

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.051>

## АНАЛІЗ ЗМІНИ ЧАСТОТИ В ОЕС УКРАЇНИ ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЇЇ РОБОТИ

О.В. Кириленко<sup>1\*</sup>, академік НАН України, В.В. Павловський<sup>1\*\*</sup>, докт.техн.наук,  
А.О. Стелюк<sup>1\*\*\*</sup>, канд.техн.наук, О.В. Леньга<sup>1\*\*\*\*</sup>, В.Б. Зайченко<sup>2\*\*\*\*\*</sup>,  
Ю.Г. Лиховид<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук  
<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: [astelvuk@gmail.com](mailto:astelvuk@gmail.com).  
<sup>2</sup>НЕК «Укренерго»,  
вул. С. Петлюри, 25, Київ, 01032, Україна.

В статті наведено основні результати аналізу зміни частоти в ОЕС України за умов її ізольованої роботи, а також синхронної роботи з енергооб'єднаннями ЄЕС/ОЕС та ENTSO-E. Розглянуто причини зміни максимальних і мінімальних значень, а також подано гістограми частоти для вищенаведених режимів роботи ОЕС України. Бібл. 5, табл. 1, рис. 7.

**Ключові слова:** частота, якість регулювання, об'єднана енергосистема, статистичний аналіз, гістограма.

Відповідно до планів інтеграції у 2023 р. передбачалося підключення об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України на синхронну роботу з енергооб'єднанням країн континентальної Європи ENTSO-E. З метою визначення можливості роботи вітчизняної ОЕС як в ізольованому режимі, так і за умов синхронної роботи з ENTSO-E консорціумом системних операторів магістральних мереж європейських країн за участю Національної енергетичної компанії (НЕК) «Укренерго», Енергетичної Асоціації США та міжнародної консалтингової компанії DMCC проведено комплекс досліджень режимів ОЕС України. Результати досліджень підтвердили готовність переходу вітчизняної ОЕС як до ізольованого режиму, так і до подальшої її синхронізації з об'єднанням ENTSO-E. Крім того, з метою оцінки якості регулювання частоти проведено відповідні натурні випробування за умов ізольованої роботи ОЕС України. Проте, віроломний напад РФ на Україну, що й досі супроводжується знищенням інфраструктури України, у т.ч. об'єктів електроенергетики, призвів до дострокової синхронізації ОЕС України з енергооб'єднанням країн континентальної Європи ENTSO-E, яка відбулася 16 березня 2022 р. Зазначимо, що до цього часу протягом майже місяця ОЕС України вимушено працювала в ізольованому режимі (з 24 лютого 2022 р.), який, в умовах проведення інтенсивних бойових дій вищенаведеного, у 2022 році ОЕС України «охопила» наступні режими: паралельну роботу з ЄЕС/ОЕС (до 24 лютого 2022 р.), тривалу вимушену ізольовану роботу (з 24 лютого по 16 березня 2022 р.), а також синхронну роботу з ENTSO-E (з 16 березня 2022 р.). З урахуванням зазначеного, набуває особливої актуальності оцінка зміни частоти в ОЕС України у зазначених режимах її роботи.

**Метою роботи** є аналіз якості регулювання частоти за різних режимів роботи ОЕС України (ізольований, а також синхронна робота з ЄЕС/ОЕС та ENTSO-E). Для цього проведено аналіз даних реєстрації частоти (сумарно біля 7 млн. значень з дискретністю 1 с) для трьох зазначених режимів ОЕС України. Як приклад на рис. 1 наведено зміну частоти за умов ізольованої роботи ОЕС України, де спостерігаються значні відхилення частоти, але які знаходяться у межах допустимих значень [1].

Для статистичного аналізу даних реєстрації частоти сформовано відповідні вибірки, які відповідають певному режиму роботи ОЕС України (таблиця). Так, перша та друга вибірки відповідають паралельній роботі ОЕС України з ЄЕС/ОЕС, вибірки № 3 та 4 – ізольованому режиму ОЕС України у складі блоку регулювання Україна-Молдова, а вибірка № 5 – режиму синхронної роботи з ENTSO-E.

Як видно з таблиці, для усіх вибірок середнє значення частоти (математичне очікування  $\mu$ ) знаходиться близько до номінального значення частоти. Так є цікавими значення мінімальних та

© Кириленко О.В., Павловський В.В., Стелюк А.О., Леньга О.В., Зайченко В.Б., Лиховид Ю.Г., 2023  
ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0003-3610-7670>, \*\* <https://orcid.org/0000-0002-9158-8377>,  
\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-7548-4757>, \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0001-6812-258X>,  
\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-6459-5125>, \*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-3548-9566>

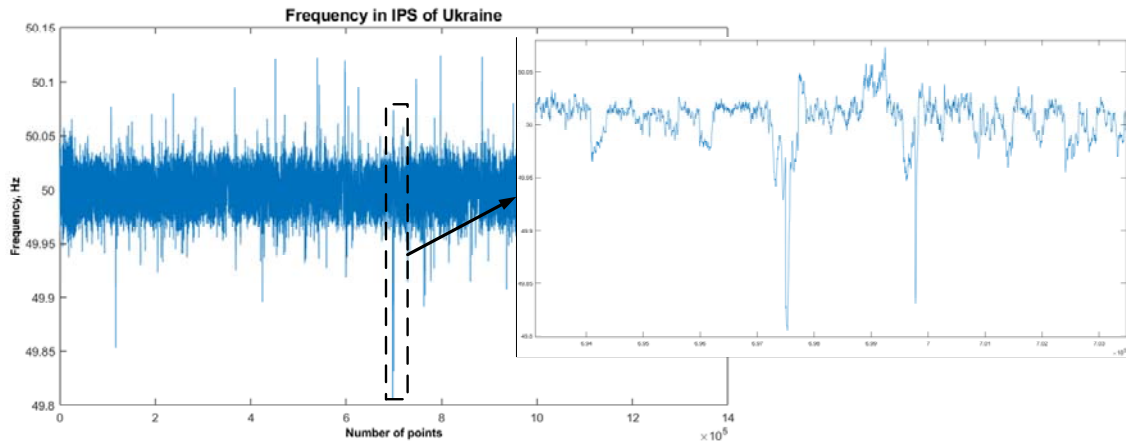


Рис. 1

максимальних значень частоти для трьох режимів ОЕС України, що розглядаються. Перш за все слід зазначити, що всі значення зміни частоти знаходяться у допустимому діапазоні (49,8-50,2) Гц, хоча за умов ізольованої роботи ОЕС України (вибірка №3) частота «наближається» до мінімального допустимого значення 49,8 Гц (49,806 Гц), як це видно на рис. 1.

№ п/п	Режим ОЕС України	Вибірка	Показники зміни частоти, Гц			
			Максимальне значення $f_{max}$	Мінімальне значення $f_{min}$	Середнє значення $\mu$	Середньоквадратичне відхилення $\sigma$
1	Паралельна робота з ЄЕС/ОЕС	Вибірка №1	50,0629	49,927	49,9994	0,0149
		Вибірка №2	50,065	49,938	49,9992	0,0151
2	Ізольована робота	Вибірка №3	50,125	49,806	49,9988	0,0157
		Вибірка №4	50,145	49,865	50,0016	0,0204
3	Синхронна робота з ENTSO-E	Вибірка №5	50,111	49,842	50	0,0214

Також звертає на себе увагу і діапазон зміни частоти (максимальне і мінімальне значення) за різних режимів роботи ОЕС України. Найменший діапазон зміни частоти спостерігається за умов паралельної роботи ОЕС України з ЄЕС/ОЕС. З одного боку це обумовлено великим значенням коефіцієнта сумарної крутизни статичної частотної характеристики (с.ч.х.) усього енергооб'єднання (за результатами попередніх досліджень [2] встановлено, що значення цього коефіцієнту змінюється у діапазоні 18000-21000 МВт/Гц). В результаті цього спостерігається незначне відхилення частоти в масштабах енергооб'єднання навіть у разі виникнення розрахункового небалансу активної потужності (в ОЕС України – це відключення найбільш потужного енергоблоку). Через відключення енергоблоку атомної електростанції потужністю 1000 МВт частота по завершенню первинного регулювання становить 49,95 Гц [3]. Іншим чинником, який обумовлює високу стабілізацію частоти, є організація вторинного регулювання частоти. Центральна координуюча система автоматичного регулювання частоти та потужності (САРЧП) працює в режимі автоматичного регулювання частоти (здійснює покриття небалансу активної потужності в масштабах всього енергооб'єднання [4]), при цьому САРЧП інших ОЕС працюють у режимі автоматичного регулювання перетікання з або без коригування за частотою, тобто за своєю природою така організація регулювання частоти є централізованою.

За умов роботи ОЕС України в ізольованому режимі (таблиця) спостерігається збільшення діапазону зміни частоти порівняно з попереднім випадком. Це обумовлено тим, що в умовах переходу ОЕС України на ізольовану роботу значно зменшується значення коефіцієнта сумарної крутизни с.ч.х. ОЕС України, який змінюється в діапазоні (1800-2000) МВт/Гц залежно від поточного режиму вітчизняної ОЕС [3]. Відповідно зменшення сумарної крутизни с.ч.х. призводить до збільшення відхилення частоти в ОЕС України (вибірки № 4 і 5). Як видно з таблиці, порівняно з паралельною роботою ОЕС України з ЄЕС/ОЕС, за умов ізольованої роботи вітчизняної ОЕС, також спостерігається

деяке збільшення середньоквадратичного відхилення (СКВ) частоти, яке відповідно становить 0,0204 Гц (вибірка №4) проти 0,0151 Гц (вибірка №2).

Як видно з таблиці, також є цікавою зміна частоти за умов синхронної роботи ОЕС України з ENTSO-E (вибірка №5). Частота змінюється майже в таких же межах, як і за умов ізольованої роботи ОЕС України, при цьому СКВ частоти (0,0214 Гц) навіть дещо перевищує СКВ (0,0204 Гц) за умов ізольованої роботи вітчизняної ОЕС (вибірка №4). Такий значний діапазон зміни частоти обумовлений відмінностями організації регулювання частоти та активної потужності в ЄЕС/ОЕС та ENTSO-E. Як зазначено вище, в ЄЕС/ОЕС використовуються централізований підхід. В той же час в ENTSO-E діє плюралістичний підхід, який полягає у децентралізації регулювання частоти та активної потужності в масштабах енергооб'єднання. В таких умовах першочерговою задачею є забезпечення заданих міжсистемних перетікань потужності між учасниками ринку з дотриманням встановлених цільових параметрів якості частоти енергооб'єднання. Це також підтверджується графіком зміни частоти в ОЕС України (за умов її синхронної роботи з ENTSO-E), який наведено на рис. 2.

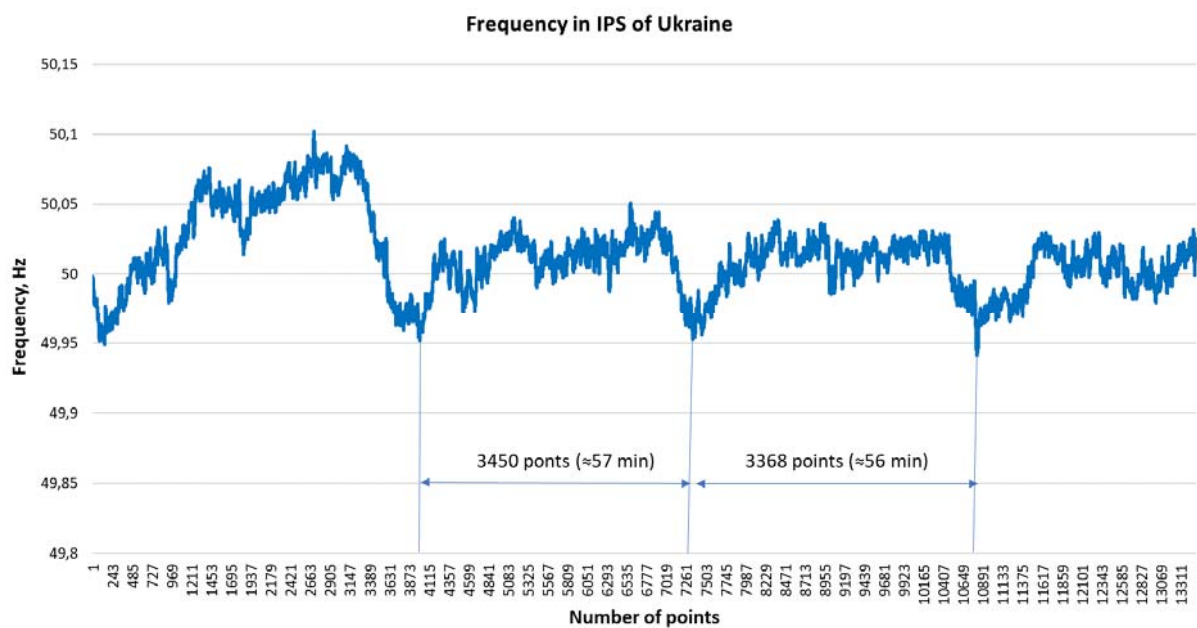


Рис. 2

Як видно з рис. 2, для кожної години протягом декількох хвилин спостерігається систематичне відхилення частоти від номінального значення. Така особливість поведінки частоти в ENTSO-E називається детермінованими відхиленнями частоти (Deterministic Frequency Deviations) [5]. Їхня поява пов'язана з переходом від централізованого формування графіку покриття навантаження до ринкових механізмів торгівлі електроенергією. Ринки електроенергії в ENTSO-E в основному функціонують на погодинних інтервалах. В таких умовах генерація працює за правилами ринку та забезпечує відпуск законтракованого значення електричної енергії в заданому діапазоні часу. В той же час значення потужності споживання в реальному часі не враховується. Таким чином під час переходу від однієї години до іншої відбувається перерозподіл генерації, що супроводжується завантаженням одних та розвантаженням інших генеруючих потужностей. При цьому ринком не враховуються особливості різних типів генерації, такі як швидкість набору та зміна потужності. Під час переходів від однієї години до іншої можуть виникати значні небаланси потужності внаслідок несинхронізованого розкладу ринку та реального значення споживання потужності, що і викликають детерміновані відхилення частоти в енергосистемі ENTSO-E (рис. 2). З метою зменшення таких небалансів потужності можуть бути використані маневрені потужності генерації або установки зберігання енергії BESS. Але це потребує певного розвитку ринку допоміжних послуг в Європі.

З метою визначення розподілу частоти для трьох режимів роботи ОЕС України в роботі побудовані гістограми для відповідної вибірки (sample), які наведено на рис. 3-7. В кожній гістограмі визначено кількість «знаходження» частоти у відповідному діапазоні (з кроком 0,01 Гц) в межах мінімальних і максимальних значень. Як свідчать отримані результати статистичного аналізу, розподіл частоти для усіх вибірок відповідає нормальному закону розподілу. Про це також свідчить коефіцієнт детермінації (*R-square*), значення якого наближується до одиниці. За умов паралельної роботи ОЕС

Україні з ЄЕС/ОЕС найбільша кількість знаходження частоти спостерігається в діапазоні (49,99-50,01) Гц, як це видно з рис. 3 та 4.

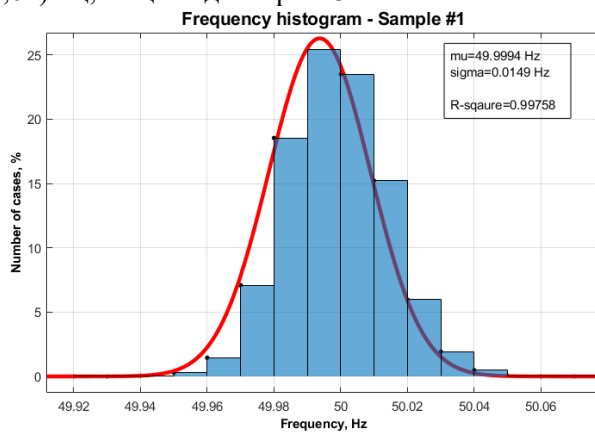


Рис. 3

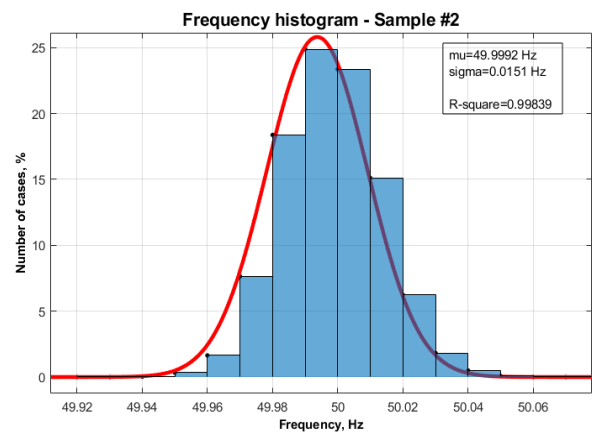


Рис. 4

У разі переходу ОЕС України до ізолюваного режиму роботи гістограма частоти дещо «сповторюється», як це видно з рис. 5 та 6. Особливо це спостерігається для вибірки №3 (рис. 5), для якої найбільша кількість зміни частоти припадає на діапазони (49,98-49,99) Гц та (50,01-50,02) Гц, при цьому значення коефіцієнта детермінації зменшується до 0,93043. Така ж сама ситуація спостерігається і для вибірки №4 (рис. 6).

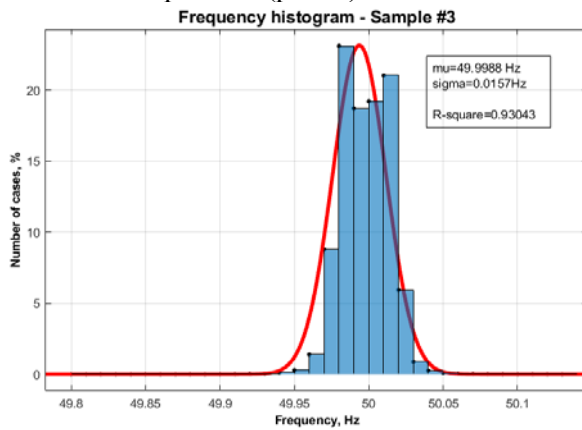


Рис. 5

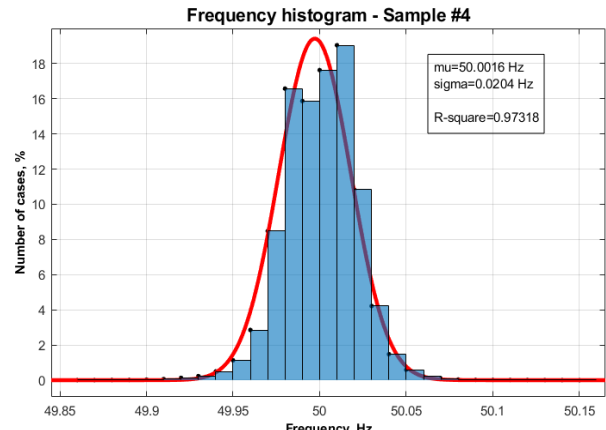


Рис. 6

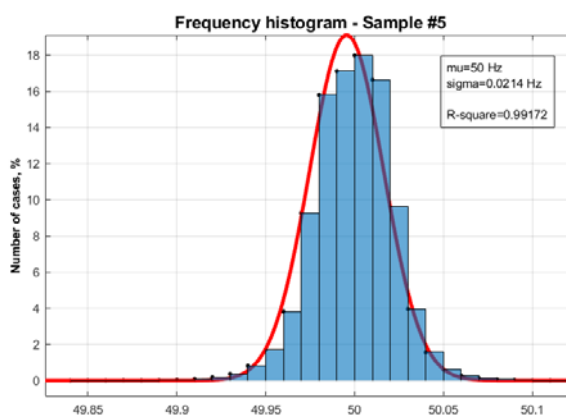


Рис. 7

За умов синхронної роботи ОЕС України з ENTSO-E зміна частоти також визначається нормальним законом розподілу, при цьому для більшості випадків частота змінюється близько до номінального значення (рис. 7).

Порівнюючи гістограми, які наведено на рис. 3 і 4, а також на рис. 7, що відповідає синхронній роботі ОЕС України з ENTSO-E, видно, що в останньому випадку спостерігається зменшення кількості випадків знаходження частоти близько до 50 Гц, а також розширення діапазону зміни частоти, що обумовлено, як зазначено вище, детермінованими відхиленнями частоти в енергосистемі ENTSO-E [5].

Таким чином, як свідчать отримані результати аналізу зміни частоти, для трьох режимів роботи ОЕС України, що розглядаються, якість регулювання частоти є задовільною відповідно до вимог [1]. В той же час, з метою дослідження процесів регулювання частоти та активної потужності, в умовах синхронної роботи ОЕС України з ENTSO-E, які можуть бути проведені у майбутньому, потребує удосконалення розрахункова модель ОЕС України, її валідація за даними натурних випробу-

вань в ізолюваному режимі, а також моделі САРЧП з урахуванням існуючого стану електростанцій, які беруть участь у первинному та вторинному регулюванні частоти та контрольованого перетину між блоком Україна-Молдова та ENTSO-E.

*Роботу виконано за держбюджетною темою “Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E” (шифр «Режим-2»), КПКБК 6541230.*

## ANALYSIS OF FREQUENCY CHANGE IN THE IPS OF UKRAINE UNDER DIFFERENT REGIMES OF ITS OPERATION

O.V. Kyrylenko<sup>1</sup>, V.V. Pavlovskiy<sup>1</sup>, A.O. Steliuk<sup>1</sup>, O.V. Lenga<sup>1</sup>, V.B. Zaychenko<sup>2</sup>, Yu.G. Lykhovyd<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy Ave, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,  
e-mail: [astelyuk@gmail.com](mailto:astelyuk@gmail.com).

<sup>2</sup>National power company “Ukrenergo”,  
S. Petlyury str., 25, Kyiv, 01032, Ukraine.

*The article presents the main analysis results of the frequency change in the interconnected power system (IPS) of Ukraine under the conditions of its isolated operation, as well as synchronous operation with the UPS/IPS and ENTSO-E. The reasons for the change in the maximum and minimum values are considered, as well as the frequency histograms for the above modes of operation of the IPS of Ukraine are presented. References 5, tables 1, figures 7.*

**Keywords:** frequency, control quality, interconnected power system, statistical analysis, histogram.

1. ENTSO-E Operation Handbook. Policy 1. Load-Frequency Control and Performance. 28 p. URL: [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/publications/entsoe/Operation\\_Handbook/Policy\\_1\\_Appendix%20final.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_Appendix%20final.pdf) (access date 01.08.2022).
2. Kyrylenko O.V., Pavlovsky V.V., Steliuk A.O. AGC Software Model Validation for Identification of Renewables Impact on Frequency Control in the IPS of Ukraine. International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Kyiv, Ukraine, June 2-6, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874166>
3. Pavlovskiy V.V., Steliuk A.O., Lukianenko L.M. Analysis of the frequency change in IPS of Ukraine in case of the generating unit disconnection of the nuclear power plant. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 89-94. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.089>.
4. Berkovich M.A., Komarov A.N., Semenov V.A. Background of the power system automation. Moskva: Energoatomizdat, 1981. 352 p. (Rus)
5. Deterministic frequency deviations – root causes and proposals for potential solutions. A joint EURELECTRIC – ENTSO-E response paper. 2011. URL: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/120222\\_Deterministic\\_Frequency\\_Deviations\\_joint\\_ENTSOE\\_Eurelectric\\_Report\\_Final\\_.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/120222_Deterministic_Frequency_Deviations_joint_ENTSOE_Eurelectric_Report_Final_.pdf) (access date 01.08.2022).

Надійшла 30.08.2022