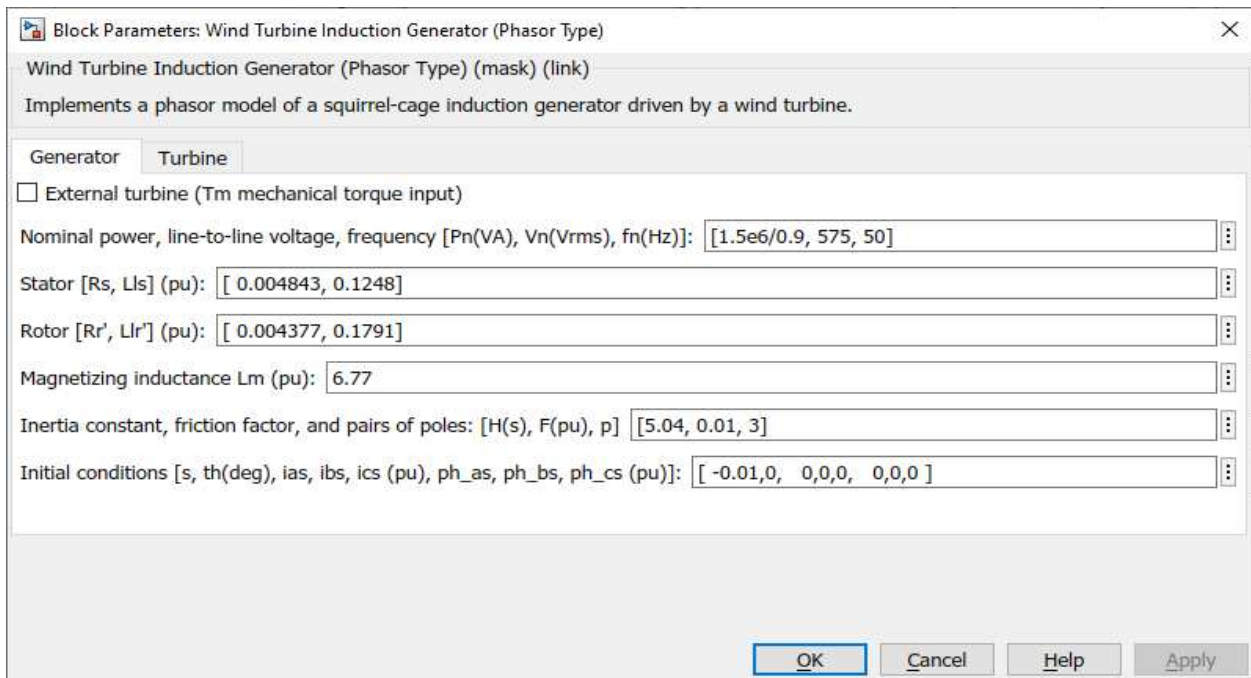


Рис. 11. Параметри асинхронного вітрогенератора

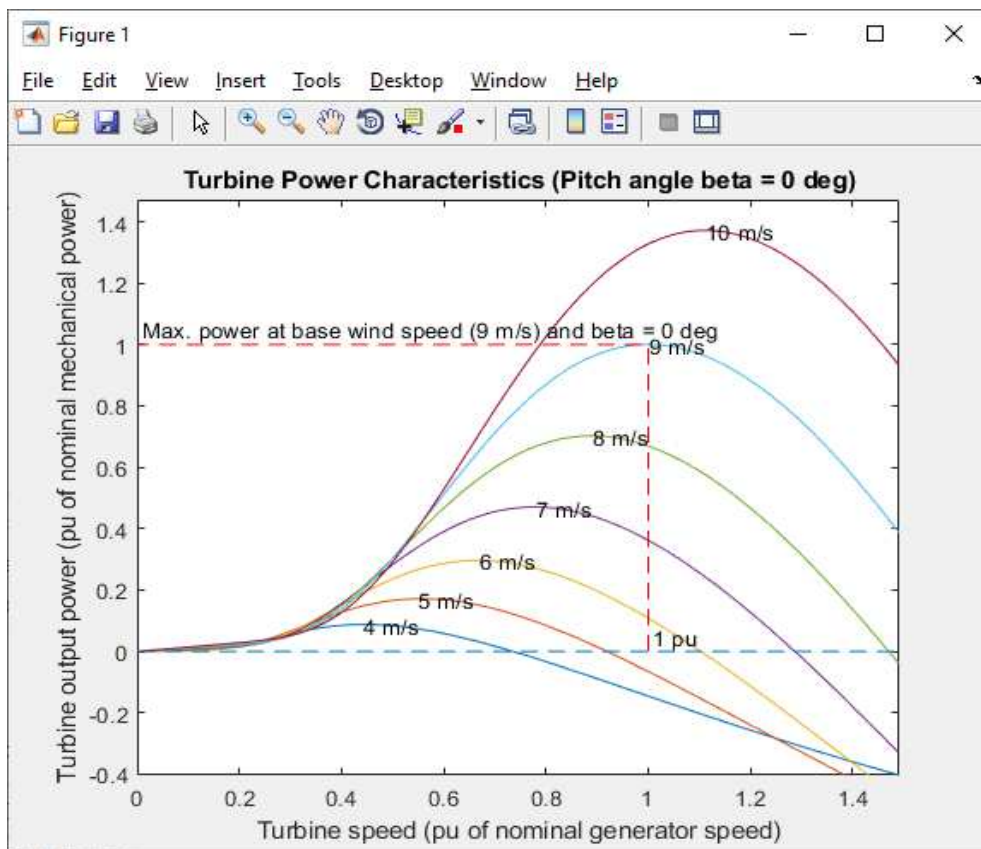


Рис. 12. Сімейство енергетичних характеристик вітрогенератора (відносна максимальна потужність залежно від швидкості вітру)

Систему керування гібридного інвертора реалізовано на базі широтно-імпульсної модуляції з частотою 1 кГц.

Отже, реалізовано двоконтурну систему авторегулювання гібридного інвертора, яку виконано за таких умов:

– підтримання напруги в колі постійного струму вище за лінійну напругу мережі;

– підтримання коефіцієнта потужності близького до одиниці;

– баланс потужності вітрогенератора та потужності, що генерується до електричної мережі від гібридного інвертора.

### Висновки та рекомендації щодо подальшого використання

На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– проведено аналіз технічних характеристик основних типів вітрових генераторів, який показав, що вітрові генератори з регулюванням швидкості обертів лопатей та з повним перетворенням електроенергії (тип D) забезпечують режими плавного пуску;

– розглянуто чотири концепції конструкції вітрових турбін, що застосовуються, та виявлено, що основні відмінності стосуються системи генерації і способу обмеження аеродинамічного ККД ротора вище за номінальне значення;

– запропоновано систему керування гібридного інвертора, що забезпечує генерацію електроенергії до трифазної електричної мережі в режимі джерела струму з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та досить низьким вмістом вищих гармонік струму.

*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. 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.
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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Jaen-Sola P., McDonald A. S., Oterkus E. Lightweight design of direct-drive wind turbine electrical generators: A comparison between steel and composite material structures. *Ocean Eng.* 2019. Vol. 181. P. 330–341. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.053.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. Chandan R., Kiran T., Swapna G., Muni V. Intelligent control strategy for energy management system with FC/battery/SC. *Journal of critical reviews*. 2022. Vol. 7, Issue 2. P. 344–348. DOI: 10.31838/jcr.07.02.66.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Alhaji 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.
24. 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.
25. Younes A., Hicham M., Damien V. Wind Speed Estimation Using Mechanical Torque Observer. *2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/INTERCON52678.2021.9532914.
26. Chumack V., Tsyvynskiy 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.
27. 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.
28. 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.
29. Xu Q., Ruan B., Zhao H., Fan Y., Tang A., Zhou W. Research on Modeling and Simulation of Direct Drive Wind Turbine Based on ADPSS/ETSDAC. *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2021. P. 2724–2729. DOI: 10.1109/EI252483.2021.9713613.
30. Shourangiz-Haghighi A. Developing More Efficient Wind Turbines: A Survey of Control Challenges and Opportunities. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2020. Vol. 14, No. 4. P. 53–64. DOI: 10.1109/MIE.2020.2990353.

**Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Shelest D. A., Syniavskiy A. V. Dynamics, concepts and prospects of the development of wind energy.**

**Abstract.** Global electricity consumption is still growing, so there is demand for a doubling of capacity over the next 20 years. The production, distribution and use of energy must be as technologically efficient as there are opportunities and incentives for energy savings for the end user. Energy deregulation has reduced investment in large power plants, which means that the need for new sources of electricity may be very high in the near future. Power electronics change the basic characteristic of a wind turbine from an energy source to a source of active power. The electrical technology used in wind turbines is not new and is relevant as the development of semiconductor devices increases and the price of power electronics decreases.

The article discusses developments in the field of wind energy. An analysis of the technical characteristics of the main types of wind generators is given. The issue of the

possibility of adjusting the speed of rotation of the wind generator blades, the parameters of the power semiconductor part, which ensures the modes of smooth start of the generator, is considered. Different control methods for wind turbines installed in remote areas with good wind conditions and different possible configurations are presented. An analysis of photovoltaic technology is given, including the necessary electronic basic power conversion. Power converters are given and more modern control functions are described. The overall technological status of wind energy and photovoltaic technologies is presented, demonstrating even more efficient and attractive energy sources for the future. A system of dual-circuit autoregulation of a hybrid inverter is proposed. The study of transient processes of wind generator control by simulation modeling in the Matlab / Simulink software environment is given.

**Key words:** wind energy, wind generator, blade, semiconductor converter, power electronics, control system.

Надійшла 04.10.2022 р.

**Плахтій Олександр Андрійович**, к.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

**Нерубацький Володимир Павлович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [NVP9@i.ua](mailto:NVP9@i.ua) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>

**Гордієнко Денис Анатолійович**, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [D.Hordiienko@i.ua](mailto:D.Hordiienko@i.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>

**Шелест Дмитро Андрійович**, аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна. E-mail: [shelllogist@gmail.com](mailto:shelllogist@gmail.com) ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6095-658X>

**Синявський Андрій Владиславович**, аспірант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [andreivladislavovich10@gmail.com](mailto:andreivladislavovich10@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9588-6737>

**Plakhtii Olexandr Andrievych**, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

**Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych**, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [NVP9@i.ua](mailto:NVP9@i.ua) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>

**Hordiienko Denys Anatolievych**, postgraduate of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [D.Hordiienko@i.ua](mailto:D.Hordiienko@i.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>

**Shelest Dmytro Andrievych**, postgraduate of Department of Electricity Transmission, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. E-mail: [shelllogist@gmail.com](mailto:shelllogist@gmail.com) ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6095-658X>

**Syniavskyi Andrii Vladyslavovych**, postgraduate of Department of Transport Communications, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [andreivladislavovich10@gmail.com](mailto:andreivladislavovich10@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9588-6737>