

## УДК 621.321

В. Г. СИЧЕНКО – д. т. н., професор, завідувач кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, elpostz@i.ua, ORCID: 0000-0002-9533-2897  
Є. М. КОСАРЕВ – аспірант кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, kosarev@e.diit.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3574-7414  
М. М. ПУЛІН – начальник служби електропостачання, Регіональна філія «Львівська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця», ee@railway.lviv.ua, ORCID: 0000-0003-0929-671X  
Є. В. КУЗНЕЦОВА – старший викладач кафедри гуманітарних, фундаментальних та загально інженерних дисциплін, Національна металургійна академія України, wit\_jane2000@i.ua

# ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ШИНАХ 35 кВ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ З ВІТРОВОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

## Вступ

Останнього часу в енергетичному секторі України набуває все більшої сили загальносвітова тенденція зростання обсягів електроенергії отриманих від відновлюваних джерел. Нині альтернативні джерела електроенергії нестримно розвиваються, збільшується кількість постачальників і змінюються умови надання послуг з електропостачання. Цей процес обумовлений важкою екологічною ситуацією, необхідністю охорони довкілля і складнощами енергетичної політики у світі. Україна за останні декілька років добилася значного прогресу в розвитку джерел альтернативної електричної енергії, зокрема, сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій.

На залізницях України на сьогодні реалізовано пілотні проекти паралельної роботи СЕС та зовнішньої системи електропостачання для живлення шин 10 кВ на тяговій підстанції Самбір та ВЕС для живлення шин 35 кВ на тяговій підстанції Старий Самбір. При цьому необхідно мати на увазі, що електричні мережі Укрзалізниці мають специфічні особливості функціонування пов'язані, в першу чергу, з необхідністю забезпечення безпеки руху поїздів та нестационарним характером електроспоживання.

При впровадженні джерел розподіленої генерації в енергетичні системи виникає низка питань, одним з яких являється дослідження можливості паралельної роботи з електроенергетичною системою. Світовий досвід показує, що при паралельній роботі ВЕС і ЕЕС необхідно приділяти увагу, серед іншого, питанням якості електричної енергії.

На сьогоднішній день дослідження такого плану в системах тягового електропостачання фактично не проводяться. У зв'язку з вищевикладеним дослідження якості електричної енергії в точці приєднання при різних режимах функціонування навантаження в системі тягового електропостачання є актуальним завданням.

## Мета

Метою даної роботи є оцінка якості електричної енергії на шинах 35 кВ тягової підстанції при підключенні до них вітрової електростанції.

## Проблематика питання

Безперебійне постачання електроенергією є найважливішою складовою життєзабезпечення сучасного безпечного середовища проживання людей та ефективного функці-

онування суспільного виробництва. Перерви в електропостачанні за масштабами збитків можуть бути зараховані до найбільш небезпечних факторів, що завдають удару по національній економіці і по благополуччю людей. Тому основною метою функціонування електроенергетичної галузі є надійне і економічне постачання споживачів електричною енергією необхідної якості. Саме тому, у багатьох країнах світу нині, разом з розвитком централізованого електропостачання, усе більш активно підтримується тенденція широкомасштабного переходу до застосування джерел розподіленої генерації енергії (ДРГ) [1–6]. При цьому в зоні дії централізованого енергопостачання ДРГ дуже добре інтегруються з системами цього типу. Системи розподіленої енергетики мають ряд привабливих властивостей, що дозволяють розглядати їх як основу для нової парадигми розвитку енергетики. У числі таких властивостей називають:

- 1) підвищення енергетичної незалежності споживачів;
- 2) згладжування пікових навантажень;
- 3) зниження рівня необхідного резервування потужності;
- 4) мінімізацію транспорту енергоносіїв;
- 5) скорочення втрат при транспорті вторинних енергоносіїв;
- 6) можливість використання місцевих енергоресурсів.

Додатковими чинниками, сприяючими розвитку розподіленої генерації, являються [7]:

– прагнення споживачів адаптуватися до ринкової невизначеності в розвитку електроенергетики і в цінах на електроенергію, оскільки розвиток розподіленої генерації сприяє зниженню ризиків дефіциту потужності і підвищенню енергетичній безпеці;

– цінова привабливість вироблюваної енергії, підвищення вимог до якості і надійності електропостачання;

– підвищення адаптаційних можливостей самих електроенергетичних систем до невизначеності ринкових умов розвитку

економіки і зниження, тим самим, інвестиційних ризиків;

– підвищення вимог до ефективності використання газу в енергетиці;

– посилення екологічних вимог до суб'єктів господарської діяльності, забруднюючих довкілля, що стимулює використання поновлюваних джерел енергії (гідроенергії, енергії вітру, біомаси та ін.).

За даними міжнародного агентства по відновлюваним джерелам енергії, вартість технологій на поновлюваних ресурсах швидко знижується. Так, вартість сонячних панелей за останні п'ять років зменшилася більш ніж в чотири рази. Вартість будівництва сонячних електростанцій промислового типу скоротилася на 29...65 % залежно від регіону, а собівартість виробництва електроенергії знизилася удвічі. Найбільш конкурентоздатні сонячні електростанції без якої-небудь фінансової підтримки мають собівартість виробництва електроенергії, рівну 8 центам за кВт·год. Собівартість виробництва електроенергії на найбільш ефективних вітрових електростанціях складає 5 центів за кВт·год. В той же час собівартість електроенергії, що отримується на традиційних великих електростанціях, працюючих на викопному паливі, знаходиться в межах 4,5...14 центів за кВт·год. У перспективі тенденція зниження вартості нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії, а також вироблюваної ними енергії тільки посилюватиметься, поступово наближаючись до рівня традиційних енергоджерел.

Розподілена генерація енергії доповнює централізовану систему новими елементами з новими динамічними характеристиками і можливостями управління. Це має як позитивні сторони, так і обумовлює немало проблем, які успішно вирішуються з розвитком техніки систем автоматики і регулювання. Змінний (стохастичний) режим роботи ДРГ на базі відновлювальних джерел електричної енергії (ВДЕ) вимагає до 50% резервування потужності. Окрім іншого, загальним «вузьким місцем» технологій

розподіленої генерації енергії часто виступають вимоги з погодженням роботи ВДЕ і централізованої мережі, а також принципи взаємин між незалежним виробником і оператором мережі.

Світові тенденції розвитку енергетики демонструють пріоритетну реалізацію нових можливостей на основі впровадження технологій інтелектуальних електроенергетичних систем (Smart Grid) при виробництві енергії на основі використання ВДЕ. У зв'язку з широким поширенням джерел розподіленої генерації і їх інтеграцією в централізовану систему електропостачання виникло поняття віртуальної електростанції (Virtual Power Plant). Концепція віртуальної електростанції припускає об'єднання групи установок розподіленої генерації енергії за допомогою загальної системи управління їх режимами. Необхідність в такому об'єднанні виникає у зв'язку з проблемами диспетчерського управління через «невидимість» для диспетчера ДРГ, необхідністю підвищення ефективності енергопостачання, врахування накопичувачів енергії для компенсації нерівномірності режимів роботи розподілених поновлюваних джерел енергії, а також активних споживачів, що мають можливості управління власним енергоспоживанням [8]. Зазвичай віртуальні електростанції приєднуються до мережі середньої або низької напруги.

Елементи віртуальної електростанції можуть розташовуватися на значних відстанях один від одного. Мережі, що зв'язують їх (електричні і комунікаційні) об'єднують під терміном інтелектуальна «мікромережа» (Microgrid). Характерною особливістю мікромереж є можливість їх роботи в автономному режимі. Управління віртуальними електростанціями здійснюється дистанційно через систему, що управляє, яка приймає інформацію про поточний стан кожної енергоустановки і передає на них керівні сигнали.

Віртуальна електростанція фактично інтегрує в собі технічні і технологічні рішення

по управлінню попитом і пропозицією розподіленою генерацією енергії за допомогою програмно-апаратного комплексу, який функціонально також включає управління інтелектуальною мережею, засобами релейного захисту і автоматики, поточкорозподілом в мережі, якістю електроенергії, гнучким ціноутворенням і тому подібне. Вона забезпечує ефективне управління попитом на електроенергію і дозволяє адекватно поєднувати і оптимізувати графіки навантажень споживачів. Таке об'єднання генеруючих потужностей і споживачів сприяє згладжуванню пікових навантажень і зниженню ціни на електроенергію.

Вітроенергетичі електростанції (ВЕС) нині класифікуються по різних параметрах, одним з яких являється можливість паралельної роботи з електроенергетичною системою (ЕЕС). Світовий досвід показав, що при паралельній роботі ВЕС і ЕЕС необхідно приділяти увагу наступним питанням :

- підтримка якості електричної енергії;
- зниження втрат в мережах з ВЕС;
- вирішення питання компенсації реактивної потужності, якщо до складу ВЕС входять асинхронні генератори;
- усунення гармонік, генерованих інверторами, якщо ВЕС має перетворювачі частоти (ПЧ);
- усунення радіоперешкод;
- наявність інтелектуальної системи управління.
- захист ВЕС від нештатних ситуацій (коротке замикання, відключення ПЧ і так далі).

В європейських енергосистемах (UCTE, Nordel, UK, Ireland) існують окремі технічні вимоги по підключенню ВЕС в мережу. Єдиних вимог за оцінкою можливості паралельної роботи ВЕС і ЕЕС не вироблено, але при цьому в кожному документі є низка загальних вимог:

- підтримка частоти (активна потужність);
- підтримка напруги (реактивна потужність);

- показники якості електричної енергії;
- захист і автоматика ВЕС.

На сьогоднішній день в Україні також існують нормативні документи, які регламентують вимоги щодо приєднання сонячних та вітрових електростанцій до промислових електричних мереж. Вимоги [9] визначають основні вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій (тобто до електростанцій, які використовують статичні електронні перетворювачі енергії) потужністю від 150 кВт щодо приєднання до електричних мереж загального призначення. Приєднання до електричних мереж інших видів відновлювальних джерел, які використовують синхронні генератори, що безпосередньо приєднуються до електричних мереж регламентується іншими чинними в Україні нормативними документами.

Вимоги розподіляються відповідно до загальної номінальної потужності в точці приєднання:

- Вітрові та фотоелектричні електростанції потужності від 150 кВт до 2 МВт – електростанції малої потужності, які можуть впливати на режими роботи локальних вузлів розподільчих мереж середньої напруги;

- Вітрові та фотоелектричні електростанції потужності від 2 МВт до 25 МВт – електростанції середньої потужності, які можуть впливати на режими роботи місцевих (локальних) електричних мереж середньої та високої напруги.

- Вітрові та фотоелектричні електростанції потужністю більше 25 МВт – електростанції значної потужності, які можуть впливати на режими роботи місцевих (локальних) електричних мереж, магістральних електричних мереж, а також помітно впливати на баланси потужності енергосистем.

Вітрова та фотоелектрична електростанція повинна витримувати відхилення частоти і напруги в точці приєднання при робочих та аварійних умовах експлуатації.

При цьому потужність генерації електростанції повинна зменшуватися на мінімально можливу величину.

Цей документ [9] встановлює вимоги до:

- допустимих діапазонів зміни частоти і напруги;
- якості електроенергії;
- управління та моніторингу;
- захисту;
- обміну даними та сигналами;
- до документації;
- до схем приєднань.

Вказується, що приєднання вітрових електростанцій потужністю до 70 МВт регламентується ГКД [10], а приєднання вітрових електростанцій потужністю більше 70 МВт повинне здійснюватись на підставі техніко-економічних розрахунків з урахуванням режимів роботи електричних мереж. Приєднання ж сонячних електростанцій здійснюється на основі чинних нормативних документів щодо приєднання електростанцій до електричних мереж загального призначення.

Вимоги [10] стосуються наступних аспектів:

- роботи вітрових електростанцій в енергосистемі;
- під'єднання об'єктів вітроенергетики до електричних мереж;
- до релейного захисту та автоматики;
- до засобів зв'язку та обсягів телеінформації.

Таким чином, для запобігання і ліквідації технологічних порушень усі ДРГ, незалежно від ринку збуту електроенергії повинні відпрацьовувати порушення нормального режиму (зниження або підвищення частоти, напруга, асинхронний хід, перевантаження перерізів, ліній електропередач і устаткування) та повинні забезпечувати необхідну якість генерованої енергії. Для виконання цієї умови, в ідеалі, вітрові електростанції повинні підключатися до жорстких енергосистем, щоб виключити їх згубний вплив на стабільність і якість

електроенергії. Проте така практика мало поширена. Спостерігається швидше зворотна ситуація, коли вітрові електростанції, як правило, підключені до мережі на її віддалених ділянках на рівні розподільних ліній або ліній, що з'єднують магістральні і розподільні лінії. У таких місцях енергетична інфраструктура спочатку не була розрахована на передачу електроенергії від споживачів назад в мережу. Зокрема, при слабкій енергомережі в ній можуть виникати неприпустимі градієнти напруги. Необхідно зазначити, що така практика має місце і при підключенні ДРГ і до шин тягових підстанцій.

### Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження якості електричної енергії виконувались згідно розробленої на кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» методики з використанням розробленого програмно-апаратного комплексу [11] представлені на рис. 1–6, табл. 1–3.

Зміна рівня напруги в часі на шинах 35 кВ дано на рис. 1, відхилення напруги – на рис. 2, спотворення напруги – рис. 3, коефіцієнту несинусоїдальності напруги – рис. 4, рівня струму в фазах а, b, с – рис. 5, коефіцієнту несинусоїдальності струму – рис. 6, статистичні характеристики напруги в фазах а, b, с представлені в табл. 1, числові характеристики відхилення та несиметрії напруги – табл. 2, числові характеристики коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги – табл. 3.

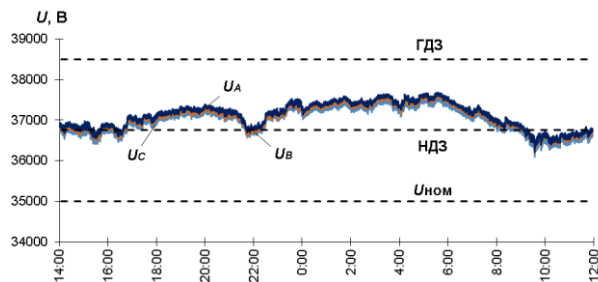


Рис. 1. Напряга на шинах 35 кВ

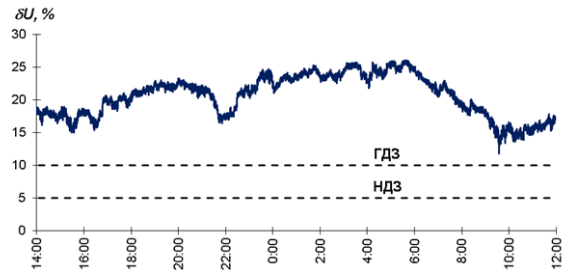


Рис. 2. Відхилення напруги

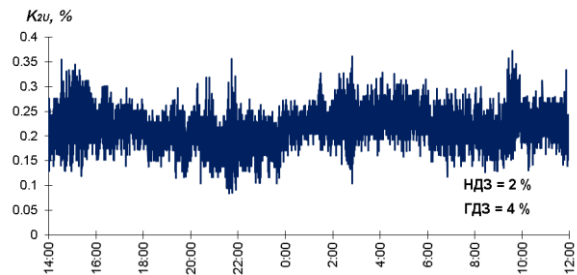


Рис. 3. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю

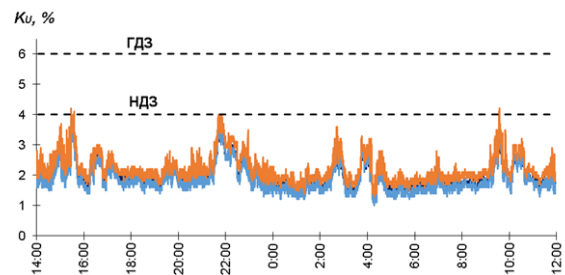


Рис. 4. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги

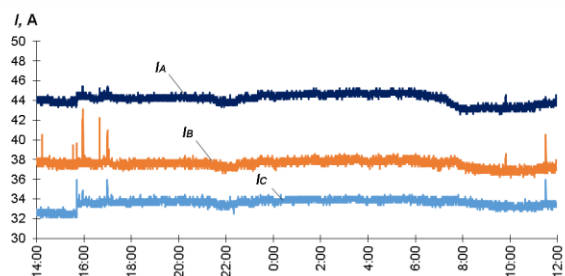


Рис. 5. Струм на шинах 35 кВ

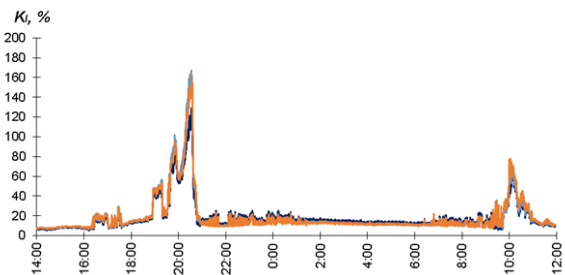


Рис. 6. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму

Таблиця 1

**Числові характеристики напруги**

Показник	Фаза А	Фаза В	Фаза С
M(Ku)	36992.21	37069.15	37121.88
Mo(Ku)	37155.10	37207.98	36890.98
Me(Ku)	37061.57	37121.37	37178.48
D(Ku)	97618.42	96515.67	98888.24
s(Ku)	312.44	310.67	314.47
As(Ku)	-0.32	-0.23	-0.27
Ex(Ku)	-1.01	-1.06	-1.03
min(Ku)	36098.54	36206.01	36209.47
max(Ku)	37535.28	37615.94	37679.08
Ku(0.95)	37432.17	37524.35	37576.20

Таблиця 2

**Числові характеристики відхилення та несиметрії напруги**

Показник	$\delta U$	$K_{2U}$
M	20.61	0.22
Mo	23.57	0.23
Me	21.20	0.22
D	9.76	0.00096
s	3.12	0.0309
As	-0.27	-0.06
Ex	-1.04	0.75
min	11.80	0.08
max	26.01	0.37
U(0.95)	25.07	0.27

Таблиця 3

**Числові характеристики коефіцієнта несинусоїдальності кривої напруги**

Показник	Фаза А	Фаза В	Фаза С
M(Ku)	1.88	2.20	1.97
Mo(Ku)	1.70	2.00	1.80
Me(Ku)	1.80	2.10	1.90
D(Ku)	0.19	0.20	0.16
s(Ku)	0.44	0.45	0.39
As(Ku)	1.34	1.34	1.37
Ex(Ku)	1.63	1.63	1.82
min(Ku)	1.00	1.30	1.20
max(Ku)	3.80	4.20	3.70
Ku(0.95)	2.70	3.04	2.71

**Висновки**

З аналізу отриманих результатів експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

– рівень напруги на шинах 35 кВ завищений, при цьому відхилення напруги значно перевищують гранично допустимі значення, що можна пояснити відсутністю «ефекту жорстких шин», оскільки встановлені потужності шин тягової підстанції та вітроелектростанції мають співставні значення;

– струми мають значну пофазну несиметрію, що вимагає проведення додаткових досліджень для визначення факторів її спричинення. При цьому, в перехідних режимах ввімкнення-вимкнення в роботу ВЕС коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму «зашкалює», що ставить питання про необхідність розробки захисних засобів для його демпфування;

– коефіцієнти несиметрії та спотворення синусоїдальності кривої напруги відповідають встановленим нормам, що характерно, загалом, для підстанцій постійного струму;

– окремого дослідження також потребує вплив режимів роботи ВЕС на процеси рекуперації електричної енергії в тяговій мережі, оскільки співпадіння максимумів генерації може призвести до перенапруг у тяговій мережі та шинах тягової підстанції.

**Бібліографічний список**

1. Hansen, C. J. An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies / C. J. Hansen, J. Bower. – Oxford: Institute for Energy Studies & Dept. of Geography, Oxford University, 2004. – 59 p.
2. Bauen, A. Decentralised generation – technologies and market perspectives / A. Bauen, A. Hawkes. – Paris: IEA, 2004. – 18 p.
3. Decentralised generation technologies: potentials, success factors and impacts in the liberalized EU energy markets. Final report: DECENT. – 2002. – 234 p.

4. World survey of decentralized energy 2005 / WADE. – Edinburgh. – 2004. – 45 p. – Режим доступу: [http://www.localpower.org/documents\\_pub/report\\_worldsurvey05.pdf](http://www.localpower.org/documents_pub/report_worldsurvey05.pdf).
5. Отчет о глобальном состоянии возобновляемой энергетики (GSR), Всемирная сеть по энергетической политике 21 века (REN21), 2016. – Режим доступу: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21\\_GSR2016\\_KeyFindings\\_RUSSIAN.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_KeyFindings_RUSSIAN.pdf)
6. Global trends in clean energy investment. Report Bloomberg New Energy Finance (BNEF), 2017: Frankfurt School-UNEP Centre. – BNEF. – 2017. – Режим доступу: <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/globaltrendsrenewableenergyinvestment2017.pdf>
7. Стенников, В. А. Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива, а интеграция / В. А. Стенников, Н. И. Воропай. – ИСЭМ СО РАН. – Режим доступу: [http://energystrategy.ru/projects/Energy\\_21/4-2.pdf](http://energystrategy.ru/projects/Energy_21/4-2.pdf)
8. Денисюк, С. П. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу та особливості побудови віртуальних електростанцій / С. П. Денисюк, Т. М. Базюк // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 4. – С. 23–29.
9. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/Wind\\_and\\_Solar\\_PV\\_Tech\\_Req\\_Final\\_Version\\_Ukrainian.pdf](http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/Wind_and_Solar_PV_Tech_Req_Final_Version_Ukrainian.pdf)
10. ГКД 341.003.001.001.-2000. Приєднання об'єктів вітроенергетики до електричних мереж. Порядок та вимоги. – Київ: 2001. – 21 с.
11. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму. / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий. – Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна, Вип. 29 – 2009, – С. 82–86.

**Ключові слова:** якість електроенергії, тягова підстанція, вітроелектростанція, рівень напруги, статистичні характеристики.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, тяговая подстанция, ветроэлектростанция, уровень напряжения, статистические характеристики.

**Keywords:** power quality, traction substation, wind power plant, voltage level, statistical characteristics.

**Рецензенти:**

д.т.н., проф. А. М. Муха,  
д.т.н., проф. Ю. Л. Саєнко.

Надійшла до редколегії 01.11.2017.

Прийнята до друку 09.11.2017.