

П. Д. Лежнюк¹
Ю. В. Малогулко¹
І. О. Прокопенко¹

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ГЕНЕРУВАННЯ ВДЕ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖ ОПЕРАТОРІВ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ

¹Вінницький національний технічний університет

Проаналізовано нормативні положення з оцінювання якості електропостачання. Це особливо важливо для операторів систем розподілу в умовах впровадження стимулюючого тарифоутворення. Визначено вплив приросту встановленої потужності ВДЕ на нормативний показник тривалості перерв в електропостачанні SAIDI, а також проаналізовано зміну показника середньої тривалості відмов в електропостачанні (хв) від року та області. Проведено кореляційний аналіз для низки операторів систем розподілу впливу генерування відновлювальних джерел енергії на SAIDI, в періоди 2013—2016 роки та 2017—2020 роки. Визначено, що в період з 2013 по 2016 роки ріст встановлюваної потужності відновлювальних джерел енергії практично не впливав на нормативний показник тривалості перерв в електропостачанні SAIDI. А, починаючи з 2017 року, у зв'язку з вибором неоптимальних точок приєднання та/або різкого зростання встановлених потужностей відновлювальних джерел енергії, SAIDI збільшується.

Побудовані графіки залежності приросту встановленої потужності відновлювальних джерел енергії по областях України в період з 2013 по 2020 рік. Для наочності, побудовано графік залежності встановленої потужності відновлювальних джерел енергії за низкою операторів систем розподілу від року введення таких потужностей у два періоди, а саме 2013—2016 роки та 2017—2020 роки. Побудовано графік залежності щорічного показника середньої тривалості відмов у електропостачанні по областях України в період з 2013 по 2020 роки. Для побудови графіків, а також кореляційного аналізу вибрано області з найбільшою встановленою потужністю відновлювальних джерел енергії станом на кінець 2020 року. Зроблено висновок щодо впливу відновлювальних джерел енергії на надійність електропостачання операторів систем розподілу.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, електричні мережі, надійність, електропостачання, споживач електроенергії.

Вступ

Впровадження стимулюючого тарифоутворення на послуги з розподілу потенційно повинно мотивувати операторів систем розподілу (ОСР) покращувати якість послуг, які вони надають. Очевидно, що на якість послуг ОСР впливає також і тривалість перерв в електропостачанні (System Average Interruption Duration Index) — SAIDI, який також враховано в Порядку встановлення (формування) тарифів на послуги з розподілу електричної енергії, до якого внесені зміни відповідною постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (далі НКРЕКП) від 26.08.2020 №1610 (Методика).

Постановка проблеми

Згідно із затвердженою Методикою передбачається, що втрати електричної енергії у мережах операторів систем розподілу мають знизитися щонайменше на 1 % на першому класі напруги та на 3,5 % на другому класі напруги щорічно. Показник SAIDI (середня тривалість перерв у електропостачанні) повинен знизитися рівномірно протягом 13 років з 466 до 150 хвилин в міській місцевості та з 960 до 300 хвилин в сільській місцевості.

На сьогоднішній день, на показник SAIDI також впливає і приєднання відновлювальних джерел

енергії (ВДЕ) до електричних мереж. В деяких роботах проаналізовано, яким чином впливає спосіб та місце приєднання електроустановок ВДЕ до електричних мереж на їх режимні характеристики: втрати потужності, рівні напруг [1]—[3], статичну та динамічну стійкість [4], [5], а також надійність електропостачання [6]. Також проаналізовано оцінювання стабільності генерування сонячних електростанцій у задачі забезпечення балансової надійності [7] та основних складових якості функціонування локальних електричних систем з різнотипними відновлювальними джерелами енергії [8].

У табл. 1 наведені дані областей з найбільшою в Україні встановленою потужністю ВДЕ на період з 2013 по 2020 рік [1]. В Україні лідерами серед областей за встановленою потужністю ВДЕ є Дніпропетровська область зі встановленою потужністю станом на кінець 2020 року 1155,032 МВт (причому що на кінець 2013 року Дніпропетровська область була на останньому місці за цим показником серед перелічених областей), друге місце належить Херсонській області — 942,226 МВт, далі Миколаївська — 925,259 МВт та Запорізька — 862,015 МВт. Також в таблицю занесені дані росту встановленої потужності Вінницької області із значенням 359,239 МВт на кінець 2020 року, Закарпатської — 274,508 МВт, Кіровоградської — 372,367 МВт та Одеської — 553,267 МВт.

Таблиця 1

Зміна встановленої потужності відновлювальних джерел енергії (МВт) від року та області.

Область	Рік							
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Вінницька	34,56	54,82	56,44	113,05	146,55	195,75	357,89	359,24
Дніпропетровська	13,76	13,76	17,75	21,65	68,63	384,28	1112,76	1155,03
Закарпатська	32,38	33,98	39,63	71,87	90,15	111,92	226,79	274,51
Запорізька	222,50	222,50	222,50	226,56	227,40	245,08	763,42	862,02
Кіровоградська	53,73	53,73	53,86	57,74	82,72	123,49	332,92	372,37
Миколаївська	123,72	177,12	177,12	219,97	255,42	284,03	857,31	925,26
Одеська	233,12	233,12	233,12	238,29	266,43	316,66	532,99	553,27
Херсонська	237,03	257,46	257,46	278,55	344,47	553,62	919,09	942,23

Логічно припустити, що в кожного з операторів систем розподілу, умови та одиничні потужності об'єктів ВДЕ, що приєднуються, різні, і визначити яким чином збільшення кількості та встановленої потужності впливає на надійність електропостачання споживачів є складною техніко-економічною задачею.

Метою статті є оцінювання впливу збільшення встановленої потужності відновлюваних джерел енергії на надійність електропостачання, а саме на показник тривалості перерв в електропостачанні (SAIDI) кінцевого споживача в регіоні.

Матеріали дослідження

Згідно зі стандартом IEEE 1366-2012 та Постановою НКРЕКП «Про затвердження цільових показників надійності (безперервності) електропостачання» визначено основні показники надійності роботи електричних мереж, також і з відновлювальними джерелами енергії, що характеризують кількісно та якісно перерви в електропостачанні.

Класифікація переривань в електропостачанні згідно з ДСТУ EN 50160:2014:

а) заплановані, коли споживача заздалегідь інформують про них;
 б) аварійні, які спричинено тривалими чи короткочасними короткими замиканнями, які найчастіше є наслідком зовнішніх подій, виходу з ладу обладнання чи стороннього втручання в його роботу. Випадкові перериви класифікують як:

- 1) довгі переривання (довше ніж три хвилини);
- 2) короткочасні переривання (включно до трьох хвилин).

Для них введені такі показники:

– System Average Interruption Frequency Index / Показник середньої частоти відмов

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_T}, \quad (1)$$

де N_i — кількість перерв в електропостачанні споживачів за звітний період, N_T — загальна кількість споживачів в електричній мережі.

– System Average Interruption Duration Index / Показник середньої тривалості відмов

$$SAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{N_T}, \quad (2)$$

де r_i — час відновлення електропостачання, N_i — кількість перерв в електропостачанні споживачів за звітний період, N_T — загальна кількість споживачів в електричній мережі.

Розглянуті показники надійності електропостачання (1), (2) дозволяють характеризувати одну зі складових частин якості електропостачання. Проте, таких показників досить багато і відмінності між ними часто залежать від одиниць вимірювання звітного періоду (хвилини або години) або обчислення одного показника, наприклад, SAIDI дозволяє говорити про відповідність нормативу показника середньої тривалості відмов окремих споживачів (CAIDI, СТАІDІ) та показника середньої тривалості відмов (ASIDI). А аналіз показника SAIFI дає базову інформацію про показники середньої частоти відмов (ASIFI та CAIFI) і т.д.

Виходячи з цього, пропонується використання лише основних показників надійності (ПН) — SAIFI, SAIDI, в разі необхідності можна також скористатися показниками експлуатаційної готовності (ASAI) та експлуатаційного простою обладнання (ASUI). Використання цих показників, для оцінювання надійності роботи розподільчих електричних мереж, зумовлено ще і тим, що показники ASAI та ASUI дозволяють оцінити збитки власників станції на базі ВДЕ, наприклад ФЕС, що розміщена поблизу споживачів, в разі недовідпуску електроенергії внаслідок аварії на лінії електропередачі (ЛЕП) на шляху до споживача або до ПС.

У таблиці 2 подано показники надійності (безперервності) електропостачання, розраховані за формулою розрахункового показника якості послуг на перший рік переходу до стимулюючого регулювання, що враховує фактичні значення SAIDI компаній за останні 3 роки та довгострокові цілі досягнення показників 150 хв для міської території й 300 хв для сільської території [2]. У таблиці використані фактичні значення SAIDI.

Таблиця 2

Зміна показника середньої тривалості відмов в електропостачанні (хв) від року та області

Область	Рік							
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Вінницька	694,8	466	416,2	443,3	360,8	418,6	436,1	685
Дніпропетровська	433,1	657	991,2	777,7	656,8	797,7	626,1	402
Закарпатська	805,1	845	842,5	1014,3	1433,9	892,8	949	1072
Запорізька	75,8	71	97,1	754,3	420,3	614,5	529,3	517
Кіровоградська	1048,9	939	843,8	1185,4	1114,9	1253,1	1131	727
Миколаївська	966,7	1206	926,5	1106	940,8	828,9	1901,12	1901,11
Одеська	625,7	927	958,6	1953	1801	1362,7	1904,1	1168
Херсонська	519,2	1039	936,1	987,5	900,8	1004,8	1183	990

Відповідно до табл. 1 та 2 побудовано графіки залежності встановленої потужності ВДЕ по областях до року введення (рис. 1а) та графік залежності SAIDI по областях до року введення (рис. 1б), відповідно.

На рис. 1 можна чітко побачити тенденцію швидкого росту введення потужностей ВДЕ, починаючи з 2017 року. Оскільки зростання кількості та встановленої потужності ВДЕ, відбувалося фактично після 2017 року, побудовано додатково два графіка за даними табл. 1 з розділенням на періоди, а саме період 2013—2016 роки (рис. 2а) та 2017—2020 роки (рис. 2б).

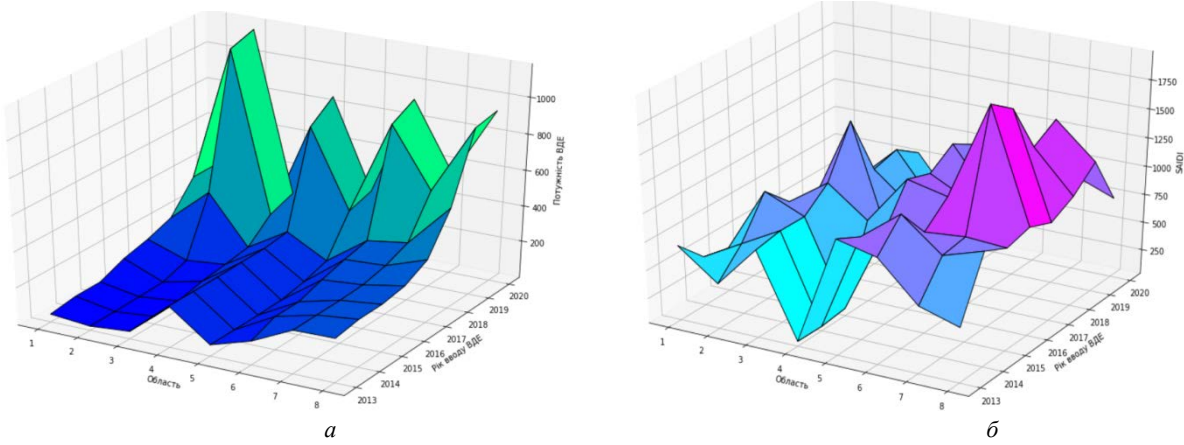


Рис. 1: *a* — приріст встановленої потужності ВДЕ по областях України в період з 2013 до 2020 рік; *б* — показник середньої тривалості відмов в електропостачанні (SAIDI); 1 — Вінницька; 2 — Дніпропетровська; 3 — Закарпатська; 4 — Запорізька; 5 — Кіровоградська; 6 — Миколаївська; 7 — Одеська; 8 — Херсонська області

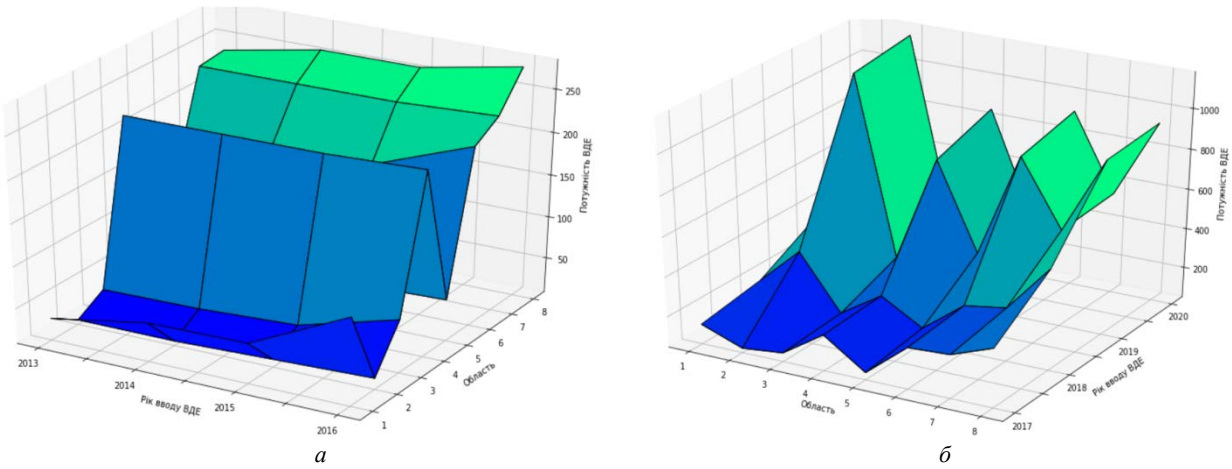


Рис. 2. Приріст встановленої потужності ВДЕ по областях України: *a* — в період з 2013 по 2016 рік; *б* — в період з 2017 по 2020 рік; 1 — Вінницька; 2 — Дніпропетровська; 3 — Закарпатська; 4 — Запорізька; 5 — Кіровоградська; 6 — Миколаївська; 7 — Одеська; 8 — Херсонська області

На рис. 3 графік залежності SAIDI по областях до року введення поділено на два періоди, а саме 2013—2016 роки (рис. 3а) та 2017—2020 роки (рис. 3б).

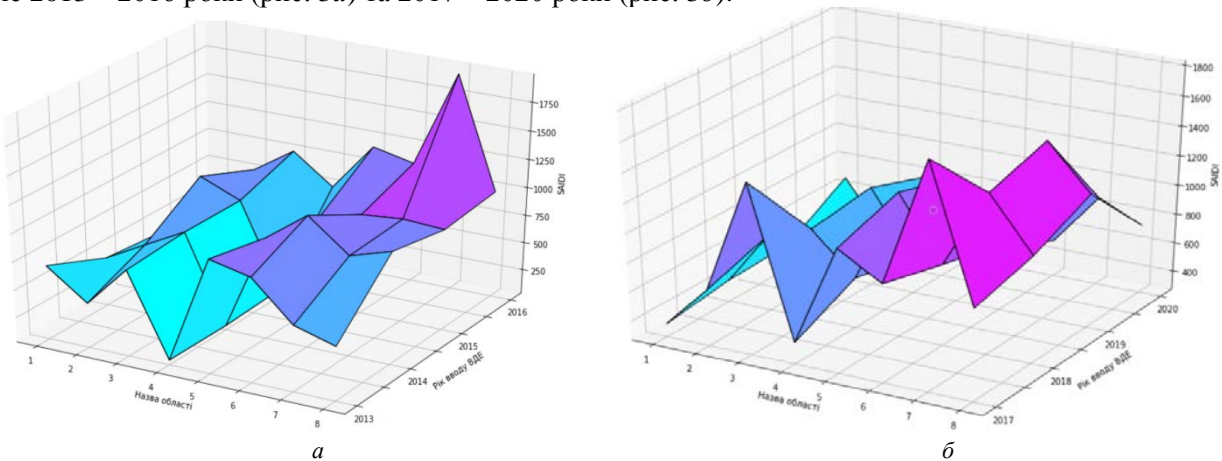


Рис. 3. Щорічний показник середньої тривалості відмов (SAIDI) у хвилинах по областях України: *a* — в період з 2013 по 2016 рік; *б* — в період з 2017 по 2020 рік; 1 — Вінницька; 2 — Дніпропетровська; 3 — Закарпатська; 4 — Запорізька; 5 — Кіровоградська; 6 — Миколаївська; 7 — Одеська; 8 — Херсонська області

Проаналізувавши табл. 1, можна чітко побачити, що з 2017 року почалось стрімке збільшення потужностей ВДЕ, тому проведено розрахунок кореляції між встановленою потужністю та SAIDI в два періоди: 2013—2016 роки та 2017—2020 роки.

$$R_{P_{ВДЕ}, SAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{ВДЕi} - \overline{P_{ВДЕ}})(SAIDI_i - \overline{SAIDI})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (P_{ВДЕi} - \overline{P_{ВДЕ}})^2 \sum_{i=1}^m (SAIDI_i - \overline{SAIDI})^2}} = \frac{\text{cov}(P_{ВДЕ}, SAIDI)}{\sqrt{s_{P_{ВДЕ}}^2 s_{SAIDI}^2}}, \quad (3)$$

де $\overline{P_{ВДЕ}}$, \overline{SAIDI} — вибіркові середні встановленої потужності ВДЕ та SAIDI, відповідно, $s_{P_{ВДЕ}}^2$, s_{SAIDI}^2 — вибіркові дисперсії; $R_{P_{ВДЕ}, SAIDI} \in [-1, 1]$.

Розрахунок кореляції подано у табл. 3.

Таблиця 3

Розрахунок кореляції за періоди 2013—2016 та 2017—2020 рр.

Область	$R_{P_{ВДЕ}, SAIDI}$ (2013–2016)	$R_{P_{ВДЕ}, SAIDI}$ (2017–2020)	$R_{P_{ВДЕ}, SAIDI}$ (2013–2020)
Вінницька	-0,5852	0,7091	0,121
Дніпропетровська	0,6044	-0,6634	0,199
Закарпатська	0,9874	-0,3979	0,263
Запорізька	0,9994	0,0553	0,331
Кіровоградська	0,806	-0,6886	-0,299
Миколаївська	0,4511	-0,9229	-0,809
Одеська	0,9657	-0,672	0,103
Херсонська	0,7972	0,7078	0,527

Завдяки наведеним даним можна спостерігати вплив збільшення потужностей ВДЕ на показник середньої тривалості відмов. Особливо це добре видно на прикладі Дніпропетровської, Закарпатської, Миколаївської, Кіровоградської та Одеської областей саме в період 2017—2020 років, коли встановлена потужність в Україні почала швидко збільшуватись. Показник кореляції в цих областях склав менше 0, а отже ріст потужностей ВДЕ впливає на тривалість відмов в електропостачанні. В період 2013—2016 років ріст потужності ВДЕ в усіх областях був незначний, а отже практично не впливав на SAIDI в більшості областей (табл. 3). Оцінювання кореляційних залежностей показників росту потужностей генерування відновлювальних джерел енергії на території ведення господарської діяльності операторів систем розподілу АТ «Миколаївобленерго» та ПрАТ «Кіровоградобленерго», а також показника тривалості відмов в електропостачанні в період з 2013 по 2020 рік, дає можливість однозначно зробити висновок, що зі зростанням генерування ВДЕ збільшується тривалість відмов в електропостачанні.

Висновки

Джерела розосередженого генерування мають великий потенціал для підвищення енергоефективності розподільної електричної мережі. Однак конструкція системи розподілу і методи її роботи, зазвичай на основі радіальних потоків потужності, створюють низку проблем для успішного впровадження розподілених джерел енергії.

Для підвищення техніко-економічної ефективності спільної експлуатації розосереджених джерел електроенергії і розподільних електричних мереж необхідно розв'язати низку задач, що дозволить підвищити надійність електропостачання споживачів.

Проаналізовано зміну показників SAIDI за операторами систем розподілу, а також зміну встановленої потужності відновлювальних джерел енергії.

Визначено, що у період стрімкого зростання генерування ВДЕ, а саме з 2017 по 2020 роки, за низкою операторів систем розподілу збільшувалися показники тривалості відмов в електропостачанні, про що свідчать показані коефіцієнти кореляції. Виходячи з цього, можна зробити висновок щодо впливу ВДЕ на надійність електропостачання в зазначених ОСР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] *Реєстр об'єктів електроенергетики (альтернативні джерела енергії)*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.nerc.gov.ua/data/filearch/litsenziini_reestry/REESTR_ALT.pdf.

[2] *Обґрунтування прийняття постанови НКРЕКП «Про затвердження Показників надійності (безперервності) електропостачання»*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/berezen>.

- [3] Petro Lezhniuk, et al., “The influence of distributed power sources on active power loss in the microgrid,” *Przeegląd Elektrotechniczny*, r. 93, nr 3, pp. 107-112, 2017. ISSN 0033-2097. <https://doi.org/10.15199/48.2017.03.25> .
- [4] Oleksander B. Burykin, et al., “ Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems,” *Przeegląd Elektrotechniczny*, r. 93, nr 3, pp. 97-102, 2017. ISSN 0033-2097 .
- [5] IEEE Standard 1366-2012, “IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices” (revision of IEEE Std. 1366-2012).
- [6] O. Buslavets, P. Legnuk, and O. Rubanenko, “Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities,” *Eastern-European journal of enterprise technologies*, no. 2/8 (74), pp. 35-41, 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39881> .
- [7] Національна академія наук України; Інститут газу НАН України; Інститут загальної енергетики НАН України, *Стратегія енергозбереження в Україні*, аналітично-довідкові матеріали, у 2-х т., Б. С. Стогній та ін. Ред. Київ, Україна: Академперіодика, 2006, 529 с.
- [8] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, і С. В. Кравчук, «Оцінювання стабільності генерування сонячних електростанцій у задачі забезпечення балансової надійності,» *Наукові праці ВНТУ*, № 2, с. 1-8, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/471/469> .
- [9] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, І. В. Котилко, і І. О. Прокопенко, «Оцінювання якості електропостачання в локальних електричних системах з різнотипними відновлювальними джерелами енергії,» *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, Серія: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, № 195, с. 23-25, 2018.
- [10] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, та І. В. Котилко, «Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж,» *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, № 45 (1321), с. 25-31, 2018. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.04> .
- [11] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, і В. В. Кулик, «Вплив відновлюваних джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж,» *Енергетика та електрифікація*, № 1, с. 8-12, 2015.
- [12] P. D. Lezhniuk, et al., *Optimal integration of photoelectric stations in electric networks*, monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019, pp. 220. ISBN-13-978-620-0-08225-1.
- [13] НКРЕКП, *Постанова № 310*, «Про затвердження кодексу систем розподілу,» від 14.03.2018.
- [14] НКРЕКП, *Постанова № 309*, «Про затвердження кодексу систем передачі,» від 14.03.2018.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 7.06.2021

Лежнюк Петро Дем'янович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем; e-mail: lezhpd@gmail.com ;

Малогулко Юлія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем; e-mail: malogulko.y.v@vntu.edu.ua ;

Прокопенко Ігор Олександрович — аспірант кафедри електричних станцій та систем, e-mail: delfin11071994@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

P. D. Lezhniuk¹
Yu. V. Malogulko¹
I. O. Prokopenko¹

Assessment of the Impact of RSE Generation on the Reliability Indicators of Networks of Distribution System Operators

¹Vinnitsia National Technical University

The article analyzes the regulations for assessing the quality of electricity supply, which is especially important for distribution system operators in terms of the introduction of incentive tariffs. The influence of the increase in the installed capacity of RES on the normative indicator of the duration of power supply interruptions — SAIDI was determined, and also the change of the indicator of the average duration of power supply failures (min) from the year and region was analyzed. Correlation analysis was performed for a number of operators of distribution systems for the impact of renewable energy generation on SAIDI, in the periods 2013—2016 and 2017—2020. It is determined that in the period from 2013 to 2016, the growth of the installed capacity of renewable energy sources had almost no effect on the normative indicator of the duration of power outages — SAIDI. And since 2017, due to the choice of sub-optimal connection points and / or a sharp increase in the installed capacity of renewable energy sources, SAIDI is increasing.

Graphs of dependence of increase of the established capacity of renewable energy sources on areas of Ukraine in the period from 2013 to 2020 are constructed. For clarity, a graph of the dependence of the installed capacity of renewable

energy sources for a number of distribution system operators on the year of implementation of such capacity for two periods, namely 2013—2016 and 2017—2020. The schedule of dependence of the annual indicator of average duration of failures in power supply on areas of Ukraine in the period from 2013 to 2020 is constructed. The regions with the largest installed capacity of renewable energy sources as of the end of 2020 were selected for plotting and correlation analysis. The conclusion on the influence of renewable energy sources on the reliability of electricity supply to distribution system operators is made.

Keywords: renewable energy sources, electricity networks, reliability, power supply, electricity consumer.

Lezhniuk Petro D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Chair of Power Plants and Systems, e-mail: lezhpd@gmail.com ;

Malogulko Yulia V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Power Plants and Systems, e-mail: malogulko.y.v@vntu.edu.ua ;

Prokopenko Ihor O. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Plants and Systems, e-mail: delfin11071994@gmail.com

П. Д. Лежнюк¹
Ю. В. Малогулко¹
И. А. Прокопенко¹

Оценка влияния генерирования ВИЭ на показатели надежности работы сетей оператора системы распределения

¹Винницкий национальный технический университет

Проанализированы нормативные положения по оценке качества электроснабжения, что особенно важно для операторов систем распределения в условиях внедрения стимулирующего тарифообразования. Определено влияние прироста установленной мощности ВИЭ на нормативный показатель продолжительности перерывов в электроснабжении — SAIDI, а также проанализированы изменение показателя средней продолжительности отказов в электроснабжении (мин) от года и области. Проведен корреляционный анализ для ряда операторов систем распределения влияния генерирования возобновляемых источников энергии на SAIDI, в периоды 2013—2016 гг. и 2017—2020 годы. Определено, что в период с 2013 по 2016 годы рост установленной мощности возобновляемых источников энергии практически не влиял на нормативный показатель продолжительности перерывов в электроснабжении SAIDI. А начиная с 2017 года, в связи с выбором неоптимальных точек присоединения и/или резкого роста установленных мощностей возобновляемых источников энергии, SAIDI увеличивается.

Построены графики зависимости прироста установленной мощности возобновляемых источников энергии по областям Украины в период с 2013 до 2020 год. Для наглядности построен график зависимости установленной мощности возобновляемых источников энергии по ряду операторов систем распределения от года ввода таких мощностей в два периода, а именно 2013—2016 годы и 2017—2020 годы. Построен график зависимости ежегодного показателя средней продолжительности отказов в электроснабжении по областям Украины в период с 2013 по 2020 годы. Для построения графиков, а также корреляционного анализа выбраны области с наибольшей установленной мощностью возобновляемых источников энергии по состоянию на конец 2020 года. Сделан вывод о влиянии возобновляемых источников энергии на надежность электроснабжения операторов систем распределения.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, электрические сети, надежность, электроснабжения, потребитель электроэнергетики.

Лежнюк Петр Демьянович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем, e-mail: lezhpd@gmail.com ;

Малогулко Юлия Владимировна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: malogulko.y.v@vntu.edu.ua ;

Прокопенко Игорь Александрович — аспирант кафедры электрических станций и систем; e-mail: delfin11071994@gmail.com