

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації,

Автоматизації виробництва та

Інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Коберник Максим Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

УДК 620.93

(індекс)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування впливу вітрової електричної станції на режими роботи електричної мережі

Спеціальність 141 « Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Коберник М.Ю.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Пінкін А.А.

(прізвище, ім'я, по батькові)

Доцент, канд. тех. наук

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Коберник М.Ю. Обґрунтування впливу вітрової електричної станції на режими роботи електричної мережі. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Кваліфікаційна робота представляє аналіз впливу ВЕС на режими роботи електричної мережі та, як наслідок, пропонує конструкцію пристрою безперебійного живлення, який враховує нестабільність вихідної потужності та забезпечує живлення належної якості для кінцевих споживачів. Запропоновано вирішення проблеми синхронізації автономних джерел нестабільної обмеженої потужності із загальнопромисловою мережею, реалізованої в розробленій схемі пристрою безперебійного живлення з вітрогенератором в системах електропостачання споживачів.

Ключові слова: система електропостачання, вітроелектричний генератор, вітрова електростанція, електричні мережі, режимні параметри мережі, навантаження, інвертор.

SUMMARY

Kobernik M.Yu. Substantiation of the influence of the wind power plant on the modes of operation of the electric network. - Qualification work on the rights of the manuscript. Qualifying work for a master's degree in 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The qualification work presents an analysis of the impact of wind farms on the modes of operation of the electrical network and, as a result, proposes the design of an uninterruptible power supply that takes into account the instability of output power and provides proper quality power to end users. The solution of the problem of synchronization of autonomous sources of unstable limited power with the general industrial network, realized in the developed scheme of the uninterruptible power supply device with the wind generator in the power supply systems of consumers is offered.

Key words:

power supply system, wind power generator, wind power plant, electric networks, network parameters, load, inverter.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВЕГ ТА ВЕС НА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	8
1.1. Дослідження та аналіз існуючих систем з інтегрованими ВЕГ та ВЕС	8
1.2. Засоби регулювання напруги.....	11
1.3. Аналіз способів застосування вітроелектричних генераторів в системі електропостачання.....	14
Висновки до розділу 1.....	17
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З ІНТЕГРОВАНИМ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИМ ГЕНЕРАТОРОМ ТА СИСТЕМИ ЙОГО КЕРУВАННЯ	18
2.1. Аналіз структурних систем безперебійного електропостачання....	18
2.2. Структурна схема системи керування пристроєм безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором.....	19
2.3. Моделювання вузла розподіленої енергосистеми з вітроелектричним генератором.....	23
Висновки до розділу 2.....	28
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИСТРОЮ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИМ ГЕНЕРАТОРОМ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ... ..	27
3.1. Імітаційна модель пристрою безперебійного електропостачання з ВЕГ	27
3.2. Імітаційна модель системи управління інвертором напруги	31
3.3. Дослідження режимів роботи ПБЕ з ВЕГ та аналіз регуляторів.....	35
Висновки до розділу 3.....	38
ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	40
ДОДАТКИ.....	44

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АБ – акумуляторна батарея;
- АГ – асинхронний генератор;
- АРЖ – агрегати резервного живлення;
- ВДЕ – відновлюване джерело енергії;
- ВЕГ – вітроелектричний генератор;
- ВЕС – вітроелектрична станція;
- ВЕУ – вітроелектрична установка;
- ГПС – генератор постійного струму;
- ДБЖ – джерело безперебійного живлення;
- ЕРС – електрорушійна сила;
- ЄН – ємнісний накопичувач;
- ІН – інвертор напруги;
- ПБЕ – пристрій безперебійного електропостачання;
- СБЕС – система безперебійного електропостачання споживачів;
- СГ – синхронний генератор;
- СЕС – система електропостачання споживачів;
- ФАПЧ – система фазового автопідстроювання частоти.
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасні електричні мережі загального призначення характеризуються досить низькою якістю електроенергії. Так, до 90 % електричної енергії, яку постачають споживачам за допомогою розподільчих електромереж, не відповідають вимогам ДСТУ щодо нормально допустимих значень [15]. При підключенні до таких мереж високотехнологічного обладнання існує високий ризик виходу техніки з ладу і втрати важливої інформації. Для запобігання збоїв в роботі та виходу з ладу обладнання енергоспоживачів слід застосовувати системи безперебійного електропостачання, які забезпечують безперервне живлення електроенергією заданої якості підключених до неї споживачів при відмовах в основних мережах електропостачання [20]. Такі системи будуються на базі джерел безперебійного живлення, джерел резервного живлення та автономних резервних джерел, наприклад, вітрогенераторних установок.

Отже, необхідність в розробці системи електроживлення з автономним джерелом нестабільної потужності, що дозволяє ефективно використовувати енергію відновлюваних джерел і забезпечує безперебійне живлення споживачів електричною енергією заданої якості, обумовлює наукову актуальність теми кваліфікаційної роботи

Мета і завдання роботи – узгодження параметрів і керування системою живлення «загальнопромислова мережа – автономне джерело нестабільної потужності на базі вітроелектричного генератора», що забезпечує ефективність передачі та розподілу електричної енергії, її якість та безперебійність електропостачання.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Аналіз та дослідження відомих приладів безперебійного живлення, засобів регулювання напруги та потужності, використання вітроелектричних генераторів в СЕС.

2. Обґрунтування вибору схемотехнічного рішення пристрою безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором і його системи керування.

3. Розробка моделі системи керування пристроєм безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором, встановлення енергоефективних режимів роботи.

Предмет дослідження. Енергоефективні режими роботи систем електропостачання з використанням вітроелектричного генератора.

Об'єкт дослідження. Система подвійного живлення «загальнопромислова електромережа – автономне джерело нестабільної потужності».

Методи дослідження. Дослідження проводилися методами математичного і програмно-орієнтованого (імітаційного) моделювання з використанням основних законів теоретичних основ електротехніки та промислової електроніки. Порівняльний метод використано для вибору об'єкта дослідження. Імітаційне моделювання пристрою безперебійного живлення здійснювалося з застосуванням пакета Matlab/Simulink. Для обробки результатів дослідження застосовано методи математичної статистики.

Практичне значення отриманих результатів. Представлено конструкцію пристрою безперебійного електропостачання, яка враховує нестабільність вихідної потужності автономного джерела енергії та забезпечує безперервне живлення електричною енергією заданої якості підключених до неї споживачів. Запропоновано рішення проблеми синхронізації автономних джерел нестабільної обмеженої потужності з загальнопромисловою мережею, реалізоване в розробленій схемі пристрою безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором в системах електропостачання споживачів.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота вміщує в себе вступ, три розділи, кожен з яких включає підрозділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 37 найменувань, додатки. Загальний обсяг роботи становить 43 арк.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВЕГ ТА ВЕС НА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Розглянуто системи та пристрої безперебійного електропостачання засобів регулювання напругою та потужністю, а також застосування вітроелектричних генераторів в системах електропостачання споживачів.

1.1. Дослідження та аналіз існуючих систем з інтегрованими ВЕГ та ВЕС

Для електричних мереж України загального призначення напругою 0,4 кВ характерні низька надійність та якість електричної енергії (відхилення і колювання напруги, асиметрія трифазної мережі, несинусоїдність тощо) [3,8]. Підключення до таких мереж високотехнологічного обладнання (комп'ютери, телекомунікаційна апаратура, автоматика, системи керування безперервними процесами, системи безпеки, зв'язку тощо) пов'язане з підвищеним ризиком виходу з ладу даних пристроїв та втратою важливої інформації [2]. Внаслідок цього державні установи та приватні організації несуть значні збитки. Для уникнення збоїв в роботі застосовують системи безперебійного електропостачання. Це системи, що забезпечують необхідну кількість та якість електроенергії на протязі заданого часу для електропостачання споживачів при виході з ладу стаціонарного електроживлення [3,7,8].

В основі систем безперебійного електропостачання лежить джерело безперебійного живлення (ДБЖ) або ж агрегати резервного живлення, які є трьох типів: прилади аварійного, резервного та безперебійного електропостачання [3,7,8]. Прилади аварійного електропостачання автоматично підключаються до шин споживачів в момент зникнення напруги в мережі живлення. Вони призначені для забезпечення безпеки і запобігання масовим аваріям та пошкодженню приладів. Пристрої резервного електропостачання вводяться в

систему електроживлення для забезпечення споживачів електричною енергією потрібної якості на протязі певного періоду часу. Пристрої безперебійного електропостачання забезпечують неперервне живлення електричною енергією потрібної якості підключених до них споживачів або ж при будь-яких пошкодженнях основних мереж електропостачання. Існує значна кількість різноманітних агрегатів резервного живлення, що відрізняються за потужністю, складом обладнання, способом підключення до зовнішньої мережі, доступним часом перерви живлення споживачів, часом роботи без основного джерела живлення, схемами тощо [8].

В системах безперебійного електропостачання застосовують агрегати резервного живлення як з обертаючими так і зі статичними перетворювачами [3,8]. Перевагою схем систем безперебійного електропостачання з агрегатами резервного живлення з обертаючими перетворювачами є безперервність живлення за рахунок інерції обертових мас електричних машин. Під час зупинки електропостачання електродвигунами на вихідних клеммах генераторів напруга не зникає. Недоліком агрегатів резервного живлення з обертовими перетворювачами є аналогічні недоліки обертових машин: складність в експлуатації, громіздкість, шум. Дані схеми морально та фізично застарілі [20].

Поява нової силової та мікроелектричної напівпровідникової елементної бази, нових матеріалів і розвиток схемотехніки призвело до появи систем безперебійного електропостачання з агрегатами резервного живлення зі статичними перетворювачами [3]. Сучасні статичні перетворювачі суттєво відрізняються від електромашинних перетворювачів за проектними та експлуатаційними параметрами. Це забезпечує: зменшення масо-габаритних характеристик; різке зменшення рівня шуму та вібрації; підвищення ККД (з 50% до 85%) за рахунок зменшення втрат; створення мережі безперебійного живлення з гарячим резервуванням без застосування електромеханічних перемикачів [20].

Зазначені переваги АРЖ зі статичними перетворювачами обумовлюють широке застосування статичних перетворювачів в СБЕС [2,3,7]. До недоліків статичних перетворювачів відносять низьке значення вхідного коефіцієнта

потужності. За встановленою потужністю АРЖ зі статичними перетворювачами поділяють на ДБЖ: малої потужності (від 0,25 до 3 кВт); середньої потужності (3...10 кВт); великої потужності (10...800 кВт та більше).

Найбільшого поширення набули АРЖ зі статичними перетворювачами наступних типів: ДБЖ з перемиканням (Off-Line UPS) (додаток А, рис. А.1, а); ДБЖ, що взаємодіє з мережею (Line-Interactive UPS) (додаток А, рис. А.1, б); ДБЖ з подвійним перетворювачем енергії (On-Line UPS) (додаток А, рис. А.1, в).

Off-Line UPS – найдешевше та найпростіше ДБЖ. Її використовують для захисту некритичного навантаження від відключення напруги в районах зі стабільною напругою без серйозних завад [2,3,7]. Line-Interactive UPS – середня за вартістю та найбільш поширена на ринку ДБЖ. Використовують для захисту незначного навантаження, в районах, що не мають серйозних завад [2,3,7]. On-Line UPS – ДБЖ з максимальним класом захист. Використовують для захисту критичного навантаження в районах з серйозними завадами [2,3,7].

Здійснено порівняльний аналіз ДБЖ зі статичними перетворювачами (додаток А, табл.А1). Виконана оцінка рівня надійності та захисту обладнання при використанні агрегатів резервного живлення зі статичними перетворювачами в залежності від якості електроенергії (додаток А, табл. А.2).

Згідно аналізу On-Line ДБЖ по властивостям помітно відрізняється від інших типів джерел безперебійного живлення. На відміну від ДБЖ Of-Line і Line-Interactive, які не захищають від перебоїв, викликаних нестабільною частотою, On-Line ДБЖ гарантують повний захист від всіх можливих аварій. Якщо врахувати всі вхідні та вихідні напруги On-Line ДБЖ, що відрізняються від напруги промислової мережі (число фаз, частота, кут фази тощо), то можна створити універсальне обладнання, що дозволить здійснити споживання струму від джерела живлення з максимально ефективними параметрами якості для будь-якого характеру навантаження споживачів електричної енергії (регулювання, спряження, компенсація) [20].

1.2. Засоби регулювання напруги

Однією з вимог, що ставляться до систем безперебійного електропостачання, є забезпечення підключених до них споживачів електричною енергією потрібної якості [20].

Норми якості електричної енергії в мережах загального призначення та в локальних мережах електропостачання регламентує ДСТУ EN 50160:2014 [2]. Показниками якості електроенергії є: повільні зміни напруги; коливання напруги, гармонічні складові напруги, асиметрія напруг в трифазній системі.

Виконати вимоги ДСТУ EN 50160:2014 можна трьома способами: змінити напругу джерела живлення (U_1); підвищити напруги ($\delta U_{\text{доб}}$); впливом на втрати напруги в мережі (ΔU) [20]:

$$U_2 = U_1 \pm \delta U_{\text{доб}} - \Delta U . \quad (1.1)$$

До способів впливу на напругу джерела живлення U_1 відносять: регулювання збудження генераторів; зміну коефіцієнтів трансформації за допомогою регулювання напруги під навантаженням на великих трансформаторах (межа регулювання $\pm 16\%$) тощо [2,4].

До способів підвищення напруги $\delta U_{\text{доб}}$ відносять: застосування вольтдодавальних трансформаторів в мережі 110–220 кВ, 6–10 кВ (діапазон регулювання $\pm 15\%$); лінійних регуляторів, або автотрансформаторів в мережах 6–10, 35 кВ; індукційних регуляторів в мережах 380 В, 6–10 кВ; безконтактних регуляторів напруги (межі регулювання $\pm 15\%$).

Способи зниження втрат напруги визначаються наступним чином:

$$\Delta U = \frac{P_p R + (Q_p \pm Q_{KY}) \cdot (X_L - X_C)}{U_{\text{норм}}} , \quad (1.2)$$

Де Q_{KY} – потужність приладів компенсації; X_C , X_L – ємнісний та індуктивний опори мережі; R – активний опір мережі; P_p , Q_p – значення активної та реактивної потужностей.

Способами, що впливають на втрати напруги, є застосування: синхронних електродвигунів в мережі 6–10 кВ; паралельне ввімкнення регулюючих конденсаторів; статичних джерел реактивної потужності непрямої та прямої

компенсації; мереж з мінімальним реактивним опором; поздовжньої компенсації [2,4].

Існує три основні групи зниження коливань напруги [2,4]: 1) вплив на джерело живлення: збільшення потужності джерела живлення; паралельна робота трансформатора на джерело живлення; 2) вплив на електроприймачі: застосування блокування від одночасного ввімкнення джерел живлення; розподіл джерел живлення, що створюють коливання напруг; 3) використання спеціальних приладів: застосування приладів плавного пуску електродвигунів джерел живлення; застосування поздовжньої компенсації; застосування здвоєних реакторів; застосування статичних тиристорних компенсаторів.

Часті запуски синхронних та асинхронних двигунів створюють значні коливання напруги. Ефективним методом зниження коливань є використання приладів плавного пуску електродвигуна [8]. Застосування обладнання плавного пуску електродвигуна дозволяє обмежити величину пускового струму i , як наслідок, знизити коливання напруги. В Україні широко використовують установки поздовжньої компенсації для стабілізації напруги в зварювальному обладнанні. Ефект від використання здвоєного реактору полягає в підключенні дугової печі і чуттєвого до коливань напруги навантаження на різні вітки реактора. Величина зниження коливань визначається типом здвоєного реактора. Найбільше зниження (в 3–5 рази) досягається при використанні реакторів з залізною серцевиною. Застосування реактору без залізної серцевини дозволяє знизити коливання напруги в 2 рази. Зниження коливань за допомогою статичного тиристорного компенсатора полягає в регулюванні споживанням реактивної потужності. Реактивна потужність повинна споживатися керуючим реактором в протифазі з дуговою піччю. Статичний тиристорний компенсатор ефективно застосовувати для зниження асиметрії напруг, несинусоїдальності та компенсації реактивної потужності [3,8].

Існують методи зниження рівня вищих гармонічних складових напруги: збільшенням потужності джерела живлення; застосуванням перетворювачів з більш високим фазним випрямленням; використанням в схемах перетворювачів широтно-імпульсної модуляції; використанням фільтрів вищих гармонік (пасивні, гібридні,

активні). Дослідження [3,8] вказують, що економічно не вигідно знижувати рівні вищих гармонік до нуля, оскільки їх зниження повинне проводитися до рівня, що регламентується стандартами ДСТУ EN 50160:2014.

Асиметрія напруги в трифазній мережі буває поздовжньою (виникає в повітряних лініях електропередачі, коли дроти окремих фаз лежать в одній площині) та поперечною. На підприємствах в основному виникає поперечна асиметрія напруги. Повна потужність мережі при наявності асиметрії струму та напруги визначається за формулою [8]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2}, \quad (1.3)$$

де N – пульсуюча потужність асиметрії.

Щоб трифазна система буда асиметрична, необхідно компенсувати N . Є два види симетрування – внутрішнє та зовнішнє. В останні роки широко використовується симетруюче обладнання на базі тиристорів.

Реактивна потужність є величиною, яка характеризує коливання енергії електромагнітних полів. На відміну від активної, реактивна потужність корисної роботи не виконує механічну роботу. Вона створює коливання руху між генератором та електроприймачем і витрачається на створення електромагнітних полів в магнітних елементах [2,8]. Реактивна потужність приводить до збільшення величини реактивного струму, що негативно впливає на режими роботи електричної мережі та показники якості електроенергії.

Основні негативні наслідки, пов'язані з передачею по мережам реактивної потужності: зниження рівня напруги в розподільчих мережах і на шинах споживачів; зниження якості електроенергії; збільшення втрат активної потужності в електричній мережі; зниження пропускної здатності [8].

Зниження негативного впливу реактивної потужності, в тому числі покращення режимів напруги в мережах споживачів та енергопостачальних організацій, дозволяє компенсувати реактивну потужність [2,8].

Виділяють два види компенсацій – природну та штучну. Найбільш економічний ефект від компенсації досягається при використанні додаткових джерел і розміщення їх поблизу споживачів реактивної потужності. Додаткові

джерела реактивної потужності можна розділити на прилади поздовжньої та поперечної компенсації [2,3,7].

Для більш ефективного використання компенсуючих установок можливе їх комплектування пристроями автоматичного керування, що дозволяє регулювати генеруючу реактивну потужність в періоди найбільших та найменших навантажень в енергосистемі. Застосування приладів керування покращує режим роботи енергосистеми, виключаючи можливість перекомпенсації реактивної потужності, яка може викликати підвищення напруги в мережі і збільшення втрат електроенергії [3].

1.3 Аналіз способів застосування вітроелектричних генераторів в системі електропостачання.

Ключова роль в енергетиці майбутнього відводиться екологічно чистим нетрадиційним поновлювальним (альтернативним) джерелам електроенергії (сонячна енергетика, вітроенергетика, гідроенергетика, енергія біомаси та інше). В Україні сьогодні існують передумови для ефективного застосування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), в першу чергу – в районах, віддалених від централізованих енергосистем [1,39].

Для України в сучасних економічних умовах актуальною є проблема регіональної енергетичної безпеки. Це обумовлено тим, що значна частина регіонів країни є енергодефіцитними: в них завозиться паливо або постачається електроенергія з інших регіонів, що визначає специфіку енергетичної ситуації [36]. З розвитком технологій використання АДЕ в складі систем централізованого електропостачання, в Україні необхідно розробляти і створювати системи автономного електропостачання споживачів [22].

Потужність альтернативних джерел електроенергії не може зрівнятися з потужністю єдиної електроенергетичної системи, проте вони дозволять вирішити велику кількість супутніх завдань, серед яких – покриття дефіциту електроенергії при пікових навантаженнях і електропостачання споживачів важкодоступних територій [29,33,35].

У загальному вигляді первинні альтернативні джерела поділяються на джерела змінного і постійного струму. Поділ є умовним, оскільки в деяких випадках первинне перетворення альтернативних видів енергії в електричну може здійснюватися як в енергію постійного струму, так і енергію змінного струму (додаток А, табл. А.3). Для запобігання перебоїв в роботі і виходу з ладу споживачів електроенергії необхідні системи безперебійного електропостачання, що забезпечують безперервне живлення електричною енергією необхідної якості підключених до неї споживачів при будь-яких відмовах і несправностях в основних мережах електропостачання. Такі системи будуються на базі поновлюваних (альтернативних) джерел енергії.

Сучасні технології дозволяють віднести енергію вітру до числа відновлюваних джерел, що мають найбільший економічний потенціал. За [20] робота ВЕГ потужністю 1 МВт за 20 років експлуатації дозволить заощадити 29 тис. тон вугілля або 92 тис. барелів нафти. ВЕГ працюють при швидкостях вітру 3...25 м/с [20].

ВЕС мають ряд переваг і недоліків. До основних недоліків відносять: мінливість швидкості вітру; нижчий вихід електроенергії порівняно з дизельними генераторами; генерація звукових спектрів шкідливого шуму; створення завад у роботі систем зв'язку та небезпека обертючих лопатей для птахів та інших видів організмів [23,30]. До переваг можна віднести: екологічну чистоту роботи; невичерпність енергії; ергономіку (компактність і поєднання з будь-яким видом ландшафту); всесезонність; відсутність потреби використовувати паливо для роботи ВЕГ [11].

Наведені переваги визначають успішний розвиток вітроенергетики в сучасному світі, як екологічно чистого ефективного джерела енергії [5,20].

Для вітряних електростанцій мінімальна швидкість вітру в середньому становить: 4...5 м/с – при потужності понад 200 кВт; 2...3 м/с – якщо потужність менше 100 кВт [16]. Серед існуючих в світі вітроустановок можна виділити основні групи з генераторами наступних типів: з асинхронними генераторами (на потужність 30...3600 кВт); з синхронними генераторами (на потужність 2500

кВт); постійного струму (на потужності 330; 800; 900; 2000; 3000; 7500 кВт) [12,18,20].

При застосуванні ВЕУ з будь-яким типом генератора важливим є питання можливості його паралельної роботи з мережею і один з одним. При цьому слід дотримуватися умов безаварійного включення генераторів на паралельну роботу та сталої роботи вітропарків в умовах експлуатації.

Включення синхронного генератора (СГ) на паралельну роботу з зовнішньою мережею може здійснюватися двома способами: точною синхронізацією і самосинхронізацією. При включенні генератора першим способом струм в момент включення генератора на паралельну роботу з мережею (або іншим генератором) повинен бути мінімальним. Для забезпечення цього потрібно: рівність значень електрорушійної сили (ЕРС) генератора і напруги мережі; рівність частот ЕРС генератора і напруги мережі; знаходження в протифазі ЕРС генератора і напруги мережі; однакове чергування фаз ЕРС генератора і напруги мережі [33].

При включенні генератора способом самосинхронізації необхідно перевіряти збіг порядку чергування фаз мережі і генератора. Перевагою цього способу є його швидкодія. Його недолік – великі скачки струму в мережі.

До переваг паралельної роботи асинхронного генератора (АГ) відносяться: АГ не вимагає захисту від коротких замикань, оскільки в цьому режимі він негайно втрачає збудження; забезпечує найкращу якість вихідної напруги; при паралельній роботі з мережею відпадає необхідність в системі самозбудження і регулювання напруги.

При паралельній роботі генераторів постійного струму (ГПС) повинні виконуватися наступні умови: при включенні генератора на паралельну роботу з іншим генератором не повинно виникати стрибків струму; загальне навантаження розподіляється між паралельно працюючими генераторами рівномірно, пропорційно їх номінальній потужності, інакше окремі генератори можуть бути перевантаженими; ЕРС генератора, що підключається, має дорівнювати напрузі в мережі [3].

Існує безліч пристроїв автоматичного включення генераторів на паралельну роботу з мережею або один з одним. Розвиток силової електроніки та удосконалення її елементної бази дозволяють використовувати сучасні пристрої сполучення генераторів з мережею. Для забезпечення ефективного використання енергії відновлюваних джерел живлення змінної напруги, що паралельно працюють на загальне навантаження з промисловою мережею, все частіше знаходять застосування установки з подвійним перетворенням, які містять такі структурні елементи: випрямляч; ланцюг постійного струму; інвертор, ведений мережею. Дана структура дозволяє забезпечити синхронізацію паралельно працюючих генераторів, регулювання параметрів якості електричної енергії мережі живлення, встановлювати в ланцюзі постійного струму накопичувачів та акумуляторів електричної енергії, що має важливе значення в режимах скидання і накидання навантаження, а також холостого ходу виконавчих агрегатів і установок споживачів [26,28].

Висновки до розділу 1

Перший розділ дослідження присвячений особливостям застосування альтернативних джерел енергії в системах електропостачання споживачів.

Застосування таких джерел енергії має велике значення для якісного та безперебійного енергозабезпечення територій, віддалених від великих електростанцій, не охоплених електричними мережами, які відчувають нестачу існуючих потужностей. Головною особливістю ВЕГ є нестабільність вихідної потужності, що пояснюється мінливістю характеристик вітру як енергоносія.

Для ефективного використання ВЕГ в системах безперебійного електропостачання необхідно вирішити завдання узгодження (сполучення) його вихідних параметрів зі стандартними параметрами споживачів, безперебійної передачі і розподілу електроенергії споживачу необхідної якості, а також забезпечення паралельної роботи з загальною електромережею.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ З ІНТЕГРОВАНИМ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИМ ГЕНЕРАТОРОМ ТА СИСТЕМИ ЙОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Аналіз структурних систем безперебійного електропостачання

На (додаток Б, рис. Б.1) приведені три основні варіанти структурних схем джерел живлення, які забезпечують безперебійне електропостачання споживачів. Комунікаційне обладнання забезпечує підключення вхідних джерел електроживлення (умовно один основний, інший – резервний) при відключенні параметрів якості вихідної напруги одного з них. При цьому в системах (додаток Б, рис. Б.1, а) не потрібно синхронізувати джерела живлення, (додаток Б, рис. Б.1, б і рис. Б.1, в) синхронізація необхідна. В системах електроживлення (додаток Б, рис. Б.1, б і Б.1, в) можливе зниження напруги при перемиканні первинних джерел і у моменти часу запуску автономного електрогенератору (двигун внутрішнього згорання).

Для запобігання зниження напруги в системах електричного живлення вмикається буферні енергетичні елементи (ємнісні накопичувачі, акумулятивні батареї). Акумулятивні батареї (АБ) порівняно з ємнісними накопичувачами (конденсаторами) відрізняються як великою граничною ємністю, так і великим внутрішнім опором. Оскільки зберігання електроенергії можливе тільки в ланцюгах постійного струму, система електроживлення повинна містити додаткову лінію постійного струму (випрямлячі та інвертори), що забезпечить вирівнювання параметрів накопиченої електроенергії (додаток Б, рис. Б.2). АБ мають номінальну напругу, рівну випрямленій напрузі.

При використанні системах електричного живлення АБ з різною номінальною напругою потрібно доповнити систему узгоджувачими силовими трансформаторами (додаток Б, рис. Б.3).

Для узгодження АБ і первинної мережі за напругою замість трансформатора можна використовувати імпульсний регулятор напруги будь-якого типу (додаток Б, рис. Б.4).

У випадку необхідності встановлення високовольтного буферного елемента та низьковольтної АБ одночасно слід передбачити конвектор напруги для сполучення низьковольтних та високовольтних ліній (додаток Б, рис. Б.5).

При значній нестабільності параметрів первинних джерел електричної енергії системи електропостачання оборудуються додатковими стабілізаторами первинної напруги (додаток Б, рис. Б.6).

При використанні в якості первинних джерел електроенергії альтернативного джерела постійного струму система електроживлення оборудується перетворювачем постійної напруги. В цьому випадку конвектор встановлюється між АБ і альтернативним джерелом та служить для узгодження напруги між ними (додаток Б, рис. Б.7).

При використанні в якості первинних декількох альтернативних джерел постійного струму система електроживлення оснащується декількома конвекторами. В цьому випадку кожен конвектор встановлюється між АБ і альтернативним джерелом та служить для узгодження напруги між ними (додаток Б, рис. Б.8).

Приведені схеми показують, що майже всі системи електроживлення об'єднуються в декілька первинних джерел електроенергії для забезпечення безперебійного електропостачання електроспоживачам, обов'язково включають прилади узгодження, в основі яких лежать інвертори напруги.

2.2. Структурна схема системи керування пристроєм безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором

При розробці та проектуванні пристрою безперебійного електропостачання (ПБЕ) з урахуванням нестабільності вихідних параметрів ВЕГ доцільно застосувати структуру On-Line. Даний тип джерел безперебійного живлення (ДБЖ) забезпечить можливість формування вихідної гармонійної напруги з заданими параметрами при широкому допустимому діапазоні зміни напруги і потужності ВЕГ [2,27].

Енергетично ефективна система електропостачання до складу якої входить автономне джерело нестабільної потужності, яке забезпечує безперебійне

живлення відповідальних споживачів електроенергією відповідної якості, пред'являє наступні вимоги до пристрою безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором (ПБЕ з ВЕГ) по відношенню до основної загальної електромережі: зниження рівня дефіциту потужності; зниження величини відхилень і коливань напруги; зниження асиметрії напруги в трифазній мережі; забезпечення електроживлення споживачів при короткочасних провалах напруги.

Додатковими вимогами до функціональності ПБЕ з ВЕГ є: можливість компенсації реактивної потужності промислової електромережі; акумулювання електричної енергії; регулювання напрямку потужності між двома живильними мережами (промисловою та для власних потреб ВЕГ); гнучка структура системи керування, що дозволяє перенастроювати алгоритми регулювання і базові параметри в умовах експлуатації [3,20].

Електромеханічна синхронізація вихідної напруги ВЕГ з частотою і фазою загальної мережі представляє собою складне завдання. Тому в даний час ВЕГ використовуються, в основному, в локальних (автономних) мережах, і при відсутності навантаження не можуть передавати надлишок електричної потужності, що генерується, в загальнопромислову мережу для покриття дефіциту електричної енергії [8,17].

Поява потужних напівпровідникових IGBT-транзисторів надала поштовх для розвитку перспективних схем інтеграції ВЕГ з промислової мережею електропостачання [6,7], одна з яких наведена на рис.2.1.

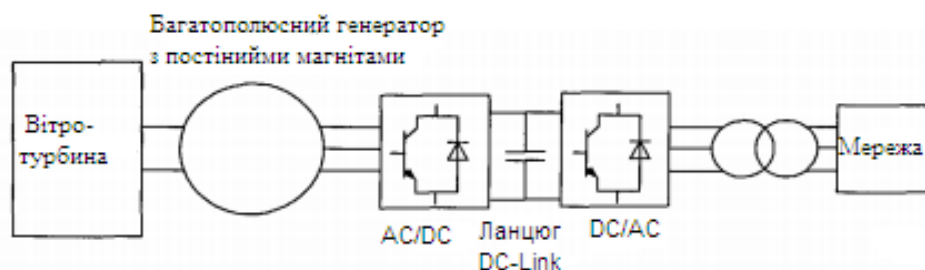


Рис.2.1 – Перспективна схема електропостачання з ВЕГ [7]

Сполучення нестабільних вихідних параметрів ВЕГ зі стандартними параметрами напруги мережі виконує модуль, побудований на типових промислових трифазних мостових інверторах напруги (AC/DC, DC/AC) з проміжною ланкою постійного струму, який включає в себе елементи, що акумулюють (АБ або ємнісні накопичувачі (ЄН)).

Застосування акумулюючих елементів великої місткості дозволяє отримати два позитивні фактори: 1) мала залежність зміни напруги АБ або ЄН від коливань параметрів напруги на виході ВЕГ та мережі; 2) можливість забезпечення безперебійного електропостачання споживачів при провалах напруги і навіть при короткочасному її перериванні. Перевагою АБ виступає висока питома електрична ємність. Перевага ЄН – допускаються великі величини зарядних/розрядних струмів і миттєвої потужності, особливо з появою суперконденсаторів [9].

При наявності достатніх площ для розміщення стаціонарного обладнання ПБЕ пріоритетне застосування ЄН є очевидним.

Для побудови структурної схеми системи керування пристроєм безперебійного електропостачання з ВЕГ доцільно визначати режими роботи інверторів: режим активного випрямляча при прийомі енергії від джерела змінної напруги і заряді ЄН; режим інвертора напруги при передачі енергії від ЄН в мережу; режим компенсації реактивної потужності.

Інвертор, що забезпечує регулювання параметрів потоку потужності промислової мережі відповідно до заданих параметрів, пропонується називати ведучим (ІН1), а інвертор, підключений до мережі ВЕГ – підлеглим (ІН2).

Для визначення алгоритмів роботи ІН1 і ІН2 в зазначених режимах доцільно забезпечити:

- вимір миттєвих значень напруг і струмів в ланцюгах змінного і постійного струмів (мережа з ВЕГ, промислова мережа електропостачання, ЄН, навантаження);

- перетворення параметрів трифазної електричної системи в параметри синхронної комплексної системи координат, що знизить обсяг обчислень;

- визначення величини і напрямку потоку потужності між двома джерелами напруги;
- визначення параметрів режимів заряду/розряду ЄН;
- визначення величин складових активної і реактивної потужностей електричної енергії, яка споживається або генерується інверторами;
- перетворення параметрів синхронної комплексної системи координат в параметри трифазної електричної системи;
- формування імпульсів керування силовими транзисторними ключами ведучого (провідного) і підлеглого інверторів.

При роботі ведучого інвертора в режимі компенсації реактивної потужності промислової мережі ПБЕ генерує задані значення струмів вихідних фільтрів ІН, тобто фактично працює як джерело струму.

Поєднання функціональних можливостей елементів силової схеми і вимог щодо їх забезпечення в реальному часі в залежності від поточних параметрів завдання режимів регулювання забезпечить можливість побудувати узагальнену структурну схему ПБЕ і його системи керування [4].

Так, в (додаток В, рис. В1) представлена узагальнена структурна схема ПБЕ з ВЕГ і його системи керування, що включає чотири силових блоки і тринадцять блоків системи керування.

Таким чином, найбільш актуальною для досліджень є спільна робота двох джерел живлення (автономне джерело – загальнопромислова мережа) на одне навантаження зі сполученням параметрів ланцюгів постійного і змінного струму при використанні трифазного інвертора.

При виборі силової частини інвертора доцільно враховувати наступні критерії: можливість передачі електричної енергії в прямому і зворотному напрямку потоків потужності; роботи в якості сполучної ланки між різними типами джерел електроенергії з навантаженням; можливість компенсації реактивної потужності; універсальність архітектури (робота в трьох- і трифазних електромережах з різними типами навантажень).

2.3. Моделювання вузла розподіленої енергосистеми з вітроелектричним генератором

Для дослідження режимів роботи вузла розподіленої енергосистеми була побудована його спрощена імітаційна модель в середовищі Matlab/Simulink з використанням вбудованого пакету розширення SimPowerSystems [3,21].

Схема моделі приведена в (додаток Г, рис. Г.1).

Тут присутні дві автономні мережі: Grid_1 (Мережа 1) і Grid_2 (Мережа 2), кожна з яких представлена джерелом напруги E_1 (E_2), власним опором Z_1 (Z_2) і навантаженням Load_1 (Load_2). Обидві мережі мають навантаження з середньостатистичним $\cos \varphi_n = 0,7$.

Мережа 1 імітує мережу з поновлюваним джерелом ВЕГ. Навантаження мережі 1 враховує можливі власні потреби ВЕГ. Мережа 2 являє модель промислової електромережі. Пристрій інтеграції ВЕГ в промислову електромережу, що забезпечує сполучення їх параметрів, виконано на двох інверторах напруги, об'єднаних по ланцюгу постійного струму з ємнісним накопичувачем. Причому інвертор з боку підключення ВЕГ є підлеглим, а інвертор з боку промислової мережі – провідним.

З метою пошуку критеріїв взаємодії за потоками потужності між вказаними мережами всі їх параметри прийняті однаковими. Маски завдання параметрів наведені в (додаток Д). В якості мережевих джерел було прийнято трифазне програмоване джерело напруги Three-Phase Programmable Voltage Source з бібліотеки SimPowerSystems/Electrical Sources. Маска завдання його параметрів наведена на (додаток Д, рис. Д.1).

Тут встановлюються стаціонарні значення величини напруги, частоти і початкової фази, як в бік випередження, так і в бік відставання. Крім того, у вікні маски «Time variation of:» можливо задати тимчасову зміну одного з названих параметрів. Це значно розширює можливості експериментів надалі. Імпеданс мережі і навантаження задані масками, представленими в (додаток Д, рис. Д.2).

Паралельно кожній мережі підключений інвертор напруги (ІН), який включає в себе формувач напруги керування Control_1, Control_2, силовий модуль Invertor_1, Invertor_2 та фільтр Lf_1, Lf_2, Cf_1, Cf_2. Елементи фільтра інвертора представлені блоками Three-Phase Series RLC Branch з бібліотеки SimPowerSystems/Elements. Маска їх параметрів наведена в (додаток Д, рис. Д.3). Інвертори мають загальну ланку постійного струму, представлену конденсаторами C1 та C2 (ємнісний накопичувач) із загальною точкою для забезпечення пофазного керування інверторами. Маска параметрів конденсаторів приведена на (додаток Д, рис. Д.4).

Вимірювачі напруги з V_1 по V_7 і струмів з I_1 по I_6 в схемі представлені блоками Voltage Measurement і Current Measurement відповідно з бібліотеки SimPowerSystems/Measurements з типовими параметрами.

Елементи моделі з Goto1 по Goto13 представлені блоками Goto з бібліотеки Simulink/Signal Routing і призначені для передачі відповідних сигналів в блок вимірювань Measure. Маска параметрів блоку Goto на прикладі елемента Goto1 приведена на (додаток Д, рис. Д.5).

Далі йдуть блоки, які не належать бібліотекам, а оформлені у вигляді підсистем. До їх числа відносяться формувачі напруги керування Control_1, Control_2. Схема даної підсистеми наведена в (додаток Д, рис. Д.13).

В якості джерела напруги керування Source1 прийнято програмоване джерело напруги Three-Phase Programmable Voltage Source, маска параметрів якого наведена на (додаток Д, рис.Д.1). Це дозволяє в процесі дослідження легко змінювати амплітуду напруги керування, а так само його фазу щодо напруги відповідної мережі. Зміну цих параметрів можна виконувати в різних комбінаціях по відношенню до першого і другого інверторів, що породжує велику кількість різних режимів роботи вузла електричної мережі. Вимірювачі напруги V_1, V_2, V_3 спільно з мультиплексором Mux з бібліотеки Simulink/Signal Routing і масштабним підсилювачем Gain з бібліотеки Simulink/Math Operations перетворюють sps-сигнал від джерела в векторний s-

сигнал, необхідний для формування сигналів керування силовим модулем. Маска параметрів підсилювача наведена в (додаток Д, рис. Д.6).

Наступною підсистемою представлений силовий модуль Invertor_1 та Invertor_2. Схема даного блоку представлена в (додаток Д, рис. Д.14).

Для побудови силового модуля ІН прийнята трифазна мостова шестипульсна схема. Її функції виконує блок Universal Bridge з бібліотеки SimPowerSystems/Power Electronics, що дозволяє вибрати в якості ключових елементів будь-які напівпровідникові прилади силової електроніки. Однак, для прискорення процесу симуляції моделі, в якості ключових елементів в даному випадку обрані ідеальні керовані ключі. Маска параметрів блоку наведена в (додаток Д, рис. Д.7).

Організацію синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) при керуванні мостовою ключовою схемою виконує блок PWM Generator з бібліотеки SimPowerSystems/Extra Librari/Control blocks. Маска параметрів наведена в (додаток Д, рис. Д.8).

Для дослідження взаємодії інверторів і мереж за потоками потужності необхідно визначити їх складові. Таке завдання виконує підсистема Measure. Її схема представлена в (додаток Д, рис. Д.15). Підсистема виконує розрахунок і чисельне відображення активних та реактивних складових потужностей по кожній з трьох ліній, що сходяться в кожній ланці. Це лінія мережі, лінія інвертора і лінія навантаження. Розрахунок виконується за значеннями відповідних напружень і струмів, які приймають з основної схеми елементи з From1 по From13, представлені блоком From з бібліотеки Simulink/Signal Routing. Маска його параметрів стосовно елементу From1 приведена на (додаток Д, рис. Д.9).

Безпосередній розрахунок активних і реактивних складових потужностей у ланцюзі виконують блоки P_Q_grid, P_Q_inv, P_Q_load. Структурна схема всіх блоків однакова і стосовно блоку P_Q_grid_1 наведена на (додаток Д, рис. Д.16).

В першу чергу визначаються амплітудне значення і початкова фаза напруги і струму відповідного кола. Цю операцію забезпечують блоки Fourier з

бібліотеки SimPowerSystems/Extra Librari/Measurements, маска параметрів яких наведена на (додаток Д, рис. Д.10). Суматор Sum визначає різницю фаз між напругою і струмом. Масштабний підсилювач Gain1 виконує перетворення градусної міри кута в радіанну множенням різниці фаз на коефіцієнт передачі, який дорівнює $\pi/180$. Маска його параметрів наведена в (додаток Д, рис. Д.10).

Подальше визначення складових потужності полягає в множенні добутку діючих значень напруги і струму на відповідні тригонометричні функції, які представлені блоками Trigonometric Function з бібліотеки Simulink/Math Operations. Маски параметрів наведені в (додаток Д, рис. Д.11).

Відображення розрахункових значень в підсистемі Measure виконується за допомогою необхідної кількості блоків Display з бібліотеки Simulink/Sinks з маскою параметрів відповідно до (додаток Д, рис. Д.12).

Висновки до розділу 2

Другий розділ наукового дослідження присвячено моделюванню системи керування пристроєм безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором.

Схарактеризовано структурну схему системи керування ПБЕ з ВЕГ, що дозволить в реальному часі реалізувати функціональні можливості пристрою.

Розроблено імітаційну модель вузла системи електропостачання подвійного живлення в середовищі Matlab/Simulink з використанням вбудованого пакету розширення SimPowerSystems і підсистемою Measure для реалізації досліджень взаємодії інверторів напруги і мереж по потокам потужності активної і реактивної складових із заданими параметрами.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИСТРОЮ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИМ ГЕНЕРАТОРОМ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Імітаційна модель пристрою безперебійного електропостачання з ВЕГ

Для дослідження характеристик і режимів роботи ІН, що входять до складу приладів безперебійного електроживлення з ВЕГ доцільно застосовувати програмні комплекси, що дозволяють проводити імітацію процесів в електричних схемах будь-якої складності.

Для комп'ютерного моделювання ІН використовувалась інтерактивна система MATLAB 7.9.0. (2009b) з пакетом розширень SIMULINK. При моделюванні були використані стандартні блоки із бібліотек Simalink, SimPowerSystem, Signal Processing Blockset та інші. Було розроблено комп'ютерні моделі імітації роботи ПБЕ з ВЕГ в двох режимах: автономний і паралельний.

Модель трифазної ЕРС являє собою три джерела ЕРС, які об'єднані за схемою «зірка» з нейтраллю. Напряга кожної фази зміщена відносно іншої на 120 градусів, що створює систему електроживлення.

Для дослідження режимів роботи ІН, при різноманітних відхиленнях мережевого навантаження, зручно використовувати модель трифазного джерела напруги. Дана модель дозволяє досліджувати роботу пристроїв при асиметрії фазних напруг і асиметрії кутів зсуву фаз. Під час її використання необхідно вводити параметри кожного з трьох джерел ЕРС.

Програмний комплекс MATLAB дозволяє формувати вимірювальні пристрої будь-якого складу і конфігурації. Нижче наведені деякі з сформованих вимірювальних пристроїв, що використовуються в імітаційних моделях роботи ІН.

Цей пристрій забезпечує вимір миттєвих значень напруги і струмів трифазної системи електроживлення. Групи датчиків струму і напруги підключені до відповідних осцилографів.

Враховуючи не потрібність всієї інформації про миттєві значення струму і напруги у всіх ланцюгах – складаються спрощені вимірювальні пристрої. Вони виконують ті ж функції, що і попередні, але не містять осцилографи і дозволяє сформувати осцилограми в будь-якому поєднанні на більш високому рівні моделі досліджуваних пристроїв. Для дослідження режимів роботи ІН при фазовому управлінні (формуванні синхронного сигналу для ІН, що збігається за фазою з мережевою напругою) зручно користуватися вимірювальним осцилографічним пристроєм, що, в свою чергу, формує інформацію про напругу тільки в одній фазі, але для досліджень системи цієї інформаційно достатньо (кожна фаза, якщо не враховувати процеси в нейтральному проводі, «працює» незалежно одна від одної).

Для оцінки якості напруги в будь-якому ланцюзі імітаційної моделі було складено вимірювальний пристрій, що забезпечує формування інформації про миттєві значення напруги в цьому ланцюзі; першої гармоніки; вищих гармонік (сумарних значеннях в кожний момент часу).

Пристрій містить фільтр-«пробку» U_{m1} (паралельний резонанс або резонанс струмів), налаштований на основну частоту (50 Гц), що обмежує струм резистор U_{mn} . Верхній датчик напруги формує інформацію про миттєві значення напруги в ланцюзі, середній - про миттєве сумарне значеннях вищих гармонік, а нижній про миттєві значеннях першої гармонійної складової напруги вузла.

Основним комутаційним елементом ІН є біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT-транзистори), що входять до складу трифазного мостової схеми.

У моделі враховується також кінцевий час вимикання транзистора. Процес вимкнення поділяється на два тимчасові інтервали – час спаду t_f при якому струм

колектор-емітера зменшується до $0,1$ від максимального значення I_{\max} та час затухання t_t при якому струм колектор-емітера зменшується від $0,1 I_{\max}$ до нуля.

Припустимо, в початковий момент часу IGBT-транзистор закритий (його струм $=0$). В деякий момент часу створюються умови для його включення (напруга колектор-емітера більше, ніж U_f і на затвор транзистора подається позитивний сигнал $g > 0$). При цьому на другому вході елемента лог. АБО формується лог. 1, що через перемикач Test2 надходить на вихід status блоку Conduction Logic. По фронту сигналу, сформованого блоком логіки, запускається інтегратор, а перемикач блоку Tail зміщується у верхнє положення. Струм транзистора починає зростати.

У момент зняття з затвору керуючого сигналу перемикач блоку Tail переміщується в нижнє положення і обчислення струму транзистора проводиться відповідно до характеристики яку задає блок Look-Up Table. Блок Look-Up Table задає час спаду t_f і час згасання t_c . При зниженні струму до нуля транзистор вимикається. На виведення m моделі IGBT-транзистори формується масив значень струму і напруги колектор-емітера IGBT-транзистора в залежності від часу.

Модель ІН складається з підсилювача / подільника напруги K ; контролера Generator (ШІМ модулятора); силової частини Invertor, виконаної на основі транзисторного трифазного моста; Г-образного фільтра (дросель L_f конденсатор C_f).

Модель ІН, що працює безпосередньо на навантаженні, призначена для досліджень при різних значеннях $\cos\phi$, напруги управління і параметрах фільтра наступних параметрів: часу затримки вихідної напруги по відношенню до сигналу управління (синхронізації); форми вихідної напруги (його основної гармоніки і рівня вищих гармонійних складових); коефіцієнта передачі ІН; струмів елементів фільтра і навантаження; струму і напруги ключових елементів транзисторної трифазної мостової схеми (силовий частини ІН).

Модель дозволяє досліджувати режими в одній фазі трифазної системи електроживлення і складається з моделей таких пристроїв: трифазного джерела

EPS (E_a , E_b , E_c); вимірювача напруги (measure 1); ІН, що складається з підсилювача / подільника напруги К, контролера ІН (Generator), силової частини ІН (Invertor), Г-образного фільтра (дросель L_f і конденсатор C_f); навантаження Z_{load} ; вимірювальних приладів Scope1-Scope6.

Модель ІН, що працює на навантаженні спільно з централізованою мережею, призначена для досліджень величин і напрямків передачі енергії. При різних значеннях $\cos\phi$, напруги управління і параметрах фільтра модель забезпечує: управління часом затримки / відставанням напруги управління по відношенню до напруги централізованої мережі; визначення форми вихідної напруги (його основної гармоніки і рівня вищих гармонійних складових); визначення коефіцієнта передачі інвертора; визначення струмів елементів фільтра, мережі і навантаження.

Дана модель дозволяє досліджувати режими в одній фазі трифазної системи електроживлення і складається з наступних пристроїв: трифазного джерела EPS (E_a , E_b , E_c); трифазного джерела EPS1 (E_{a1} , E_{b1} , E_{c1}) - імітатора централізованої мережі; вимірювача напруги (measure 1) для контролю EPS1; вимірювача напруги (measure 2), вивід U якого використовується для управління ІН, а вивід U1 для порівняння вихідної напруги ІН із заданим значенням; ІН, що складається з підсилювача / подільника напруги К, контролера ІН (Generator), силової частини ІН (Invertor), дроселя Filter_(L) і конденсатора Filter_(C); навантаження load; вимірювальних приладів Scope1 - Scope2; опору лінії Line Impedance.

3.2 Імітаційна модель системи управління інвертором напруги

Метод заснований на прямому і зворотному перетворенні Парка-Горева. Пряме перетворення полягає в знаходженні проекцій узагальненого вектори струму або напруги на осі ортогональної системи координат, що обертається синхронно з вектором напруги мережі:

$$\begin{vmatrix} i_d \\ i_q \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_a \\ i_\beta \end{vmatrix}, \quad (3.1)$$

де $\theta = \omega \cdot t$ – значення кута повороту обертової системи координат з частотою ω .

Для визначення постійних складових застосовуються фільтри низьких частот.

Зворотнє перетворення Парка-Горєва відбувається в відповідності з виразом:

$$\begin{vmatrix} i_a \\ i_\beta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_d \\ i_q \end{vmatrix}, \quad (3.2)$$

Перевагою даного методу в порівнянні з теорією «миттєвої потужності» є можливість оперування безпосередньо активними і реактивними складовими струму і напруги, а не віртуальними миттєвими потужностями. Перевагою методу також є наявність фільтрів низьких частот, які значно послаблюють можливі імпульсні завади в каналі вимірювання струмів. Недоліком цього методу є необхідність синхронізації з напругою мережі еталонних одиничних сигналів. Для синхронізації може використовуватися система фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Так як в напрузі мережі присутні вищі гармоніки, то перетин нуля кривої напруги може не збігатися з нульовою фазою основної гармоніки напруги мережі. Система ФАПЧ забезпечує високу точність при несинусоїдальності напруги мережі та являє собою слідкуючу систему. Керування реалізовано за методом однокрокового прогнозу, що полягає в розрахунку на кожному такті модуляції середнього значення напруги перетворювача.

Керування фазними струмами компенсатора здійснюється за допомогою формування напруги, тому струм в фазах є вторинним, тобто формується з затримкою як інтеграл від різниці миттєвих значень напруг компенсатора і мережі:

$$i_H(t) = \frac{1}{L} \int (u_C(t) - u_H(t)) dt, \quad (3.3)$$

де $i_H(t)$ – струм інвертора;

$u_C(t)$, $u_H(t)$ – фазна напруга мережі і інвертора;

L – індуктивність дроселя фільтра інвертора.

Напруга ІН визначається на початку кожного такту модуляції з метою забезпечити рівність середнього значення генеруючого струму і струму завдання:

$$\bar{u}_H = \bar{u}_C - L \frac{\bar{i}_{ref} - \bar{i}_C}{T_M}, \quad (3.4)$$

де T_M – період модуляції, а все інше – узагальнені вектори напруги ІН, напруги мережі, струму завдання і струму мережі відповідно до синхронної системи координат d-q.

Система управління ІН, що реалізує згадані вище закономірності приведена на (додаток Г, рис. Г.1). Для перетворення трифазних систем струмів I_a, I_b, I_c та напруг U_a, U_b, U_c мережі в двофазну ортогональну синхронну систему координат $I_d - I_q, U_d - U_q$ застосовані блоки координатних перетворювачів «abc_to_dqo» і «abc_to_dq». Вони знаходяться в бібліотеці «SimPowerSystems / Extra Library / Measurements».

Для роботи координатних перетворювачів необхідні сигнали синхронізації $\sin\theta$ та $\cos\theta$, де $\theta = \omega_1 \cdot t$ – значення кута повороту обертової системи координат з частотою першої гармоніки напруги ω_1 .

Ці сигнали виробляються блоком ФАПЧ «PLL», який знаходиться в бібліотеці «SimPowerSystems / Extra Library / Discret Control Blocks».

Для виділення постійних складових проекцій по осям d – q, відповідних активної і реактивної складових струму першої гармоніки застосовані фільтри низької частоти «Filter1» – «Filter4» з бібліотеки «SimPowerSystems / Extra Library / Control Blocks».

Відповідно до (3.4), отримані струми мережі I_d, I_q необхідно порівняти зі струмами завдання. Два ІН мають один загальний ємнісний накопичувач. Для

нормального функціонування системи напруга ЄН в процесі роботи повинна залишатися незмінною. За умови збільшення потужності навантаження споживачів, підтримання напруги ЄН здійснюється за рахунок ВЕГ, а при зниженні навантаження – за рахунок енергії промислової мережі. У зв'язку з цим для управління ІН введений сигнал напрямку передачі потоку потужності «Power flow direction». Цей сигнал є логічним і визначає статус інвертора споживання або віддачі енергії в паралельну мережу.

Фізично ж значеннями даних змінних є, відповідно, амплітуда активної складової і амплітуда реактивної складової струму мережі, в напрямку якої організовується передача потужності з іншої мережі. Вибір ведучого ІН і визначення струмів завдання для підлеглого інвертора виконується в блоці «Flow-control», схема якого наведена на (додаток Г, рис. Г.2). На наведеній схемі індекс «master» відповідає струму ведучого інвертора, а індекс «slave» відповідає струму підлеглого інвертора. За допомогою констант «Const1» – «Const4» з бібліотеки «Simulink / Sources» встановлюються базові значення «Id_base» і «Iq_base», які являють собою максимально можливі величини амплітуд активної і реактивної складової струму мережі.

Блок «Flow-control» виконує ще одну функцію. У реальній системі через наявність втрат активної потужності в елементах ІН накопичувач буде прагнути розрядитися, і для стабілізації напруги на ньому необхідно компенсувати ці втрати за рахунок споживання з мережі активного струму. Це можна реалізувати шляхом введення в систему керування ІН відповідного зворотного зв'язку. Щоб зменшити коливання напруги на накопичувачі і компенсувати втрати активної потужності в ІН у контурі регулювання напруги на конденсаторі використовується пропорційно-інтегральна ланка «PID Controller» з бібліотеки «Simulink/Continuous» (додаток Г, рис. Г.2). На вхід ПІ-регулятор надходить різницевий сигнал між опорною напругою, яка рівна номінальній напрузі накопичувача (Const5) і реальними значеннями напруги на ЄН (U_{c_1} і U_{c_2}). Даний сигнал похибки посилюється ПІ-регулятором і додається до активної складової струму завдання.

Відповідно до (3.4) на кроці модуляції визначається різниця струму завдання і поточного струму мережі за допомогою блоків суматорів «Sum1» і «Sum2» з бібліотеки «Simulink/Math Operations» (додаток Г, рис. Г.1). Різниця струмів множиться на коефіцієнт, що дорівнює відношенню L/T_M , що формується однаковими блоками «Gain1» і «Gain2» з бібліотеки «Simulink/Math Operations».

Відповідно до (3.4) на базі суматорів «Sum3» і «Sum4» обчислюються складові напруги управління ІН. Координатний перетворювач «dq0_to_abc» з бібліотеки «SimPowerSystems/Extra Library/Mesurements» виконує зворотне перетворення з синхронної системи координат в трифазну систему. Даний блок не має параметрів установлення. Таким чином, отримуємо напругу управління по кожній з фаз ІН. Імпульси управління ключами формуються шляхом класичної ШІМ. Тут напруги управління порівнюються компараторами «Relation» з бібліотеки «Simulink/Logic and Bit Operations» з пилкоподібною напругою від генератора «Gen_mod» із бібліотеки «Simulink/Sources».

Результати імітаційного моделювання говорять про те, що при включенні системи живлення напругу управління не можна подавати стрибком. Це призводить до значних перенапруг на транзисторних ключах. У схемі передбачено плавне збільшення напруги управління за допомогою блоку «Ramp2» з бібліотеки «Simulink/Sources».

Для включення джерела напруги паралельно мережі необхідно виконати заходи по синхронізації з мережею. В даному випадку рівність частоти напруг забезпечується блоком ФАПЧ «PLL». Відповідно до алгоритму управління в якості завдання ІН вказуються необхідні складові узагальненого вектору струму мережі. Тому, якщо перед включенням в паралель інвертора буде поставлено поточний струм мережі, то ІН не повинен буде впливати на мережу. В цьому режимі ІН генерує напругу, яка по амплітуді і фазі дорівнює напрузі мережі, що дозволяє підключити ІН паралельно мережі без зрівнювальних струмів.

Цей режим триває до тих пір, поки зовнішній керуючий сигнал «Start_sync» є пасивним. Якщо даний сигнал стає активним, то система

переходить в режим відпрацювання зовнішніх завдань при паралельній роботі з мережею. В системі управління присутній зовнішній керуючий сигнал «Blackout». Активний рівень цього сигналу формується при виникненні аварійних режимів роботи і викликає відключення інвертора від мережі дією на дистанційний роз'єднувач автоматичного вимикача.

3.3 Дослідження режимів роботи ПБЕ з ВЕГ та аналіз регуляторів

Зміна кута випередження або відставання керуючої напруги інвертора призводить до формування на виході відповідного інвертора до фільтра $Lf1$, $Cf1$ або $Lf2$, $Cf2$ першої гармонійної складової напруги з випередженням або відставанням відносно напруги мережі живлення, зміна амплітуди напруги керуючого інвертора пропорційна зміни амплітуди першої гармонійної складової.

Попереднім тестуюче моделюванням встановлено, що зміна початкової фази напруги управління інвертора по відношенню до напруги мережі на $0,5$ електроградуси і зменшення амплітуди напруги управління інвертора на 5 В призводять до приблизно однакових змін складових повної потужності. У зв'язку з цим, подальші дослідження проводилися при зміні початкової фази напруги управління інвертора з кроком $0,5$ градуси, як в бік випередження, так і в бік відставання, так і при зміні амплітуди напруги управління інвертора з кроком 5 В в бік зменшення номінального значення.

Спочатку досліджувалися режими роботи при зміні тільки одного з параметрів управління, причому тільки у одного з інверторів. Розрахункові дані при зміні фази напруги $IN1$ в бік випередження наведені в (додаток 3, табл. 3.1).

При реєстрації результатів моделювання використовувалися наступні поняття:

- реактивна потужність з індуктивним характером струму, що генерується інвертором в мережу, додатна;

- реактивна потужність з ємнісним характером струму, що генерується інвертором в мережу, від'ємна;

- активна потужність, що віддається в мережу, додатна;

- активна потужність, споживана з мережі, від'ємна.

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що зі збільшенням кута випередження завантаження підлеглого ІН1 активний струм зростає, що викликає зниження активного навантаження мережі_1. При цьому енергія споживається від ланки постійного струму, що веде до розряду конденсаторів ємнісного накопичувача і до появи ємнісної складової струму ІН1. ІН2 при цьому переходить в режим активного випрямляча, що збільшує навантаження мережі_2. Величини зарядів конденсаторів ємнісного накопичувача практично однакові, тому в подальшому будуть приводитися напруги на одному з них (повна напруга заряду ємнісного накопичувача дорівнює подвоєному значенню напруги одного конденсатора).

Таким чином, має місце передача активної потужності з мережі_2 до мережі_1, що призводить до збільшення напруги на навантаженні_1. Розрахункові дані при зміні фази напруги ІН1 в бік відставання наведені в (додаток 3, табл. 3.2). Відповідно, зі збільшенням кута відставання ІН1 переходить в режим активного випрямляча, що викликає збільшення активного навантаження мережі_1.

При цьому енергія передається ланці постійного струму, що призводить до заряду конденсатора, зростання індуктивної складової струму ІН1 і появи ємнісної складової струму мережі_1. ІН2 при цьому працює в інверторному режимі, що зменшує навантаження мережі_2. Таким чином, має місце передача активної потужності з мережі_1 до мережі_2, що призводить до збільшення напруги на навантаженні_2.

Розглянемо вплив зміни амплітудного значення напруги керування інвертором. Розрахункові дані при зміні напруги ІН1 в бік зменшення наведені в (додаток 3, табл. 3.3). При зменшенні напруги ІН1 він переходить в режим активного випрямляча, що викликає збільшення навантаження мережі_1 і заряд

конденсатора ємнісного накопичувача. ІН2 при цьому працює в інверторному режимі, що зменшує навантаження мережі_2. Таким чином, має місце передача активної потужності з мережі_1 до мережі_2, що призводить до збільшення напруги на навантаженні_2. Діапазон регульовальних характеристик ІН1 в даному випадку склав -9 Вт/В та -19 ВАр/В, для мережі_1 склав 9 Вт/В та 18 ВАр/В відповідно. Для ІН2 нахил характеристик склав 8 Вт/В і 15 ВАр/В, для мережі_2 склав -8 Вт/В і -15 ВАр/В відповідно.

Наступним етапом є дослідження впливу на режими роботи мереж одночасно декількох керуючих параметрів. Спочатку доцільно визначити всі можливі комбінації параметрів для одного інвертора. Прийняті позначення:

- К.1_0,5 – зміна кута випередження керуючої напруги інвертора_1 з кроком 0,5 електричного градуса;

- К.1_-0,5 – зміна кута відставання керуючої напруги інвертора_1 з кроком 0,5 електричного градуса;

- Н.1_5 - зменшення амплітуди керуючої напруги ІН1 з кроком 5 В.

При аналізі всіх можливих комбінацій керуючих впливів були виключені ті, що призводять до однакових результатів або технічно не можливі для реалізації. Актуальними є режим роботи лише з К.1_0,5, або ж при одночасних К.1_-0,5 та Н.1_5.

Таким чином, схарактеризована система керування кутом випередження або відставання зміною амплітуди керуючої напруги, що формує на виході відповідного ІН до фільтра першу гармонійну складову напруги з заданими параметрами випередження, відставання і амплітуди.

Висновки до розділу 3

Третій розділ роботи присвячено дослідженню режимів роботи пристрою безперебійного електропостачання з вітроелектричним генератором та аналізу результатів.

З використанням математичного апарату загальної теорії миттєвої потужності розроблена математична модель ПБЕ, що відображає фізичні процеси в трифазній системі електропостачання при наявності двох незалежних джерел живлення.

Введення поняття миттєвої активної потужності, як скалярного твору компонентів векторів напруги та струму, а також припущення миттєвої реактивної потужності в якості тривимірного вектору, дозволило розробити математичну модель, максимально наближену до відображення реальних фізичних процесів.

На основі математичного апарату із застосуванням перетворень Парка-Горєва розроблена система управління ПБЕ з ВЕГ, що дозволяє оперувати безпосередньо активними і реактивними складовими струму і напруги, а не віртуальними миттєвими потужностями. Це значно спрощує взаємодію з зовнішніми ланцюгами завдання і регулювання необхідних параметрів якості електроенергії в промислових мережах.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі поставлено і вирішено завдання з дослідження та розробки енергоефективних систем електропостачання малопотужних споживачів з використанням відновлювальних джерел енергії.

При розробці пристрою безперебійного електропостачання з ВЕГ необхідно враховувати нестабільність вихідних параметрів вітрогенераторів. Розглянуто схемо-технічне рішення ПБЕ з ВЕГ на базі трифазних інверторів напруги для забезпечення зв'язку і спільної роботи двох мереж (локальної з ВЕГ та загальної електромережі) на загальне навантаження, що дозволяє забезпечити передачу, розподіл і поліпшення якості електроенергії в прямому і зворотному напрямку потоків потужностей.

Розроблено структурну схему системи керування ПБЕ з ВЕГ, що дозволить реалізувати функціональні можливості пристрою і забезпечить підвищення ефективності передачі та розподілу електроенергії за рахунок оптимізації параметрів електроспоживання від ВЕГ. Розроблено спрощену імітаційну модель вузла системи електропостачання подвійного живлення (загальнопромислова мережа – локальна з ВЕГ).

Досліджено залежності величин потоків активної і реактивної потужностей між двома електричними мережами при: роздільному керуванні фазовим кутом або амплітудою напруги завдання; поєднанні керування фазовим кутом і амплітудою напруги завдання по параметрам d і q підлеглого інвертора ІН2. Визначено регульовальні характеристики передачі активної потужності з мережі з ВДЕ в промислову мережу електроживлення при компенсації реактивної потужності в промисловій мережі. Встановлено, що застосування тих же параметрів до ведучого інвертора ІН1 викликає зворотний процес перетікання потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко Я.О. Оцінка впливів на навколишнє середовище: навчальний посібник / Адаменко Я.О., Супрун В.П – М.: Івано-Франківськ. 2014. – 284 с.
2. Антропов А.П. Энергоэффективная система электроснабжения с автономным источником нестабильной мощности: дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.03. / Антропов А.П. – М.: Нижний Новгород, 2013. – 218с.
3. А.А. Федоров, В.В. Каменева. Основы электроснабжения промышленных предприятий. / А.А. Федоров. – М.: Энергоатомиздат. 1984 г.
4. А.А. Федоров. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. / А.А. Федоров. // Том 1. Электроснабжение. – М.: Энергоатомиздат. 1986 г.
5. А.А. Федоров. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. / А.А. Федоров. // Том 2. Электрооборудование. – М.: Энергоатомиздат. 1987 г.
6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. К.: ТОВ «ВіолаПрінт», 2008. – 55 с.
7. Васько В.П. Управление параметрами электроэнергии автономных ветроэлектрических установок. / Васько В.П. // *Технічна електродинаміка*. – 2002. Вип.1. – С. 53-56.
8. Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами): навчально-методичний посібник для магістрантів. / Величко С.А – М.: Харків: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2003. – 52 с.
9. Величко С.А. Природно-ресурсне забезпечення гібридних геліовітроенергетичних систем (в межах рівнинної території України): автореф. дис. канд. геогр. наук: 11.00.11. / Величко С.А – М.: Харків, 2006. 20 с.
10. Вітроенергетика: державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. [Електронний ресурс] – 2020 <https://saee.gov.ua/uk/ae/windenergy>.

11. Волковая О.О. Природно-ресурсний потенціал території для розміщення вітроагрегатів: топічний рівень: автореф. дис. канд. геогр. наук: 11.00.11. / Волковая О.О. – М.: Харків, 2018. –20 с.
12. Габрель М.С. Особливості використання нетрадиційних та відновлювальних джерел енергозбереження у промисловості регіону: *інноваційна економіка* / Габрель М.С. – 2013. №2 (40). –С.101-106.
13. Глебова М.Л., Єгоров О.Б. Основи використання енергії вітру: конспект лекцій./ Глебова М.Л., Єгоров О.Б. –М.: Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. – 123 с.
14. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю. Ветроустановки малой мощности. / Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с.
15. Дмитренко Л.В., Барандіч С.Л. Вітроенергетичні ресурси в Україні. / Дмитренко Л.В., Барандіч С.Л. // *Наукові праці УкрНДГМІ №256*. – 2007. –С. 166-173.
16. Дашенко А.Ф., и др. MATLAB в инженерных и научных расчетах / Дашенко А.Ф. – М: Одесса, 2003.
17. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / Герман-Галкин С.Г. – 2008
18. Забарний Г.М., Щурчков А.В. Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України. / Забарний Г.М., Щурчков А.В. – К.: ІТТФ, 2002. – С. 151-159.
19. Задорожний В. Фізичні основи вітроенергетики. / Задорожний В. // *Фізико-математичні та комп'ютерні науки, технології, навчання: науково-практичні рішення та підходи молодих науковців*: зб. наукових праць молодих учених фізико-математ. факультету Центральноукраїнського державного педагогічного університету ім. В. Винниченка «Наукові записки молодих учених» – 2019. – С. 251-254.
20. Індустрія вітроенергетики в Україні набирає оберти. *Енергетичний перехід*. [Електронне джерело:] – 2020

<https://energytransition.in.ua/industriya-vitroenergetyky-v-ukrayini/>.

21. Ключев А.С. Проектирование систем автоматизации технических процессов. / А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский, А.А. Ключев – 1990

22. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.. Ветроэлектрогенераторы: учеб. Харьков: Харьк. нац. аэрокосм. ун-т. / Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. – Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.

23. Макаровский Е.Л., Зиньч В.О. Методика оценки ветрового энергетического потенциала. / Макаровский Е.Л., Зиньч В.О. // *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки.* –2012. – Вип. 34. С. 211-228.

24. Молодан Я.Є. Сучасні підходи до оцінки та аналізу основних вітрових характеристик для цілей вітроенергетики. / Молодан Я.Є. // *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії.* – 2013. – С.115-120.

25. Москальчук Н.М. Підвищення рівня екологічної безпеки при використанні енергії вітру в Карпатському регіоні: дис. канд. техн. наук: 21.06.01. / Москальчук Н.М. – Івано-Франківськ, 2019. – 228 с.

26. О.С. Полянський. Напрями розвитку альтернативних джерел енергії: акцент на твердому біопаливі та гнучких технологіях його виготовлення / монографія / О.С. Полянський – М.: Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 136 с.

27. Окопний Л., Колесніков А. Обґрунтування застосування вітроенергетичних установок для підприємств Тернопільської області. / Окопний Л., Колесніков А. // *Соціально-економічні проблеми і держава* – 2012. –Вип. 1 (6). С.74-81.

28. Олійник Я.Б., Шищенко П.Г., Гавриленко О.Г. Основи екології: підручник. / Олійник Я.Б., Шищенко П.Г. – К.: Знання, 2012. – 558 с.

29. Осадчий В., Скриник О., Радченко Р. Вітроенергетичні ресурси Українських Карпат. / Осадчий В., Скриник О., Радченко Р. // *Наукові праці*

Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. – 2014. – №266. С. 3-11.

30. Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циценков. Основи вітроенергетики. / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циценков – М.: Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – 335 с.

31. Офіційний сайт Світової асоціації вітрової енергетики: [Електронне джерело] – 2020.

<http://www.wwindea.org>.

32. Перспективы мировой ветроэнергетики. // Доклад GWEC, Greenpeace International, DLR и Ecofys Consultancy / [by ed. Crispin Aubrey, Angelika Pullen, Arthouros Zervos, Sven Teske], – Berlin. 2007. – 31 с.

33. Повханіч А.Ю. Вітроенергетика як ключовий елемент енергетичної стратегії. / Повханіч А.Ю. // *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство.* / – 2017. – Випуск 13, частина 2. С.81-86.

34. Точений В. А. Моделі і методи розрахунку техніко-економічних характеристик вітрових електростанцій: автореф. дис. канд. техн. наук. / Точений В. А. – М: Київ 2008. –19 с.

35. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. / Харитонов В.П. – М: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

36. Чумаченко С.М., Черепньов І.А. Впровадження вітроенергетичного потенціалу України для середнього та малого бізнесу АПК. / Чумаченко С.М., Черепньов І.А. // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* – 2015. – С. 626-635.

37. Янсон Р.А. Ветроустановки: учеб. пособ./ Янсон Р.А. – М.: Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 36 с.