

електродинамічні зусилля на обмотки мережевого трансформатора при допустимому перевантаженні допоміжного трансформатора, і в такий спосіб підвищити надійність його роботи і СЕП ДСП загалом.

1. Варецкий Ю. Е., Гапанович В. Г., Кенс Ю. А., Жураховский А. В., Стряпан В. Н. Исследование бросков токов намагничивания в системе электроснабжения сверхмощных дуговых сталеплавильных печей // *Техническая электродинамика*. – К.: Наук. думка, 1990. – № 2. С. 38–43.  
2. Перхач В. С., Скрытник А. И., Сегада М. С. Программа анализа электромагнитных процессов электроэнергетических систем с вентиляльными устройствами в контурных координатах / Гос. ФАП, № П006676. Укр. ФАП, № 6143. – 1984. – 93 с. 3. А. с. 1559438 (СССР). Система электроснабжения дуговой сталеплавильной печи / Кенс Ю. А., Гапанович В. Г., Варецкий Ю. Е., Сегада М. С., Харченко В. А., Дрогин В. И., Татаров А. П., Курлыкин В. Н. – Оpubл. в Б. И., 1990, № 15.

УДК 621.311.24

М. С. Сегада<sup>1</sup>, О. Б. Дудурич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електричних станцій

<sup>2</sup> ПАТ “Львівобленерго”

## ОСНОВНИ АСПЕКТИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В ЕНЕРГОСИСТЕМИ

© Сегада М. С., Дудурич О. Б., 2016

Схематично відображено умови вибору точки під'єднання вітрових електричних станцій (ВЕС) до електроенергетичних систем та описано умови, які повинні бути виконані для забезпечення їх сумісної роботи. Проаналізовано ефекти інтеграції ВЕС в електроенергетичні системи на локальному (місцевому) та загальному рівнях. Розглянуто вимоги міжнародних стандартів до регулювання частоти електроенергетичних систем з вітровими електричними станціями.

**Ключові слова:** вітрова електрична станція (ВЕС), вітроенергетика, вітроелектрична установка (ВЕУ), електроенергетична система (ЕЕС), регулювання частоти, потоки потужності, точка підключення (ТП).

The conditions of the point of common coupling choice of wind power plants are shown schematically and the conditions that must be met for their joint operation as a part of the power systems are described. The effects of integration of wind power plants into the power systems at the local and general levels are analyzed. The requirements of the international Grid Codes to the frequency control of the power systems with wind power plants are considered.

**Key words:** wind power plant (WPP), wind power, wind turbine, power system (PS), frequency control, power flows, point of common coupling (PCC).

### Вступ

Постійне зменшення викопних видів палива, необхідність скорочення викидів парникових газів та збільшення попиту на електроенергію є основними причинами пошуку нових (альтернативних) джерел енергії. Вітрові електричні станції (ВЕС) є важливими об'єктами електроенергетики, які виробляють «чисту» енергію, але спричиняють порушення в електроенергетичній системі (ЕЕС) через безперервно-змінну природу вітру, яку важко спрогнозувати. Не зважаючи на те, що сучасні ЕЕС стикаються з додатковою мінливістю і невизначеністю, яка зумовлена генерацією відновлюва-

них джерел енергії (ВДЕ), зокрема вітроенергетики, бурхливий і ефективний розвиток вітроенергетики у світі свідчить про доцільність і високу ефективність виробництва електроенергії вітроенергетичними установками (ВЕУ) і автономного використання, і промислових потужностей [7].

### **Постановка проблеми**

Сьогодні мета розвитку вітроенергетики полягає в інтеграції великої кількості ВЕС в ЕЕС багатьох країн світу [6–9]. ЕЕС повинні бути «гнучкими», щоб інтегрувати велику частку ВЕС. Це піднімає важливі технічні питання і багато технічних аспектів потребують детального дослідження. Хоча ВЕС можуть бути проаналізовані окремо від ЕЕС, більшу частину часу вони працюють сумісно з ЕЕС, тому вони повинні бути вивчені в цій комбінації. Розмір і «гнучкість» ЕЕС визначає їх спроможність до розміщення певної кількості ВЕС. Мінливий характер енергії вітру має велике значення в контексті змінної ЕЕС, а не в контексті індивідуальної ВЕУ чи ВЕС. Незважаючи на те, що вітер не доступний 100 % часу на одному конкретному місці, є малий загальний вплив, якщо врахувати, що райони з високим вітровим потенціалом є частиною великих національних або навіть міжнародних об'єднаних ЕЕС. Важливе питання інтеграції вітроенергетики постає перед проектуванням та експлуатацією і пов'язане з безперервно-змінною природою вітру, яку дуже важко спрогнозувати. Також це пов'язано з використанням порівняно нових видів генераторів (наприклад асинхронний генератор з подвійним живленням або синхронний генератор з перетворювачем номінальної потужності), які використовуються у ВЕУ, але які зазвичай не використовуються на традиційних електростанціях. Перед проектуванням та експлуатацією ВЕС потрібно розглянути основні аспекти, які стосуються інтеграції ВЕС в ЕЕС і пов'язані з цим нові перспективи їх сумісної роботи. Детального аналізу потребує вибір місця встановлення ВЕС не тільки за наявними вітровими ресурсами, а й за вибором точки під'єднання (ТП) ВЕС до електричної мережі (ЕМ), оскільки це приводить не лише до зміни інфраструктури ЕМ, а й матиме локальний (місцевий) та загальний вплив на неї. Враховуючи міжнародні вимоги правил технічної експлуатації (ПТЕ), ВЕС повинні бути спрямовані на кращу адаптацію до вимог наявних ЕМ та на введення розширеного і конкретнішого контролю і правил захисту.

### **Аналіз останніх публікацій**

Питанню інтеграції ВЕС в ЕЕС присвячено багато робіт, і закордонних, і українських авторів. У роботах [2–4] в загальному ВЕС розглядаються як джерела розподільної генерації. У [2] основну увагу приділено впливу ВЕС на рівні напруг та втрати потужності. Автори [3, 4] детально розглядають основні технічні проблеми, які пов'язані з впровадженням джерел розподільної генерації в ЕМ України. Оскільки в багатьох країнах світу (США, Китай, Данія, Німеччина, Ірландія тощо) вітроенергетика ефективно впроваджується, закордонні автори [6–9] досліджують вплив великої частки ВЕС на ЕЕС.

### **Формулювання мети статті**

Комплексно проаналізовані основні аспекти інтеграції ВЕС в ЕЕС: 1) основні вимоги, які потрібно виконати під час вибору ТП ВЕС до ЕМ; 2) локальний та загальний впливи ВЕС на ЕЕС; 3) міжнародні вимоги ПТЕ до підтримки частоти ВЕС.

### **Виклад основного матеріалу**

**1. Умови вибору точки під'єднання (ТП).** Основні умови інтеграції ВЕС в ЕЕС складаються з двох важливих аспектів [6]:

- Ø збереження відповідного рівня напруги для всіх споживачів і ЕЕС: споживачі повинні мати можливість продовжувати використовувати ті ж прилади, до яких вони звикли, а ВЕС, зазвичай, призначені для роботи в певному діапазоні напруги;
- Ø підтримка балансу потужності системи: потужність вироблена іншими електричними станціями (ЕС) та ВЕС повинна одночасно забезпечувати потреби споживання.

На рис. 1 наведено зв'язок ВЕС з ЕЕС та споживачами, який відображає основні умови інтеграції ВЕС в ЕЕС.

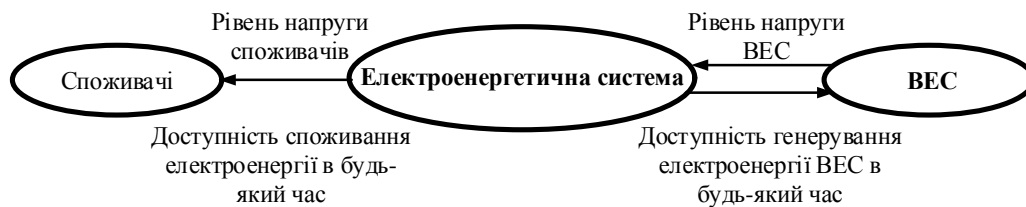


Рис. 1. Зв'язок ВЕС з ЕЕС та споживачами

З погляду споживачів, є певні умови, які повинні бути виконані і які пов'язані з інтеграцією генеруючих ВЕС в ЕЕС [6]:

- Ø рівень напруги в ТП повинен залишатися в прийнятному діапазоні, оскільки більшість побутової техніки вимагає певний діапазон напруги для надійної роботи;
- Ø потужність повинна бути доступна в той час, коли потребують споживачі;
- Ø вартість виробленої електроенергії повинна бути доступна для споживачів.

Перші дві вимоги стосуються надійності електропостачання. Підвищення надійності веде до зростання витрат і в такий спосіб виникає конфлікт між першими двома вимогами і вартістю електроенергії.

Власники ВЕС або оператори ЕЕС також мають певні вимоги до існуючої ЕЕС, щоб мати можливість продавати електроенергію, вироблену ВЕС [8]:

- Ø ВЕС вимагають напруги певного рівня в ТП, оскільки вони зазвичай призначені для роботи в певному діапазоні напруги;
- Ø власники ВЕС хочуть мати можливість продавати електроенергію в ЕМ у той час, коли є можливість її виробляти, оскільки у разі зниженого попиту, виробництво зменшується чи взагалі припиняється, а це означає, що власник ВЕС втрачає можливий фінансовий прибуток.

Якщо вимоги ЕЕС до надійності в ТП ВЕС високі, вартість генерованої ними електроенергії збільшується. Що стосується ефекту балансу відносно ЕЕС, виробництво електроенергії ВЕС спричиняє нові проблеми для системних операторів (СО), як показано в [8]. На відміну від звичайного виробництва електроенергії, вихідна потужність, вироблена ВЕС, є змінною і непередбачувана для тривалого часу в майбутньому. Ці два аспекти вимагають нових рішень для роботи ЕЕС, особливо коли збільшується частка ВЕС у їх складі. Два основні ризики, з якими нині стикаються СО під час електропересилання електричної енергії, є [8]:

- Ø великі перетоки потужності, які призводять до перевантаження ЕМ, а особливо в ЕМ з одним диспетчерським пунктом;
- Ø зменшення наявних резервів ЕЕС.

Виробництво потужності ВЕС в ТП, зазвичай, обмежується максимальним значенням, для уникнення перевантаження ЕМ. У разі низької швидкості вітру (до 3–4 м/с), ВЕС не може працювати, тому повинні бути використані резерви ЕЕС. Через змінний характер виробленої електроенергії ВЕС, більшість країн вимагають наявність резервів не менше ніж 50 % від встановленої потужності [8].

Ці два ризики мають високу ймовірність виникнення, а також великий вплив на продуктивність системи, коли збільшується відсоток ВЕС. У деяких країнах юридично надається пріоритет постачанню виробництва електроенергії ВЕС [9]. Згідно з яким відповідальність за балансування знімається з постачальників, тобто ВЕС, і перекладається на системи електропересилання в цих країнах.

В умовах збільшення частки ВЕС, недосконалого контролю та недосконалого прогнозування збільшується необхідність балансування в таких системах керування. Вартість електроенергії, виробленої ВЕС, призводить до змін вартості всієї електроенергії. У деяких пунктах контролю це може призвести до того, що вироблена кількість електроенергії ВЕС перевищує загальне навантаження в зоні керування.

**2. Ефекти інтеграції вітроенергетики на роботу ЕЕС.** Є достатньо проблем, які повинні бути вирішені під час інтеграції ВЕС в ЕЕС. Це такі аспекти, як компенсації реактивної потужності, зниження гармонік, управління частотою, короткі замикання тощо. Ефект (вплив) ВЕС на ЕЕС потрібно розглядати і локальний (місцевий), і на всю ЕЕС [6–9], як подано на рис. 2, а, б.

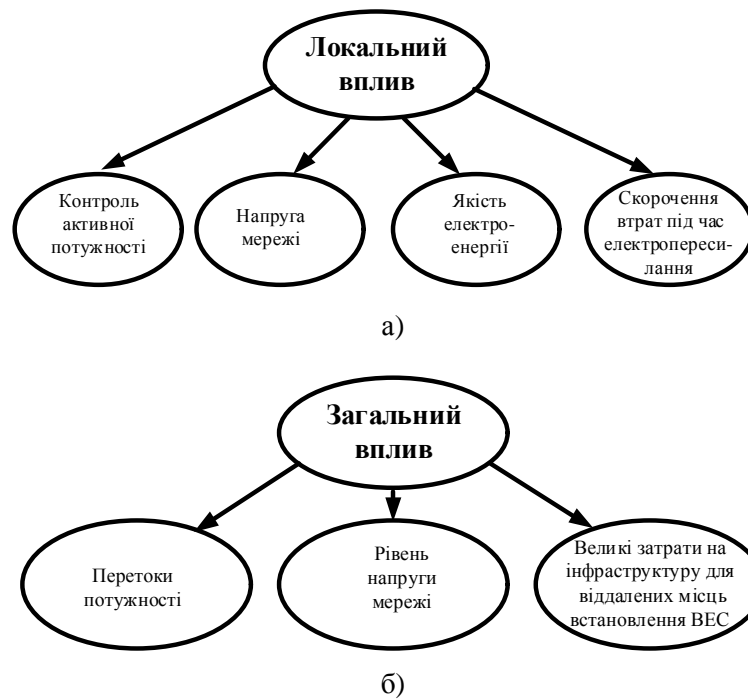


Рис. 2. Локальний (а) та загальний (б) впливи ВЕС на ЕЕС

У місцевому масштабі ВЕС впливають на контроль активної потужності та напруги ЕМ в місцях, поблизу яких встановлена така станція [2, 3], а це своєю чергою впливає на якість електроенергії. Залежно від типу генератора ВЕС можуть забезпечити контроль активної потужності. Правильний вибір ТП дасть змогу знизити втрати в ЕМ, коли вироблена потужність використовується для місцевого споживання (відстань транспортування зменшується).

У масштабі всієї ЕЕС є істотні ефекти, які слід враховувати. ВЕС впливають на перетікання активної та реактивної потужностей в ЕМ та на рівень напруги. Потрібно враховувати, що ВЕС не завжди беруть участь у регулюванні частоти ЕЕС, це залежить від вибраного типу генератора і системи контролю. Крім того, приєднання ВЕС може призвести до додаткових змін в інфраструктурі ЕМ електропересилання і розподілі потужностей.

Для приєднання віддалених ВЕС, таких як «офшорні» (морського базування) до центрів навантаження, нові лінії електропересилання (ЛЕП) повинні бути встановлені, що потребує додаткових витрат. Одним з вирішень цієї проблеми є транскордонні перетоки потужності, які допомагають у зменшенні витрат на територіально розподілених ВЕС.

Робота ЕЕС з генеруванням електроенергії ВЕС залежить від різних чинників: резервів потужностей і управління балансом, короткострокового прогнозування вітру, меж управління перетоками тощо. У таблиці наведено вплив ТП на ЕЕС [9].

#### Вплив ТП на ЕЕС

Рівень генерування	Рівні електропересилання і розподілення
Більші витрати на підтримання балансу в ТП через випадкові коливання.	Можливі «скупчення» потужності в ЕМ.
Система повинна забезпечувати резерв потужності для ВЕС.	Зміни у величині і напрямі транскордонних перетоків потужності.

Довгостроковий прогноз вітру не можливо отримати. Оператори ЕЕС співпрацюють з метеорологічними інститутами прогнозування вітру, але найточніші прогнози можуть бути зроблені тільки для 4–8 год, максимум на один день. Беручи до уваги цей вплив на рівні генерування, вимоги під-

тримки балансу в ЕЕС і витрати є вищі. ЕЕС також має забезпечувати оперативний резерв потужності для покриття допоміжних послуг для забезпечення функціональності ВЕС.

На рівнях електропересилання і розподілу, проблеми, які можуть бути викликані в ЕЕС, пов'язані з можливими накопиченнями потужності. Можуть з'явитися зміни у величині і напрямку поперечних перетоків потужності. Більшість ВЕС приєднується до розподільних мереж (РМ), переваги чого полягають у такому [2, 9]:

- Ø потужність може споживатися всередині РМ, що знижує витрати;
- Ø віддалені користувачі можуть споживати електроенергію, вироблену ВЕС;
- Ø ВЕС може підтримувати частину керування у разі збоїв електропересилання, які в іншому випадку можуть спричинити перерви в постачанні електричної енергії.

Інший вплив на роботу ЕЕС і якість електроенергії є накопичення електроенергії, виробленої ВЕС в ЕЕС [9]. У цьому випадку потрібно розглядати два найважливіших аспекти:

- Ø кількість ВЕУ, яка входить до складу ВЕС;
- Ø місця розташування ВЕС на великих ділянках.

У зв'язку з переміщенням повітряних мас і шорсткістю землі, швидкості вітру, необхідні для роботи ВЕУ, можуть бути турбулентними. Якщо велика кількість ВЕУ входить до складу ВЕС, це зменшує ефект турбулентності по території всієї ВЕС, оскільки всі ВЕУ попадають під її дію. Розташування ВЕС в різних районах призводить до ефекту згладжування, оскільки погодні зміни не впливають на всі ВЕУ відразу. Цей ефект обумовлений місцевими метеорологічними прогнозами і загальними розмірами місць встановлення ВЕС.

**3. Вимоги ПТЕ до регулювання частоти приєднаних ВЕС до ЕЕС.** Необхідність сьогодення у виробництві електроенергії ВЕС зумовлює необхідність створення або удосконалення ПТЕ. Їх вимоги пов'язані з якістю електроенергії, зменшенням гармонік, забезпеченням реактивною потужністю, контролем напруги і частоти, стійкістю до коротких замикань (к.з.) тощо. З іншого боку, сучасна інфраструктура ЕМ надає можливість ВЕС працювати в межах ЕЕС. Для створення сприятливих умов сумісної роботи ВЕС та ЕЕС, необхідно взяти до уваги такі аспекти [9]:

- Ø необхідно приєднати зони генерування ВЕС до центрів споживання;
- Ø коли рівень споживання електроенергії та вихідної потужності ВЕС відрізняються один від одного (наприклад, слабкий вітер і високе навантаження), то може відбутися «скупчення» у ЕМ;
- Ø поява географічних секторів з високою концентрацією ВЕС.

Ще одним важливим аспектом інтеграції ВЕС в ЕЕС є регулювання частоти. Зазвичай ПТЕ вимагають участі ВЕС в первинному і вторинному регулюваннях частоти. В ЕЕС частота залежить від активної потужності, тому управління частотою полягає у підтримці балансу між генеруванням та споживанням [5–9]. На часовій діаграмі (рис. 3) зображено види контролю частоти після виникнення збурення [5].

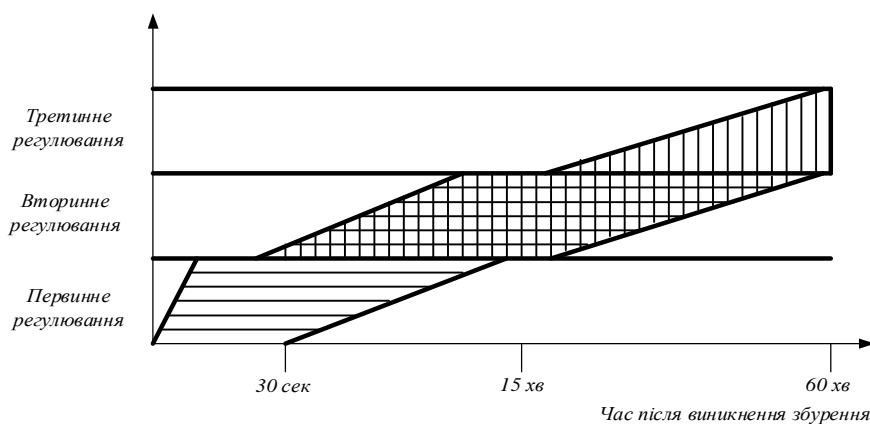


Рис. 3. Часова діаграма видів регулювання частоти

Первинний контроль дозволяє відновити баланс (протягом 1–30 с) за частоти, яка відрізняється від номінальної, у відповідь на раптовий дисбаланс між генеруванням і споживанням. Вто-

ринний контроль відновлює частоту системи за її заданим значенням за час 10–15 хв. Він замінює первинний резерв і працює поки третинний (довготерміновий) резерв не активується.

У нормальному режимі роботи вихідна активна потужність ВЕС може змінюватися до 15 % від встановленої потужності в діапазоні 15 хвилин. Отже, вироблена потужність ВЕС може взяти участь у первинному та вторинному регулюваннях. ВЕС повинні виробляти більше потужності, щоб забезпечити вторинне регулювання частоти, якщо вона є нижчою від номінального значення. У разі підвищення частоти ЕЕС, деякі ВЕС можуть бути вимкнені.

Вимоги до контролю частоти в різних країнах наведені на рис. 4. Для нормальної роботи ЕЕС, частота повинна бути близькою до її номінального значення. В Європейських країнах зазвичай частота повинна підтримуватися між  $(50 \pm 0,1)$  Гц і дуже рідко коливатися в межах 49–50,3 Гц [7].

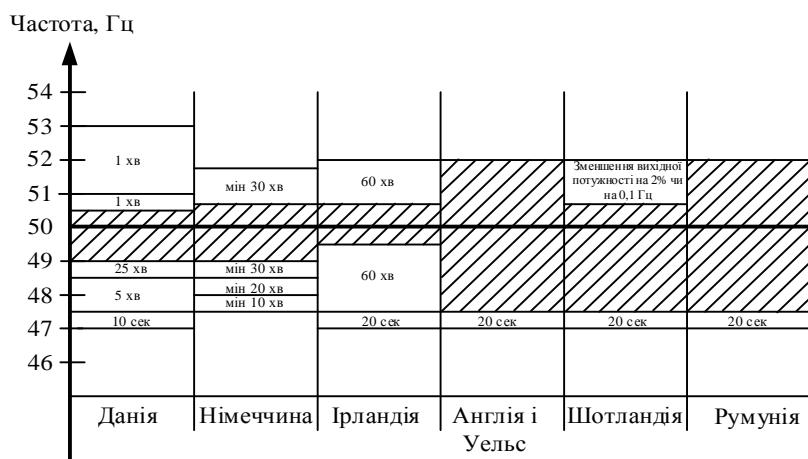


Рис. 4. Міжнародні вимоги до частотного діапазону, в якому ВЕС повинні залишатися в роботі

Заштриховані ділянки відображають діапазони частоти, де ВЕС повинні бути в змозі працювати на повну потужність безперервно. Незаштриховані частотні діапазони вимагають обмеження роботи ВЕС, де вони повинні залишатися під'єднаними в цілях сприяння відновленню частоти. Наведений час показує період, протягом якого ВЕС повинні залишатися під'єднаними. Можливість ЕЕС узгоджувати зміни попиту на електроенергію виражається терміном «адекватність» системи. «Адекватність» системи можна розглядати з двох поглядів:

- Ø потужності всіх ЕС ЕЕС для покриття попиту (навантаження);
- Ø здатності системи електропересилання пересилати вироблену потужність до споживачів.

Згідно з українськими вимогами [1] у разі відхилення частоти, ВЕС має бути в змозі забезпечити регулювання частоти для стабілізації частоти в мережі (50 Гц). Точність вимірювання частоти повинна бути не меншою, ніж  $\pm 10$  мГц. Повинна бути передбачена можливість налаштування системи регулювання частоти в діапазоні 47–52 Гц з точністю 20 мГц.

З метою підтримки «адекватності» ЕЕС для інтеграції ВЕС, ПТЕ вимагають, щоб ВЕС брали участь у контролі напруги мережі, а також постійно виробляли електроенергію у разі несправностей в ЕМ.

## Висновки

Основна мета роботи ЕЕС, незалежно від частки виробництва електроенергії ВЕС, є безперервне забезпечення відповідним рівнем напруги споживачів та збалансоване виробництво і споживання електроенергії.

У зв'язку з тенденцією до збільшення частки ВЕС і кількістю перетікання генерованої потужності в об'єднанні ЕЕС, насамперед оцінка впливу ВЕС повинна бути зроблена на рівні місця під'єднання ВЕС до ЕМ.

Ефективна інтеграція ВЕС в ЕЕС необхідна для того, щоб домогтися широкого використання ВДЕ. На середньострокову перспективу, енергія вітру має найбільший потенціал для збільшення частки генерування електроенергії за рахунок ВДЕ.

Локальний (місцевий) вплив ВЕС на ЕЕС переважно залежить від типу генератора ВЕУ, загальний – від частки ВЕС у складі ЕЕС

ЕЕС повинна мати відповідний рівень надійності, незалежно від величини потужності ВЕС. Всі вимоги ПТЕ повинні бути спрямовані на кращу адаптацію ВЕС до вимог ЕЕС, а також введення розширеного і локального контролю і захисту.

Для підтримки «адекватності» ЕЕС, важливо запобігти втратам великої кількості генерованої потужності ВЕС під час несправностей в ЕЕС. Заходи для запобігання к.з., контроль напруги ВЕС і додаткова автоматизація ЕЕС для покращення регулювання частоти повинні бути взяті до уваги.

*1. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних станцій потужністю 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. Завдання 3.3 Підключення «ВДЕ» до електричної мережі. Жовтень, 2011. – 43 с. 2. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. // Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та установки. – 2011. – № 1. С. 46–53. 3. Коновал В. С. // Вісник НУ «Львівська політехніка». – Л.: Львівська політехніка, 2012. – № 736: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 64 – 69. 4. Яндульський О. С. Особливості аналізу режимів електроенергетичних систем з вітровими електричними станціями / Яндульський О. С., Денисюк П. Л. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011, № 11 (186). С. 464 – 465. 5. Яндульський О. С., Стелюк А. О., Лукаш М. П. Автоматичне регулювання частоти та перетоків активної потужності в енергосистемах: навч. посіб. / під загальною редакцією д.т.н. О. С. Яндульського. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 88 с. 6. Ackermann T. Wind Power in Power Systems// John Wiley & Sons Ltd, Stockholm, 2005. – 691 p. 7. EWEA, Large scale integration of wind energy in the European power supply: analysis, issues and recommendations, 2005. – 172 p. 8. European Transmission System Operators, “European Wind Integration Study (EWIS) Towards a Successful Integration of Wind Power into European Electricity Grids”, Final-Report, 2007. – 39 p. 9. N. Arghira, D. Ilisiu, I. Fagarasan, S. S. Iliescu, V. A. Asan Aspects Regarding Integration of Wind Power Plants into the Power System, 2009.k – P. 127–131.*