

## АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Савич С. П., Панін В. О.

Одеський національний політехнічний університет

**Анотація.** Експериментально отримано результати вимірювання показників якості електроенергії. Проведено аналіз основних показників якості електроенергії, яка генерується сонячною електростанцією Ізмаїльського енерговузла і подається в енергосистему. Проведено порівняльний аналіз допустимих значень коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої напруги і коефіцієнтів  $n$ -ої гармонійної складової напруги з експериментальними.

**Ключові слова:** електроенергетика, сонячні електростанції, фотоелектрична система, показники якості, аналізатор якості напруги, несинусоїдальність напруги.

### Вступ.

Генерація електричної енергії за допомогою сонячних електростанцій (СЕС) має великий потенціал для розвитку в Україні. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації на  $1 \text{ м}^2$  поверхні на території України знаходиться у межах:  $1000 \text{ кВт на м}^2$  -  $1400 \text{ кВт на м}^2$ . Сонячна енергія, яка реально надходить за три дні на територію України, перевищує енергію всього річного споживання електроенергії в країні. Середньорічний потенціал сонячної енергії в Україні  $1235 \text{ кВт на м}^2$  – високий і набагато вище, ніж, наприклад, у Німеччині, –  $1000 \text{ кВт на м}^2$  або Польщі -  $1080 \text{ кВт на м}^2$ . Отже є великий потенціал для генерації електричної енергії за допомогою фотовольтажних панелей на території України, особливо в Одеській області. Дивлячись на карту інсоляції України розроблену європейською комісією у 2016 році можемо побачити, що Одеська область має другий після Криму показник сонячної активності в Україні.

На сьогоднішній день в Одеській області основною генеруючою потужністю є Ізмаїльський енерговузел. До нього входять СЕС «Старокозаць», «Арциз», «Рені», «Болград», «Кілія».

Сонячна генерація є достатньо новим видом отримання електричної енергії і питання щодо інтеграції потужних сонячних електростанцій в об'єднану енергетичну систему вивчено не повністю. Збільшуючи генеруючу потужність виникло питання про якість електричної енергії, оскільки Ізмаїльський енерговузел має перетоки активної потужності на Молдову та Румунію. І при продажу електричної енергії до цих країн вона повинна відповідати нормативним документам, які регламентують показники якості електричної енергії. Ізмаїльський енерговузел займає географічно територію Одеської області на північний захід від Дністровського лиману і річки Дністер.

До складу енерговузла входять 9 районів одеської області із загальною чисельністю населення понад 400 тис. чоловік. У 2011 -2013 роках в Арцизький, Білгород-Дністровському, Болградському, Кілійському і Ренійському районах побудовано 5 сонячних електростанцій сумарною встановленою потужністю близько 200 МВт. Для видачі потужності СЕС в об'єднану енергосистему України побудовані пристанційні пункти, лінії 110 кВ, виконано розширення і реконструкція вузлових підстанцій 110 кВ.

### Аналіз останніх досліджень та оприлюднень щодо проблеми.

Сонячна електростанція складається з сонячних батарей, з'єднувальної мережі, перетворювачей, трансформаторів, системи автоматики, захисту і сигналізації. Електрична енергія постійного струму з сонячних батарей поступає на перетворювачі постійного струму в змінний трифазний струм – інвертори [2]. Трифазна напруга інверторів подається на трансформатор, а далі поступає в загальну енергетичну систему. Проаналізувавши дослідження, які проводилися в Україні, можна зробити висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим [1-8]. В даному матеріалі проведено аналіз реальних добових графіків генерації електроенергії на Кілійській сонячній електростанції.

### Цілі і завдання дослідження.

Мета роботи аналіз якості електричної енергії, що генерується на Кілійській сонячній електростанції.

Для досягнення даної мети були поставлені такі завдання:

– провести виміри напруг на стороні 110 кВ в точці приєднання повітряної лінії 110 кВ «Кілійська СЕС» до шин підстанції;

– виконати аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції.

### Викладення основного матеріалу досліджень.

В Україні діє міждержавний стандарт країн СНГ ГОСТ 13109-97 [8]. Норми, встановлені цим стандартом, є рівними електромагнітної сумісності для електромагнітних перешкод в системах електропостачання загального призначення. При дотриманні зазначених норм забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж систем електропостачання загального призначення і електричних мереж споживачів електричної енергії. Для отримання узагальнених характеристик режимів генерації СЕС в різний час при різних погодних умовах були зняті добові графіки генерації активної потужності СЕС (рис. 1).

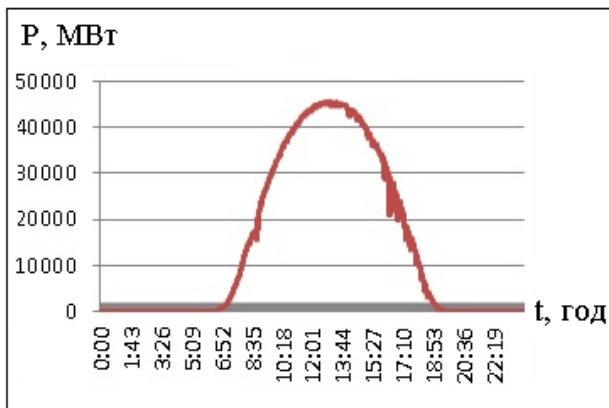


Рис. 1. Добовий графік генерації активної потужності Кілійської СЕС

Наведено добовий графік зміни напруги на шинах приєднання Кілійської СЕС (рис. 2).

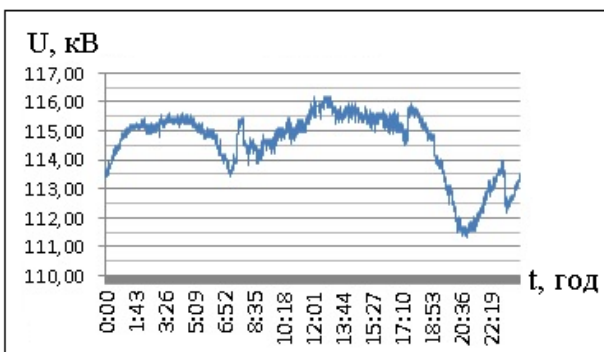


Рис. 2. Добовий графік зміни напруги на шинах приєднання Кілійської СЕС

Предметом дослідження, як основний фактор електромагнітних перешкод, обрана несинусоїдальність напруги.

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками: коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги; коефіцієнтом n-ої гармонійної складової напруги.

Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги в точках загального приєднання до електричних мереж при номінальній напрузі 110 кВ складає 2,0 кВ і 3,0 кВ відповідно [9]. Нормально допустимі значення коефіцієнта n-ої гармонійної складової напруги в точках загального приєднання до електричних мереж з різним номінальним значенням напруги  $U_{ном}$  наведені в таблиці 2 [9]. При наявності вищих гармонік з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах; ускладнюється компенсація реактивної потужності (КРП) з допомогою батарей конденсаторів (БК); скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів; мають місце і інші негативні наслідки. Наприклад, облік електроенергії при несинусоїдальних режимах пов'язан зі значними похибками. Їх значення залежать від вимірювальної системи лічильника, та інших факторів.

Робота присвячена аналізу коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої напруги і коефіцієнтів n-ої гармонійної складової напруги. Зафіксувати показники якості неможливо без спеціалізованих приладів. Одним з таких приладів є аналізатор якості електроенергії. В данній роботі використовувався багатофункціональний вимірювач Satec PM 175 (рис. 3). Прилад є компактним, трьохфазним мультиметром і аналізатором якості енергії змінного струму, спеціально розробленим для задоволення вимог широкого спектру користувачів, від розробників електричних панелей до операторів підстанцій. Прилад забезпечує трифазні вимірювання параметрів електроенергії, включаючи показники якості, в розподільних енергосистемах, моніторинг зовнішніх подій, взаємодія з зовнішнім обладнанням через контакти реле, швидкодіючу і довгострокову запис в самому приладі.



Рис. 3. Аналізатор якості електроенергії Satec PM 175

Наведено добовий графік значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах 110 кВ підстанції «Кілія» (рис.4).

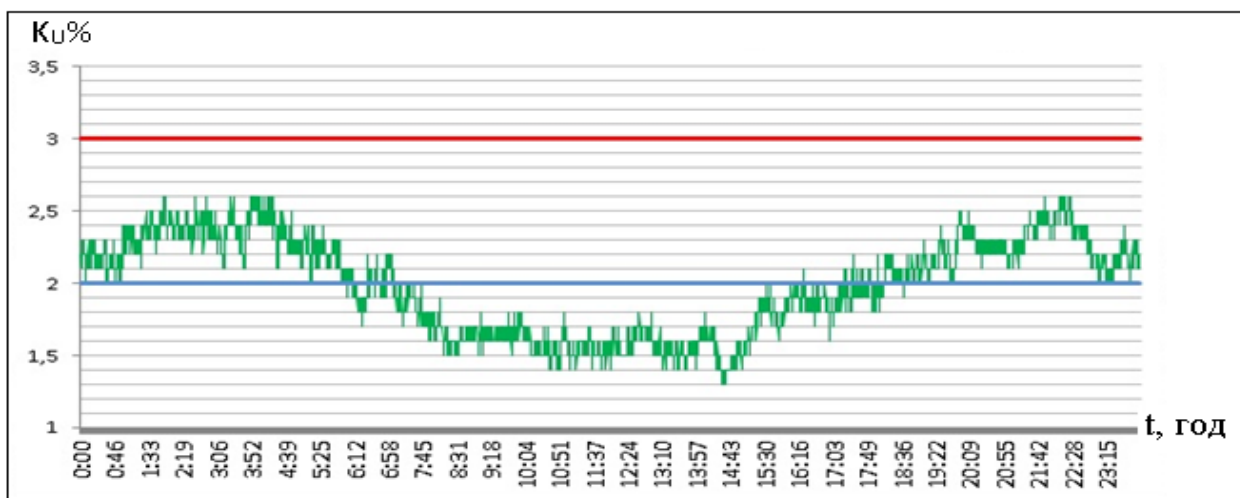


Рис. 4. Графік зміни значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах 110 кВ

Графік зміни значення коефіцієнта 3-ої гармонійної складової напруги на шинах 110 кВ, з урахуванням роботи СЕС, в переважно ясну, сонячну погоду наведено на рис. 5.

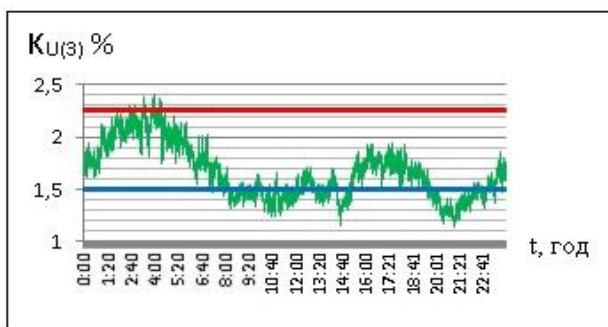


Рис. 5. Графік зміни значення коефіцієнта 3-ої гармонійної складової напруги на шинах 110 кВ

Генерування електроенергії альтернативними джерелами та під'єднання останніх до енергосистеми за допомогою перетворювачів струму впливає на якість електроенергії в мережі. Висока частота перемикання інверторів може створювати додаткові гармоніки в системах та зменшувати ефективність системи у зв'язку з порушенням стійкості джерела та збоями в роботі інверторів. Також через коливання величини виробленої електроенергії сонячними електростанціями, яка постачається в енергосистему, що залежить від часу доби, пори року, інтенсивності сонячної енергії через хмарність для сонячних електростанцій, порушується стійкість роботи, а відповідно й надійність роботи енергосистеми. В результаті складання основної гармоніки номінальної частоти живильної мережі з вищими гармоніками форма синусоїди спотворюється. Таким

чином, коефіцієнт спотворення синусоїдальності визначає частку сумарної напруги вищих гармонік в напрузі електромережі по відношенню до напруги основної частоти, а коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової характеризує внесок конкретної гармоніки в загальні спотворення.

### Висновки за результатами дослідження та перспективи його розвитку

1. Експериментально отримано достовірні результати вимірювання показників якості електроенергії.

2. Генерування електроенергії альтернативними джерелами та під'єднання останніх до енергосистеми за допомогою перетворювачів струму впливає на якість електроенергії в мережі. Висока частота перемикання інверторів може створювати додаткові гармоніки в мережі.

3. Використання сучасного аналізатора РМ 175 дає змогу проводити аналіз показників якості електроенергії та використовувати результати досліджень для розроблення заходів підвищення ефективності роботи сонячної електростанції в енергосистемі.

4. Генерація електричної енергії на Кілійської СЕС Ізмаїльського енерговузла відбувається з дотриманням чинних стандартів.

### Список використаної літератури

1. Денисов, В. А. Оцінка собівартості та можливих обсягів виробництва електроенергії сонячними електростанціями в Україні [Текст] / В. А. Денисов, Н. П. Іваненко, Л. В. Чуприна // Проблеми загальної енергетики – 2012., – вип. 3(30). – С. 45–52.

2. Grimm, V. Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes [Text] / Grimm V., Martin A., Schmidt M., Weibelzahl M., Zöttl G. // European Journal of Operational Research, vol. 6, 2016. Pages 1–17.

3. Момот, В. Е. Анализ влияния солнечных фотоэлектрических электростанций на режимы работы энергосистемы [Текст] / В. Е. Момот, Н. В. Вишнеvский // Энергетика: экономика, технология, экология. – 2012. – Спецвыпуск. – С. 60–68.

4. Э. А. Бекиров Анализ энергетических параметров систем электроснабжения при использовании возобновляемых источников энергии [Текст] / Э. А. Бекиров, // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит Т. 2 № 8(114) - НТУ "ХПИ", 2013 – С. 230–237.

5. Махотило, К. В. Экспериментальная оценка влияния хмарності на коливання потужності фотоелектричної системи [Текст] / К. В. Махотило, Д. М. Косатий // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит № 12(131) – НТУ "ХПИ", 2014 – С. 47–53.

6. Яримбаш, Д. С. Підвищення ефективності використання фотопанелей на сонячних електростанціях [Текст] / Д. С. Яримбаш, Ю. В. Даус // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит № 12(131) - НТУ "ХПИ", 2015 – С. 47–53.

7. Бондарчук, А. С. Прогнозна енергетична, економічна та екологічна ефективність за провадження мережевих сонячних електростанцій в ринкових умовах [Текст] / А. С. Бондарчук // Электротехнические и компьютерные системы № 20(96), 2015 – С. 51–55.

8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

### References

1. Denisov, V. A., Ivanenko, N. P., Chuprina, L. V. (2012) Estimation of prime price and possible production of electric power volumes by sunny power-stations in Ukraine [Ocinka sobivartosti ta mozhlyvih obsjagiv virobnictva elekt-roenergii sonjachnimi elektrostancijami v Ukraїni] Problemi zagal'noї energetiki vip. 3(30). pp. 45–52.

2. Grimm, V., Martin, A., Schmidt, M., Weibelzahl, M., Zöttl, G. (2016) Transmission and Generation Investment in Electricity Markets: The Effects of Market Splitting and Network Fee Regimes European Journal of Operational Research, vol. 6., Pages 1–17.

3. Momot, V. E., Vishnevskij, N. V. (2012.) Analysis of influence of sunny photo-electric power-stations on the modes of operations of grid [Analiz vlijajanija sol-nechnyh fotojelektricheskikh jelektrostan-cij na rezhimy raboty jenergosistemy] Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija. — Specvipusk. pp. 60–68.

4. Je. A. Bekirov (2013) Analysis of power parameters of the systems of power supply at the use of proceeded in the sources of energy [Analiz jenergetiches-kih parametrov sistem jelektrosnabzhenija pri ispol'zovanii vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии] Jenergosberezenie. Jenergetika. Jenergoaudit T. 2 № 8(114) NTU "HPI", pp. 230–237.

5. Mahotilo, K. V., Kosatij, D. M. (2014) An experimental estimation of influence of cloudiness is on oscillation of power of the photo-electric system [Eksperimental'na ocinka vplivu hmarnosti na kolivannja potuzhnosti fotoelektrichnoi sistemi] Jenergosbe-rezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit № 12(131) NTU "HPI", pp. 47–53.

6. Jarimbash, D. S., Daus, Ju. V. (2015) An increase of efficiency of the use of фотопанелей is on sunny power-stations [Pidvishhennja efekтивnosti vikoristannja fotopanelej na sonjachnih elektrostancijah] Jenergosberezenie. Jenergetika. Jenergoaudit № 12(131) NTU "HPI", pp. 47–53.

7. Bondarchuk, A. S. (2015) Prognosis power, economic and ecological efficiency of

input of network sunny power-stations is in market conditions [Prognozna energetichna, ekonomichna ta ekologichna efekтивnist' zaprovadzhennja merezhevih sonjachnih elektrostancij v rinkovih umovah] Jeletrotehnicheskie i komp'juterny sistemy № 20(96), pp. 51–55.

8. GOST 13109-97. Jelettricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jeletktromagnitnaja. Normy kachestva jelettricheskoi jenergii v sistemah jeletktrosnabzhenija obshhego naznachenija».

## ANALYSIS OF POWER QUALITY SOLAR POWER

S. P. Savich, V. A Panin

Odessa National Polytechnic University

**Abstract.** *The generation of electricity with the help of solar power plants has a great potential for development in Ukraine. The analysis of the main power quality indicators generated by the solar power station of the Izmail energy unit and transmitted to the power system is carried out.*

*Experimentally obtained reliable results of measurement of power quality indicators. The generation of electricity by alternative sources and the connection of the latter to the power system by means of current converters affect the quality of electricity in the network. High frequency switching inverters can create additional harmonics in the network. The use of the modern PM 175 analyzer makes it possible to analyze the power quality indicators and use the results of research to develop measures to improve the efficiency of the solar power plant in the power system. A comparative analysis of the admissible values of the sinusoidal distortion coefficients of the voltage curve and the coefficients of the n-th harmonic voltage component is carried out. As a result of the measurements daily diagrams of the sinusoidal distortion coefficients of the voltage curve on the 110 kV buses of the Kiliya substation were obtained. The graphs of the change in the value of the coefficient of the 3rd harmonic voltage component on the 110 kV tires are obtained, taking into account the work of the solar power plant, mainly clear, sunny weather. The generation of electricity by alternative sources and the connection of the latter to the power system by means of current converters affect the quality of electricity in the network. The high switching frequency of the inverters can create additional harmonics in the systems and reduce the efficiency of the system due to the violation of the stability of the sources and the malfunctioning of the inverters. Generation of electric energy at the Kiliya solar power station of the Izmail energy unit occurs in compliance with the current standards.*

**Key words:** *electric power industry, solar power station, photovoltaic system, quality indices, power quality analyzer, non-sinusoidal voltage.*

## АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Савич С. П., Панин В. А.

Одесский национальный политехнический университет

***Аннотация.** Экспериментально получены результаты измерения показателей качества электроэнергии. Проведен анализ основных показателей качества электроэнергии, генерируемой солнечной электростанцией Измаильского энергоузла и передающейся в энергосистему. Проведен сравнительный анализ допустимых значений коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения.*

***Ключевые слова:** электроэнергетика, солнечные электростанции, фотоэлектрическая система, показатели качества, анализатор качества электроэнергии, несинусоидальность напряжения.*

Получено 12.05.2017



**Савич Світлана Павлівна**, канд. техн. наук, доц. каф. електропостачання та енергетичного менеджменту, ОНПУ, тел. (048)705-8690  
E-mail: savichsp@gmail.com

**Savich Svetlana**, Ph.D., Associate Professor Department of Electrical Power Supply and Energy Management, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko avenue,1, Odessa, 65044, Ukraine, tel.: +38 (067) 483 4606, E-mail: [savichsp@gmail.com](mailto:savichsp@gmail.com)  
**ORCID:** 0000-0001-6995-568X



**Панін Віктор Олександрович**, головний енергоменеджер, комунальне підприємство «Одеська обласна енергозберігаюча компанія», пр. Шевченка,12, Одеса, Україна, 65044 тел. +38(093)476-5850, E-mail: vopanin@gmail.com

**Panin Victor**, Chief Energy Manager Municipal enterprise "Odessa Regional Energy Saving Company", Shevchenko avenue,12, Odessa, 65044, Ukraine, tel.: +38(093)476-5850, E-mail: vopanin@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0001-7401-1958