

ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МІКРОМЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Досліджено якість електричної енергії (ЯЕ) в мікромережах з гібридними фотоелектричними станціями (ФЕС), стосовно відповідності чинним нормативним документам та визначення рекомендацій щодо їх удосконалення для врахування особливостей роботи ФЕС.

Розроблено інформаційно-вимірювальну установку (ІВУ) на базі діючої гібридної ФЕС, яка дала змогу за допомогою сучасних вимірювальних приладів від компаній Metrel та Seaward отримати дані про параметри мережі з високою точністю. Вимірювання, проведені в реальних умовах, дозволили виявити характерні особливості формування напруги на виході інверторів, що працюють у різних режимах, а також виявити основні проблеми з ЯЕ у разі автономної роботи гібридних ФЕС.

Під час проведення експерименту досліджено основні (згідно з пунктами 11.4.7—11.4.12 [1]) показники якості електричної енергії (ПЯЕ) в мікромережах з гібридними ФЕС за різних умов роботи. Зокрема зміну показників якості в різних режимах роботи інвертора (у разі автономної та синхронної робіт) під час неробочого ходу та за різного за типом та потужністю підключеного навантаження. Додатково перевірено якість напруги від інверторів різної топології та вартості.

За результатами дослідження отримано графічні залежності роботи DC/AC інверторів в синхронному та автономному режимі роботи з Об'єднаною енергетичною системою України (ОЕС-У). Визначено ступені погіршення ЯЕ, які проявлялися у гармонічних спотвореннях, відхиленнях частоти та збільшенні рівня флікера. Виявлено обмеження чинних нормативних документів зокрема стандартів та методик в частині роботи гібридних інверторів у автономному режимі та використання обладнання з безтрансформаторною топологією і модифікованою синусоїдою. Експериментально визначено допустимі рівні реактивно-активного навантаження, перевищення якого може спричиняти збільшення похибки вимірювальних приладів. Окрім приладів обліку, гармонічні спотворення напруги безпосередньо впливають на втрати енергії під час транспортування електроенергії, роботу електроустановок та рівень деградації ізоляції електромережі.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, якість електричної енергії, фотоелектричні станції, гібридні інвертори, автономний режим роботи, вплив реактивного навантаження.

Вступ

Як відомо, через низку екологічних та політичних причин розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є надзвичайно важливим [2]. Зокрема у зв'язку з воєнними діями в Україні, що призвели до руйнувань частини її енергетичної системи, збільшення частки ВДЕ набуло стратегічного значення [3]—[4]. Так, наразі активно розвиваються ФЕС, які мають безліч переваг, проте стрімке зростання їхньої кількості може негативно вплинути на якість електричної енергії (ЯЕ) в мережі. Це питання активно вивчається, як з погляду стандартизації для встановлення вимог до таких мереж так і з погляду зниження негативного впливу. Зокрема у роботі [5] досліджено ЯЕ в мережах середньої напруги з ФЕС. Отримані результати вказують, що ЯЕ зі зростанням генерації буде знижуватись, а гармонічні спотворення — зростати. В свою чергу, інше дослідження ФЕС в мережах середньої напруги [6] та вимірювання, проведені Коріса et al. [7] для малих ФЕС, вказують на протилежне, а саме збільшення коефіцієнта спотворень напруги та істотний вплив на величину напруги в низьковольтній мережі за низької генерації. Аналогічно в [8] показано, що вироблення електроенергії в фотоелектричній установці збільшує спотворення напруги, які виникають в мережі. Такі ж висно-

вки зробили Амірулла Пенангсанг і Соепріанто для промислових і житлових мереж [9].

Важливі висновки отримані також в роботі [10], в рамках якої авторами проведено експериментальне дослідження ЯЕ з мережевою ФЕС номінальною потужністю 8 кВт з метою визначення залежностей коефіцієнта потужності від зміни гармонічних спотворень напруги та струму. При цьому додатково вимірювся гармонічний склад напруг та струмів за різних відсотків завантаження (10 % та 70 %) та різного коефіцієнта потужності (1 та 0,95). Отримані результати вказують на залежність гармонік від типу навантаження, яке детально описане в роботі [11], де здійснювались вимірювання гармонічних спотворень від різних побутових приладів та досліджувалось питання зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) від гармонічних спотворень з подальшим визначенням втрат енергії. Частково досліджувалися ці питання і в роботі [12], в якій визначено залежності ККД автономного інвертора від прикладеного навантаження і рівня ЯЕ, але не розкрито повною мірою проблему погіршення ЯЕ в різних режимах роботи і за змінного характеру навантаження.

Отже зрозумілим є те, що ЯЕ найбільше погіршується у низьковольтних мережах з ФЕС малої потужності. При цьому малодослідженим є питання зміни ЯЕ, зокрема рівня гармонічних спотворень в мікромережах з малими гібридними ФЕС, що можуть переходити в автономний режим роботи, де вони стають чи не єдиним джерелом живлення. А сформована в результаті цього переходу мікромережа містить велику кількість реактивної енергії, яка може суттєво погіршувати криві напруг та струмів. Визначення таких залежностей має насамперед метрологічне спрямування, оскільки розуміння впливів ФЕС на ПЯЕ дасть змогу не лише виявити проблеми, але й розробити ефективні методи усунення їх та удосконалювати чинні стандарти. Для цього потрібно розробити ІВУ, що дозволить визначити реальні кореляції між зовнішніми чинниками, такими як режими роботи, погодні умови, склад навантаження, тощо та рівнем ЯЕ.

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу гібридних ФЕС малої потужності на ЯЕ в мікромережах змінного струму з комплексним навантаженням (яке містить велику частку реактивної енергії) в основних режимах роботи інверторів на базі розробленої інформаційно-вимірювальної установки з діючою гібридною ФЕС та вимірювальними приладами, що мають точність, допустиму для проведення наукових досліджень.

Опис інформаційно-вимірювальної установки

Розроблена з метою вимірювання ЯЕ від гібридних ФЕС в рамках проведення наукових досліджень ІВУ повністю забезпечує отримання достовірних та релевантних даних. Це вдалось досягти завдяки використанню лише сертифікованих та надійних вимірювальних приладів і можливості проведення вимірювань на діючих гібридних ФЕС. Зокрема в цьому дослідженні здійснено вимірювання ФЕС з обладнанням від виробників Victron Energy та Deye, на якому проектується значна частина побутових гібридних мікромереж. При цьому за потреби з легкістю можна провести аналогічні дослідження для ФЕС з обладнанням від інших виробників.

Розроблена інформаційно-вимірювальна установка показана на рис. 1, а ключові технічні характеристики використаного обладнання подані у табл. 1.

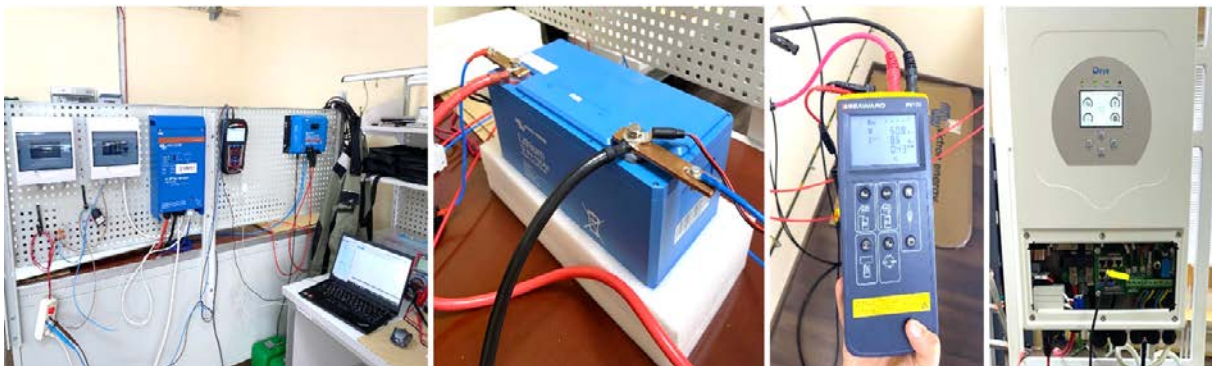


Рис. 1. Вигляд експериментальної установки

Інформаційно-вимірювальну установку побудовано на основі фотоелектричних модулів JA Solar JAM60S10-340 та Ecsolar ECS-100M36. Вихідні клеми фотомодулів під'єднувалися до конт-

ролера заряду Victron Energy BlueSolar MPPT 100/30 або SmartSolar MPPT 150/60, необхідних для отримання максимальної потужності та ефективного контролю заряду акумулятора.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики

Фотоелектричні модулі			Інвертори				
Параметр	JA Solar JAM60S10-340	Ecsolar ECS-100M36	Параметр	MultiPlus 12/1200/50-16	MultiPlus 12/500/20	Foval 2000W	Deye SUN-6k-SG03LP1-EU
Pmax, Вт	340	100	Pnom, Вт	1200	500	2000	6000
U, В	34,73	17,4	f, Гц	50/60			
I _{max} , А	9,79	5,75	U _{int} , В	9,5...17		12	125...500
I _{sc} , А	10,46	6,08	U _{out} , В	220/230			
			ККД, %	95	>90	90	>96

Як основний досліджуваний елемент використано інвертори трансформаторної топології від компанії Victron Energy моделі MultiPlus 12/500/20, MultiPlus 12/1200/50-16 та для порівняння також використано інвертори Foval 2000W і Deye SUN-6k-SG03LP1-EU з безтрансформаторними топологіями та модифікованою і чистою синусоїдами відповідно.

Таблиця 2

Характеристика навантаження

Навантаження	P, Вт	cos(φ)
Активне навантаження		
лампи розжарювання	2×100, 145, 500	1
тепловентилятор/нагрівач	928	0,99
Комплексне навантаження з великим вмістом реактивної енергії		
світлодіодні світильники	40, 45	0,53
імпульсний блок живлення	10	0,32
зарядний пристрій	55	0,32
частотний перетворювач з асинхронним двигуном	190	0,51
мікрохвильова піч	1100	0,92

Зберігання енергії реалізовано за допомогою акумуляторних батарей Victron Energy Lithium Battery Smart LiFePO4 12,8V,100Ah та Lithium Battery Smart LiFePO4 12,8V,60Ah з датчиками контролю стану акумуляторів, які забезпечують кращу роботу та більший термін служби. Контроль заряду акумулятора забезпечувався контролером Victron Energy VE.Bus.BMS V2, що має інформаційний зв'язок із інвертором та акумулятором.

Як навантаження використано різні побутові прилади, в яких спершу виміряно фактичну споживану потужність та cos(φ) (табл. 2).

Щодо під'єднання до ОЕС-У то воно здійснювалося в частині загальноуніверситетської електромережі з номінальними характеристиками 220 В, 50 Гц. Загальні принципові схеми варіантів інформаційно-вимірювальних установок з вказанням місць

приєднання вимірювальних приладів показано на рис. 2.

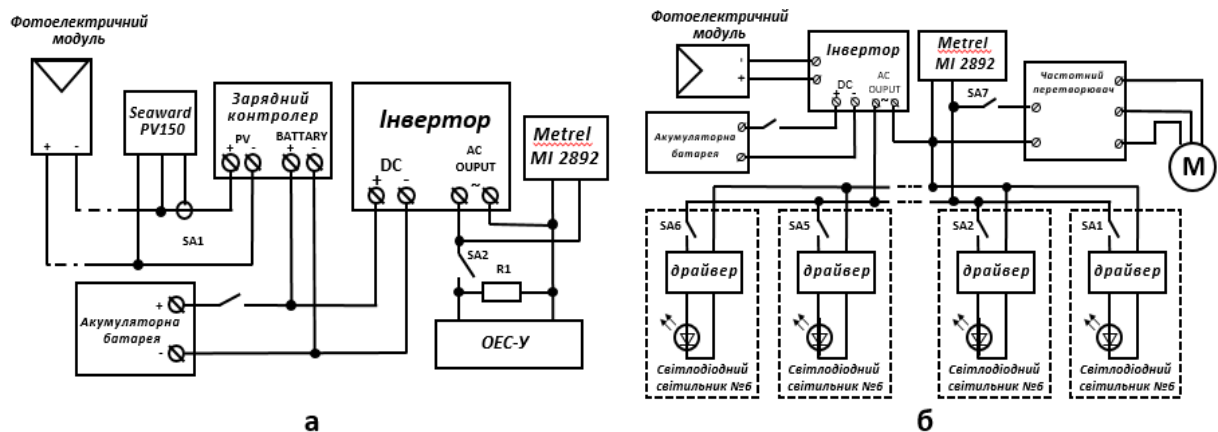


Рис. 2. Принципова схема вимірювання ПЯЕ: а — в різних режимах роботи гібридних ФЕС; б — у разі зміни підключеного навантаження

Вимірювання продуктивності досліджуваних фотоелектричних установок здійснювались за допомогою тестера сонячних установок Seaward PV150 з такими ключовими метрологічними характеристиками: точність вимірювання напруги неробочого ходу $\pm 0,5\%$, струму короткого замикання $\pm 1\%$, робочого струму та потужності $\pm 5\%$. Цей прилад також дозволяє виконувати всі експлуатаційні випробування, зазначені в міжнародному стандарті IEC 62446-2:2020 [13].

Важливим вимірювальним приладом в установці є аналізатор ЯЕ METREL MI 2892 Master, який призначений для визначення ЯЕ загальних мереж та згідно з ДСТУ EN 6100-4-30-2022 [14] відповідає класу S. Зазначимо, що вимірювальні прилади класу S можуть використовуватись для проведення досліджень і визначення параметрів мережі на промислових об'єктах та в побутових мережах. METREL MI 2892 Master дозволяє визначати всі параметри якості згідно з ДСТУ EN 50160-2023 [15] IEEE 519-2022 [16], IEEE 1459-2010 [17], а також вимірювати додаткові параметри. В процесі дослідження на експериментальній установці здійснювались вимірювання основних ПЯЕ, оскільки потреби у фіксації випадкових подій з напругою наразі відсутні та не входять у межі, описані цим дослідженням.

Як результат можна вважати, що запропонована інформаційно-вимірювальна установка дозволяє проводити дослідження ФЕС, пов'язані з визначенням ЯЕ за різного за типом та потужністю навантаження. Для цього з легкістю можна здійснювати заміну окремих досліджуваних елементів схеми. А отримані результати забезпечуватимуть вимоги ключових стандартів, щодо проведення вимірювань [13], [15].

Результати дослідження

Дослідження розпочато з порівняння впливу різних топологій інверторів на ЯЕ. Це важливий етап, оскільки для формування коректних висновків щодо впливу підключеного навантаження необхідно спершу знати, який вплив мають ключові елементи гібридних ФЕС — інвертори. Відповідно розглянуто три популярні топології інверторів: трансформаторну, безтрансформаторну з модифікованою та чистою синусоїдою. Принципова різниця між цими топологіями полягає у тому, що в безтрансформаторних схемах перетворення постійного струму здійснюється без додаткового підвищення або пониження напруги за допомогою трансформатора, який забезпечує гальванічну розв'язку. Таким чином інвертори з трансформаторною топологією, які мають гальванічну розв'язку вважаються надійнішими та виконують вимоги стандартів ДСТУ EN 62109-1:2014 [18] та ДСТУ EN 62109-2:2014 [19], якими передбачено наявність розв'язки.

Самі вимірювання проводились в трьох режимах роботи, під час яких обладнання працювало без навантаження, з активним та комплексним навантаженнями. Отримані результати показано на рис. 3.

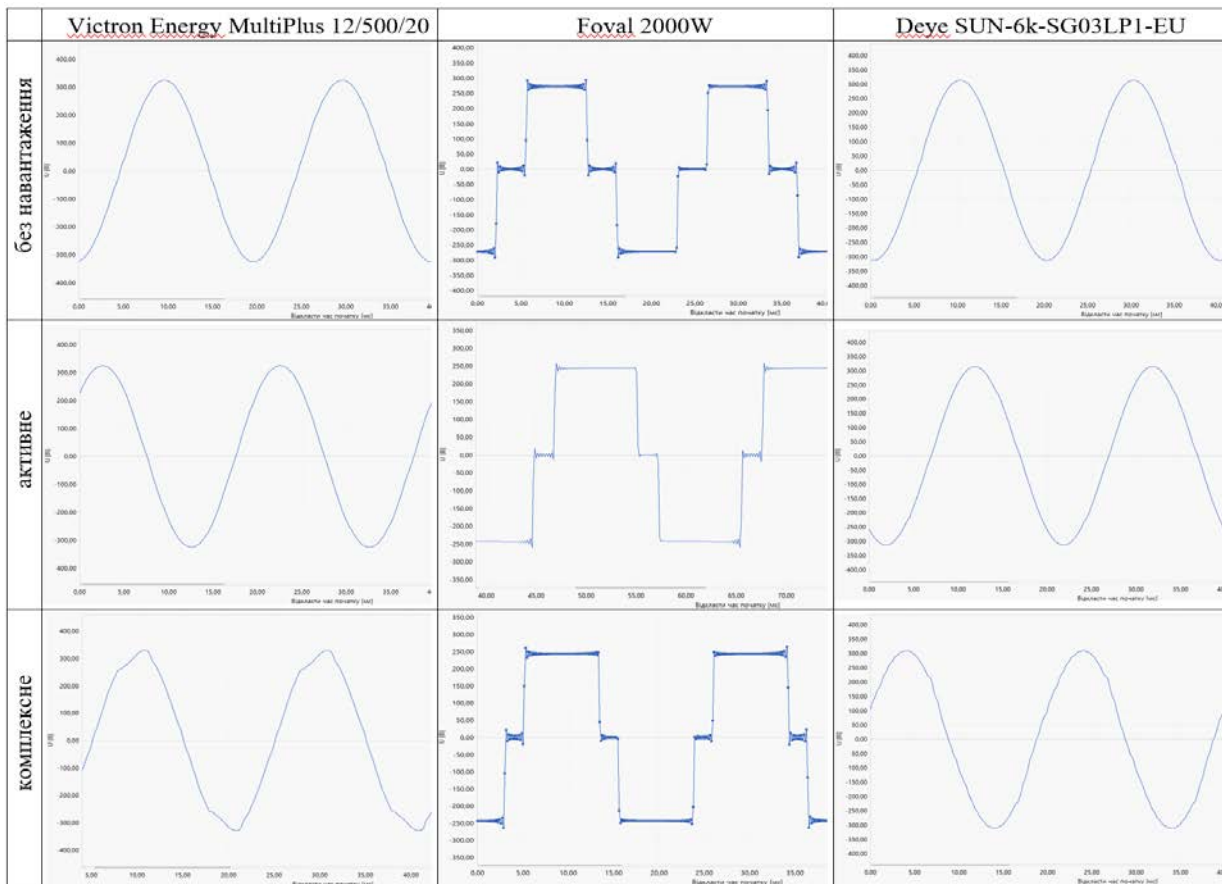


Рис. 3. Осцилограми форм кривих напруги

Осцилограми вихідних напруг, показаних на рис. 3 для режиму неробочого ходу демонструють, що інвертори від компаній Victron Energy та Deye забезпечують формування чистої синусоїди, яка у разі введення активного навантаження не змінюється. Проте у разі комплексного навантаження з $\cos(\phi)$ в діапазоні 0,5...0,9 вказані криві напруг починають спотворюватись, при чому з інвертором з трансформаторною топологією зафіксовано більше спотворення, що відображається у вигляді нелінійних викривленнях форми кривої, наявності зазублин та асиметрії верхньої і нижньої півхвиль.

Також результати вимірювань роботи безтрансформаторного інвертора Foval 2000W свідчать, що на вихідних клеммах за всіх досліджених режимів роботи формується модифікована синусоїда напруги з наявністю чітких ділянок з мікрошумовими спотвореннями. Додатково у кривій вихідної напруги спостерігається асиметрія по відношенню до півхвиль, а рівень навантаження та тип суттєво не впливає на форму кривої напруги. При цьому частота у неробочому режимі становила 47,981 Гц і залишалась такою після ввімкнення навантаження, що свідчить про постійне та суттєве відхилення від вимог чинного стандарту. Зазначимо, що згідно з ДСТУ EN 50160-2023 допустимі межі для частоти під час автономної роботи протягом 95 % часу за тиждень не повинні перевищувати $\pm 2 \%$, тобто бути в діапазоні від 49 Гц до 51 Гц. Щодо гармонічних спотворень, то інвертор Foval 2000W видає в мережу електроенергію з сумарним коефіцієнтом гармонічних спотворень (СКГС) 29,869, який перевищує визначені стандартами критично допустимі межі у понад 3,7 рази.

На основі отриманих даних підсумовуємо, що використання інверторів з безтрансформаторною топологією, які генерують модифіковану синусоїду, може призвести до аварійних ситуацій в мікромережах та, як наслідок, спричинити швидкий вихід з ладу приймачів електроенергії. Тому їхнє використання є обмеженим та допустиме лише для живлення нечутливого електрообладнання. Натомість результати вимірювань інверторів двох топологій від виробників Victron Energy та Deye, які формують чисту синусоїду свідчать, що мікромережі з такими пристроями є стійкими, а самі інвертори забезпечують формування якісної синусоїди за стандартних умов. Щодо стійкості інверторів до різних типів навантаження, то вони корелюють з результатами досліджень в роботах [10]—[11], зокрема можна сказати, що активне навантаження в мікросистемах з гібридними ФЕС практично не впливає на ЯЕ, водночас вплив комплексного навантаження є різним залежно від характеру навантаження (ємнісне чи індуктивне) та має схожий за рівнем вплив на інвертори різних топологій.

В подальшому для кращого розуміння зміни ЯЕ проведено метрологічні дослідження, що склались з двох частин з визначенням ЯЕ під час зміни режимів роботи гібридних інверторів в складі ФЕС та визначенням критично допустимих меж вмісту комплексного навантаження з великою часткою реактиву. Ці дослідження, враховуючи складності підбору необхідного навантаження великої потужності, проведено на інверторах від компанії Victron Energy з невеликою номінальною потужністю.

Відповідно спершу проведено вимірювання роботи інвертора в мережевому режимі, для реалізації чого інвертор підключався до ОЕС-У через перемикач. Після чого виміряно такі параметри електричної мережі: значення напруги, частоти, гармонічних спотворень та флікера. Вимірювання показників відбувались у змішаному форматі прийому-передачі електроенергії в мережу, що фактично є реальним відображенням роботи гібридної ФЕС.

У подальшому інвертор переведено в автономний режим за допомогою вимикача, яким від'єднали його від мережі. В цьому режимі джерелами енергії були фотоелектричні модулі та акумуляторна батарея. Показники вимірювались аналогічно тому, як це відбувалось у мережевому режимі. Додатково зосередились на визначенні коефіцієнта потужності, перепадах напруги та гармонічних спотвореннях, які могли виникати під час переведення інвертора в інший режим.

Для другої частини дослідження налагоджено запис необхідних параметрів на вимірювальних приладах, після чого проводилась послідовна зміна величини та типу навантаження, з переходом від активного навантаження до комплексного. Отримані в результаті експериментального дослідження дані опрацьовано у програмі Metrel PowerView та виконано порівняльний аналіз.

Аналіз першої частини дослідження показав, що частота напруги та рівень флікера під час зміни режимів роботи були в допустимих межах, визначених стандартом. При цьому напруга на виходах інвертора коливалась в межах 1...2 %, а саме під час мережевого режиму рівень напруги становив 220 В, а в автономному режимі роботи середньоквадратичне значення напруги під час вимірювань становило 230 В. Це зумовлено тим, що під час проведення вимірювань попри інтеграцію України в європейський енергетичний простір та поступове прийняття стандартів Європейського Союзу (ЄС), номінальна напруга в побутових електромережах України була на рівні 220 В, тоді як у більшості країн ЄС вона становить 230 В. У зв'язку з цим інвертор в автономному режи-

мі формує вихідну напругу 230 В відповідно до європейських технічних норм.

За таких умов роботи виникає ситуація, що в момент переходу інвертора з одного режиму роботи в інший буде спостерігатись стрибок напруги, який може становити понад 4 %. Враховуючи умови, коли ОЕС-У працювала в режимі постійних відключень, що могли становити до 6 разів на добу, стрибки напруги в мережах з гібридними ФЕС відбувались 12 разів (під час увімкнення та вимкнення). Як наслідок, можна припустити, що довготривала робота в такому режимі негативно впливатиме на справність підключеного обладнання та електричні мережі (працездатність обладнання, деградацію ізоляції електромережі тощо). Проте варто зазначити, що цю проблему вже вирішено, оскільки Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг ухвалила постанову про перехід на номінальну напругу 230/400 В з 01.07.2025 року [20].

Результати першої частини дослідження містили також гармонічні складові вихідної напруги, які показані на рис. 4.

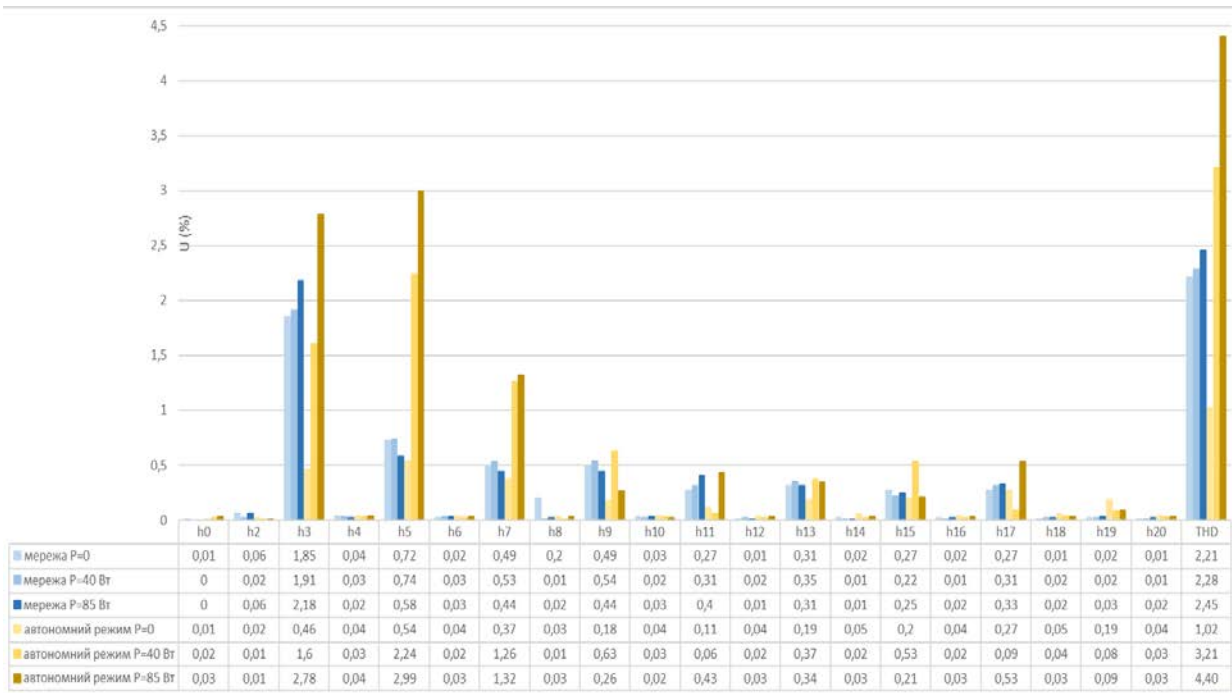


Рис. 4. Гармонічний склад напруг в двох режимах роботи за різного навантаження

Отримані гармонічні складові напруг під час роботи без внутрішнього навантаження вказують, що в основному спотворення, зумовлені 3, 5, 7 та 9 гармоніками. Проте, порівнюючи їх між режимами роботи, можна стверджувати, що в автономному режимі найбільше зростання спостерігається для 5-ї гармоніки, а в синхронному — для 3-ї. Припускаємо, що це більшою мірою залежить від особливостей інверторів та ділянки підключення до загальної мережі.

Розглядаючи цей розподіл у динаміці зростання навантаження підсумовуємо, що загальний розподіл впливу окремих гармонік на мережу не змінюється, але їхній рівень зростає. Зокрема, у разі синхронної схеми роботи інвертора з ОЕС-У СКГС збільшується на 11 % від початкового значення з навантаженням інвертора на 7 %. А в автономному режимі роботи без навантаження СКГС нижчий ніж під час синхронного режиму, проте зі збільшенням навантаження гармонічні спотворення зростають у 3 рази, що показано на рис. 4. Такі результати вказують на наявність суттєвого впливу і потребують детальнішого аналізу.

Для цього проведено дослідження, яке дало змогу розширити межі вимірювань, а саме визначити вплив комплексного навантаження з великим вмістом реактиву ($\cos(\phi) < 0,6$) на ЯЕ в умовах автономного режиму роботи гібридної ФЕС у мікромережах та здійснити фіксацію критично допустимих значень. Отримані в результаті вимірювань дані відображено у вигляді осцилограм форми кривої напруги за різних відсотків завантаження інвертора та у формі графіка залежності рівня гармонічних спотворень від завантаженості інвертора. Осцилограми показані на рис. 5.

На рис. 5 спостерігається зміна форми кривої напруги, що додатково свідчить про залежність від величини комплексного навантаження з великою часткою реактиву.

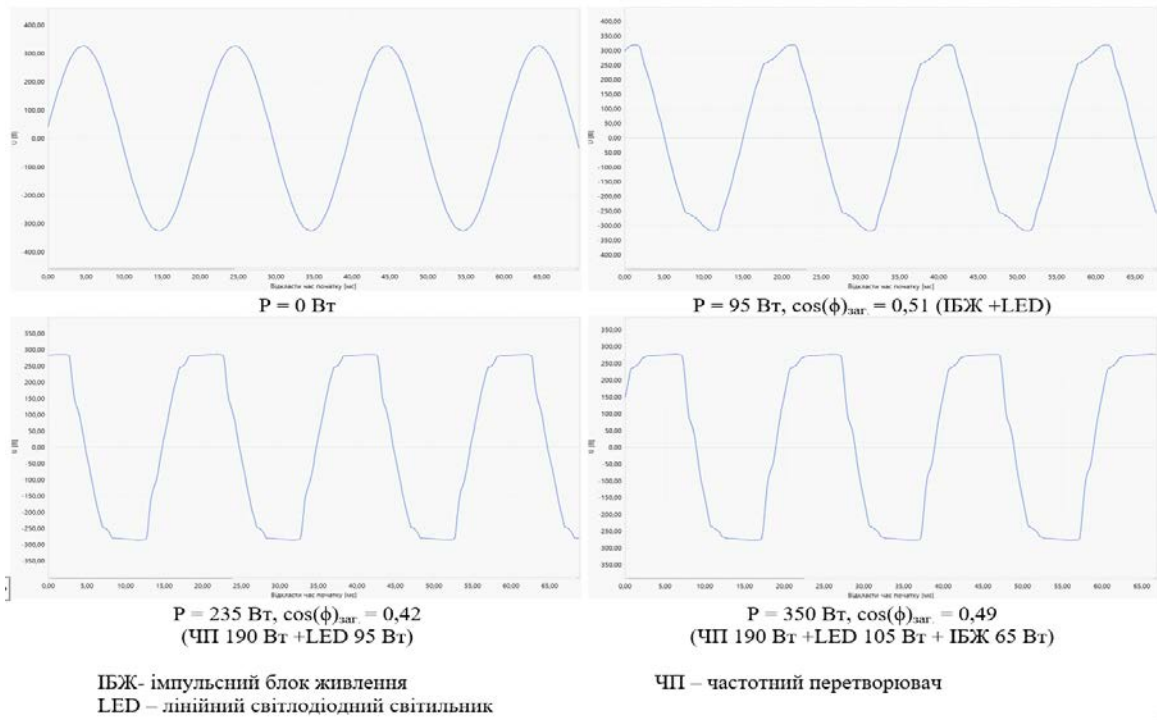


Рис. 5. Криві вихідної напруги гібридної ФЕС у автономному режимі роботи

Відповідно у режимі неробочого ходу інвертор видає в мікромережу напругу з практично ідеальною формою кривої. Натомість зі збільшенням навантаження з великою реактивною складовою спершу частково змінюється форма у ділянках амплітудних значень. А за значного навантаження відбувається фактично відсікання верхніх та нижніх амплітудних значень. Такі явища безпосередньо вказують на вплив вищих гармонік, які в подальшому проаналізовано. Для цього побудовано графік залежності рівня СКГС від завантаженості інвертора, показаний на рис. 6.

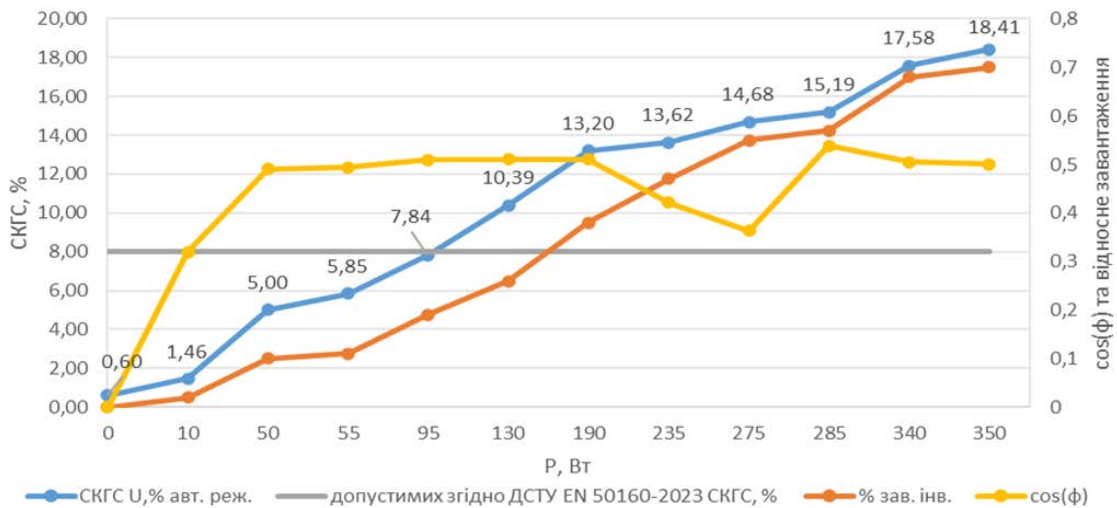


Рис. 6. Графік зміни СКГС вихідної напруги гібридних ФЕС від навантаження

Отримана залежність сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень напруги від навантаження з великою часткою реактиву вказує на високий ступінь кореляції цих параметрів. Загалом за низького навантаження, яке може становити до 20 % СКГС знаходиться в допустимих межах згідно з ДСТУ EN 50160-2023 межах. Але спостерігаються більші темпи зростання, порівняно з показниками у разі більшого завантаження інвертора. В межах 20...50 % навантаження швидкість зростання СКГС дещо зменшується, але загальна динаміка не змінюється. Відповідно в цьому діапазоні зростання становило понад 6 %. У проміжку від 50 % завантаження темп зростання гармонічних спотворень суттєво знижується, а на відмітці у 70 % СКГС становить 18,41 %. Варто зазначити, що розподіл та динаміка зміни окремих гармонічних спотворень не змінюється. Зокрема

найбільшого впливу завдають 3, 5, 7, 9 гармоніки, які одразу кратно збільшуються у разі ввімкнення навантаження з $\cos(\phi) < 0,6$ та пряmlinійно зростають відповідно до прикладеної потужності.

Потенційно така кореляція може бути наслідком таких факторів впливу:

1. Конструктивні особливості інвертора, включно з топологією, якістю використаних елементів та схемами поліпшення (фільтрації) вихідної форми напруги.

2. Характер навантаження, а саме лінійні елементи, такі як лампи розжарювання, ТЕНи мають нижчий рівень гармонічних спотворень, в свою чергу нелінійне навантаження, до складу якого входять імпульсні блоки живлення є причиною спотворення форми напруги в мережі.

3. Вплив температури також може зумовлювати погіршення якості роботи ФЕС, хоча в цьому випадку такий вплив був мінімізований.

Отримані дані вказали на наявні проблеми у мікромережах з використанням гібридних ФЕС як основного джерела живлення, що спричинені впливом нелінійного навантаження. Також важливо розуміти, що коефіцієнт потужності є хорошим індикатором вмісту реактиву, проте він не дозволяє визначити тип реактивного навантаження (ємнісне чи індуктивне), від якого суттєво залежить вплив на ПЯЕ. Як приклад, з рис. 6 випливає, що навіть з нижчим $\cos(\phi)$ на ділянці, де $P \in [235; 275]$ Вт і переважало індуктивне навантаження темп зростання СКГС був нижчий порівняно з ділянками, коли $P \in [50; 190]$ Вт, та переважало ємнісне навантаження, що і відповідає загальноприйнятим твердженням про такі різновиди навантаження.

Сформовані висновки попередньо апробовано на конференціях [21], [22] і в подальшому можуть бути використані для здійснення оптимізації роботи інверторів, особливо під час автономного режиму роботи. Це дозволить загалом підвищити ЯЕ в мікромережах та допоможе в процесі розроблення методик визначення допустимих меж вмісту реактивного та комплексного навантаження у досліджених мікромережах.

Висновки

1. Виявлено обмеження чинних нормативних документів, зокрема стандартів та методик, в частині дозволу використання інверторів з безтрансформаторною топологією в загальних мікромережах змінного струму, які формують модифіковану синусоїду. Створені ними гармонічні спотворення напруги перевищують допустимі межі у понад 3 рази, в результаті чого може суттєво зростати похибка вимірювальних приладів. Варто розглянути можливість обмеження використання такого обладнання або введення обов'язкової перевірки у разі встановлення цього обладнання за допомогою METREL MI 2892 або іншого вимірювального приладу, що дозволяє з високою точністю визначати ПЯЕ.

2. Результати опрацювання експериментальних даних демонструють, що за умов зростання нелінійного навантаження у ізолюваних мережах більше ніж на 20 % відносно номінального значення, СКГС виходить за допустимі межі нормативних значень, які вказані в ДСТУ EN 50160-2023. Таким чином, потрібно враховувати вплив нелінійного навантаження на ПЯЕ в мікромережах з ФЕС малої потужності, особливо в автономному режимі роботи.

3. Зазначено, що обладнання з ідентичним коефіцієнтом потужності, але різним типом реактивного навантаження має різний вплив на рівень гармонічних спотворень. Так, освітлювальні прилади з світлодіодними лампами, в яких переважає здебільшого реактивно-ємнісне навантаження демонструють більший вплив порівняно з частотним перетворювачем з асинхронним двигуном, яким характерне реактивно-індуктивне навантаження.

4. Визначено — суттєвих погіршень ПЯЕ у синхронному з ОЕС-У режимі роботи не спостерігалось, що з великою ймовірністю забезпечено малим внутрішнім опором мережі та наявністю компенсуючого обладнання. Це свідчить, що досліджуване інверторне обладнання для гібридних ФЕС наразі не повною мірою може забезпечити необхідний рівень ЯЕ за умови роботи в автономному режимі та потребує додаткового випробування перед використанням.

5. Отримані залежності вказують на необхідність розроблення нових або оновлення наявних нормативних документів, щодо ПЯЕ в частині роботи гібридних інверторів у автономному режимі. Зазначимо, що на сьогодні кількість інверторів такого типу та частота необхідності зміни режимів роботи у зв'язку з нестабільною ситуацією в ОЕС-У стрімко зросла, що може викликати негативні наслідки для користувачів.

6. Отримані результати дослідження вказують на необхідність розроблення методу ідентифікації типу і характеру електричного навантаження, а також визначення допустимого рівня цього навантаження для мікромереж з гібридними фотоелектричними системами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (14.03.2018), № 310 Кодекс систем розподілу. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#text>.
- [2] Renewable Energy Market Update – Outlook for 2023 and 2024. European Commission. 10.07.2023. [Online]. Available: URL: <https://surl.li/xpjdmk>. Accessed on: March 20, 2025.
- [3] Міністерство економіки України (25.06.2024), № 587-р. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df>.
- [4] Міністерство енергетики України (13.08.2024) № 761-р. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>.
- [5] G. Holdyński, Z. Skibko, A. Firlit, and W. Walendziuk, “Analysis of the Impact of a Photovoltaic Farm on Selected Parameters of Power Quality in a Medium-Voltage Power Grid,” *Energies*, no. 17(3), pp. 623, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17030623>.
- [6] M. J. Ortega, J. C. Hernández, and O. G. García, “Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 96, pp. 23-35, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.11.003>.
- [7] M. Kopicka, M. Ptacek, and P. Toman, “Analysis of the power quality and the impact of photovoltaic power plant operation on low-voltage distribution network,” *2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, Rakvere, Estonia, pp. 99-102, 2014. <https://doi.org/10.1109/PQ.2014.6866792>.
- [8] Abdul Kadir, A. F. T. Khatib, and W. Elmenreich, “Integrating Photovoltaic Systems in Power System: Power Quality Impacts and Optimal Planning Challenges,” *Int. J. Photoenergy*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/321826>.
- [9] O. Amirullah Penangsang, and A. Soeprijanto, “Effect of Installation of Photovoltaic (PV) Generation to Power Quality in Industrial and Residential Customers Distribution Network,” in *Proceedings of the 2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, Surabaya, Indonesia, 20-21 May 2015, pp. 193-200.
- [10] A. Elkholy, “Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems,” *Solar Energy*, vol. 183, pp. 315-326, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.009>.
- [11] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, and N. Khan, “Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1152-1187, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.121>.
- [12] О. Ю. Гаєвський та ін. «Ефективність однофазного інвертора фотоелектричної станції та гармонічні спотворення при різних рівнях навантаження», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, с. 26-34, 2017.
- [13] IEC 62446-2:2020 Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 2: Grid connected systems - Maintenance of PV systems Systems. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/27382>.
- [14] ДСТУ EN 61000-4-30:2022, Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії (ЕН 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106274.
- [15] ДСТУ EN 50160:2023, Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cutt.ly/remoJu9g>.
- [16] IEEE 519-2022 Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/>.
- [17] 1459-2010 — IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5439063>.
- [18] ДСТУ EN 62109-1:2014. Безпечність силових перетворювачів, застосовуваних у фотоелектричних системах. Частина 1. Загальні вимоги. (EN 62109-1:2010, IDT; IEC 62109-1:2010, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77127.
- [19] ДСТУ EN 62109-2:2014 Безпечність силових перетворювачів, застосовуваних у фотоелектричних системах. Частина 2. Спеціальні вимоги до інверторів (EN 62109-2:2011, IDT; IEC 62109-2:2011, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=91605.
- [20] Постанова НКРЕКП «Про затвердження Змін до Кодексу систем розподілу» від 15.04.2025 № 550. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0550874-25#Text>.
- [21] Р. І. Грицак, і А. В. Яворський, «Порівняльний аналіз якості електричної енергії в ізольованих мережах змінного струму із системами резервного живлення на основі ФЕС,» *Інформаційно-вимірювальні технології: тези доповідей II міжнародної науково-практичної конференції*, 13-14. 11.2024.
- [22] Р. І. Грицак, і А. В. Яворський, «Дослідження якості електроенергії при зміні режиму роботи гібридних інверторів в системах резервного живлення на основі ФЕС,» *Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference*, November 14-15, 2024.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 8.04.2025

Грицак Роман Ігорович — аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, e-mail: roman27gri@gmail.com ;

Яворський Андрій Вікторович — канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, e-mail: andrii.yavorskyi@nunge.edu.ua.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

R. I. Hrytsak¹
A. V. Yavorsky¹

Problems of Ensuring the Quality of Electricity in Microgrids Based on Hybrid Power Systems with Photovoltaic Power Systems

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

The quality of electric energy (EE) in microgrids with hybrid photovoltaic (PV) power plants was investigated in terms of compliance with current regulatory documents and the identification of recommendations for their improvement to take into account the peculiarities of the operation of such plants.

Information and measuring unit (IMU) was developed on the basis of the existing hybrid PV power plant, which made it possible to obtain data on grid parameters with high accuracy, using modern measuring devices from Metrel and Seaward companies. The measurements, conducted in real conditions allowed to identify the characteristic features of voltage formation at the output of inverters operating in different modes, as well as to identify the main NPS problems during the autonomous operation of hybrid PV power plants.

During the experiment, main indicators of electric power quality (EPQ) in microgrids with hybrid PV systems under different operating conditions were investigated in accordance with paragraphs 11.4.7—11.4.12 [1]. In particular, the change in quality indicators in different modes of inverter operation (autonomous and synchronous operation) during idle operation and with different types and capacities of connected loads. In addition, the quality of voltage from inverters of different topology and cost was tested.

As a result of the study, graphical dependences of the operation of DC/AC inverters in synchronous and autonomous operation modes with the United Energy System of Ukraine (UES-U) were obtained. The degrees of EE degradation were determined, which manifested themselves in harmonic distortion, frequency deviations, and increase in the flicker level. The limitations of current regulatory documents, in particular, standards and methodologies in terms of the operation of hybrid inverters in autonomous mode and the use of equipment with a transformerless topology and a modified sine wave, are revealed. Experimentally, we determined the permissible levels of reactive-active load, the excess of which can lead to an increase in the error of measuring devices. In addition to metering devices, harmonic voltage distortion directly affects energy losses during electricity transportation, the operation of electrical installations, and the level of insulation degradation in the power grid.

Keywords: renewable energy sources, quality of electricity, photovoltaic power plants, hybrid inverters, autonomous operation, impact of reactive load.

Hrytsak Roman I. — Post-Graduate Student of the Chair of Information and Measuring Technologies, e-mail: roman27gri@gmail.com ;

Yavorsky Andrii V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Information and Measuring Technologies, e-mail: andrii.yavorskyi@nunge.edu.ua