

УДК 621.316

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА РИНКУ ДОПОМІЖНИХ ПОСЛУГ ОБ'ЄДНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

П. Д. ЛЕЖНЮК\*, С. В. КРАВЧУК, Ю. В. МАЛОГУЛКО, І. О. ПРОКОПЕНКО

кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА  
\*e-mail: lezhpd@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Впровадження систем накопичення та подальшого переносу електроенергії досить важлива задача, що вирішується у різних країнах по різному, виходячи з типів продуктів, що можуть надаватись системами накопичення енергії. Аналіз структури генерувальних потужностей в Об'єднаній електроенергетичній системі України показує значний дефіцит маневрових потужностей, серед яких на сьогодні є тепла генерація, що має значний рівень зношеності основного генеруючого обладнання та гідроелектростанції. Виходячи з вищенаведеного логічного було б припустити, що з запуском нової моделі ринку електроенергії, будуть сформовані такі сегменти ринку, на яких цінові сигнали стануть привабливими для інвестицій в нові маневрові потужності. Проте, на сьогоднішній день формування таких сигналів, обмежено встановленням верхніх цінових індексів на балансуємому та ринку на добу наперед. Отже, для моделювання роботи систем накопичення енергії, був обраний ринок допоміжних послуг, на якому системний оператор закуповує послуги у постачальників допоміжних послуг. Моделювання роботи систем накопичення енергії для надання допоміжних послуг задача багатокритеріальна, що враховує як технічні особливості роботи системи накопичення енергії, так і відповідні цінові індекси, що були сформовані для кожного виду послуги. У роботі розглянута можливість надання послуг з автоматичного резерву відновлення частоти та надання послуг балансування. На основі статистичних даних по роботі ринку допоміжних послуг об'єднаної електроенергетичної системи України розроблено математичну модель, що дозволяє оцінити ефект від використання систем накопичення енергії, для надання послуг з первинного, вторинного та третинного регулювання частоти. Визначено взаємозв'язки між ціновими індексами на ринку допоміжних послуг та техніко-економічними характеристиками роботи системи накопичення енергії. Запропонована в математичній моделі роботи системи накопичення енергії цільова функція, що враховує приведені витрати на накопичення одиниці електроенергії, витрат на обслуговування та отримання доходу від надання послуг на ринку допоміжних послуг.

**Ключові слова:** ринок допоміжних послуг; система накопичення енергії; резерв підтримки частоти; резерв відновлення частоти

## MATHEMATICAL MODELING OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE ADDITIONAL SERVICE MARKET OF THE UNITED ELECTRIC POWER SYSTEM OF UKRAINE

P. LEZHNIUK, S. KRAVCHUK, Y. MALOGULKO, I. PROKOPENKO

Department of the power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, UKRAINE

**ABSTRACT** The introduction of battery energy storage systems and the subsequent transfer of electricity is a very important task, which is solved in different countries in different ways, based on the types of products that can be provided by battery energy storage systems. The analysis of the structure of generating capacities in the United Electric Power System of Ukraine shows a significant deficit of shunting capacities, among which today there is thermal generation, which has a significant level of wear of the main generating equipment and hydroelectric power plants. Based on the above, it would be logical to assume that with the launch of a new model of the electricity market; market segments will be formed in which price signals will be attractive for investment in new shunting capacity. However, the formation of such signals is limited by the establishment of upper price indices on the additional service market and market day ahead. Thus, to simulate the operation of battery energy storage systems, the additional service market was chosen in which the system operator purchases services from additional service providers. Modeling the operation of battery energy storage systems for the provision of additional services is a multi-criteria task that takes into account both the technical features of the battery energy storage systems and the relevant price indices that have been formed for each type of service. The paper considers the possibility of providing services from the automatic reserve of frequency recovery and the provision of balancing services. Based on statistical data on the additional service market of the integrated power system of Ukraine, developed a mathematical model to assess the effect of the use of battery energy storage systems to provide services for primary, secondary and tertiary frequency control. The relationship between the price indices of additional service market and technical and economic characteristics of the battery energy storage system are determined. The target function is offered in the mathematical model of operation of the battery energy storage systems, which takes into account the reduced costs for the accumulation of a unit of electricity, maintenance costs and income from the provision of services on the additional service market.

**Keywords:** additional service market; battery energy storage system; frequency support reserve; frequency recovery reserve

### Вступ

Значний приріст генерування відновлювальних джерел енергії (далі – ВДЕ), що значно залежить від мінливих погодних умов, а також значний ступінь

старіння основного генеруючого обладнання теплових електростанцій (далі – ТЕС) змушує фахівців галузі переглянути структуру генерувальних потужностей [1].

Висока заповненість графіка навантаження об'єднаної електроенергетичної системи України (далі – ОЕС України), базовою генерацією атомних електростанцій (далі – АЕС), при поступовому зменшенню обсягів генерації гідроелектростанцій та гідроакумуляційних електростанцій (далі – ГЕС та ГАЕС відповідно), змушує фахівців галузі переглянути структуру генерувальних потужностей енергосистеми України.

Впровадження нової моделі ринку електроенергії, дало змогу поділити товар (електроенергію) на певні продукти, що надаються на різних сегментах ринку, які мають різну ціну в залежності від затребуваності в конкретну годину [2,3]. Від уміння керувати власним джерелом генерування чи споживання значним чином залежить фінансовий результат роботи на ринку [4–7].

Так у [8], відмічено, що на сьогоднішній день для забезпечення операційної безпеки роботи енергосистеми необхідно запровадити щонайменше 400 МВт "гнучких" генерувальних потужностей. Як наслідок, Оператор системи передачі (далі – ОСП), запровадив низку аукціонів з закупівлі резервів потужності для первинного, вторинного та третинного регулювання частоти.

Оператор системи передачі визначає обсяги послуг та продуктів на ринку допоміжних послуг (далі – РДП), що необхідні для стабільної роботи електроенергетичної системи. Закон України про ринок електроенергії визначає 5 основних продуктів, що можуть торгуватись на РДП [9,10], зокрема:

*з регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України:*

– резерв підтримки частоти (РПЧ). Процес підтримки частоти полягає в утриманні частоти та зменшенні відхилень частоти від номінального значення незалежно від причини та місця виникнення небалансу в синхронній зоні, за рахунок активації резервів підтримки частоти;

– резерв відновлення частоти (РВЧ). Процес відновлення частоти полягає у поверненні частоти до номінального значення при одночасному поверненні міждержавних обмінів до планових значень (при синхронній роботі з енергосистемами інших держав) шляхом зведення помилки області регулювання до нуля протягом часу відновлення частоти (не більше 15 хвилин), а також у відновленні активованого РПЧ шляхом активації резервів відновлення частоти. Час введення в дію (повної активації) РВЧ не більше 15 хвилин; стійка видача РВЧ не менше 60 хвилин;

– резерв заміщення (РЗ). Для підтримання заданих величин РПЧ і РВЧ та відновлення цих резервів у разі їх використання в процесі регулювання частоти в ОЕС України/блоці регулювання/синхронній області має здійснюватися процес заміщення резервів і створюватися резерви заміщення. Час введення в дію (повної активації) РЗ не більше 30 хвилин; стійка видача РЗ не обмежується у часі.

*з підтримання параметрів надійності та якості електричної енергії в ОЕС України:*

– послуга з регулювання напруги та реактивної потужності. Метою Регулювання напруги та реактивної потужності в режимі синхронного компенсатора (СК) є підтримка рівнів напруги в контрольних точках системи передачі у визначених КСП допустимих межах з метою підтримання стійкості та безпеки енергосистеми (області регулювання) шляхом забезпечення та використання резерву реактивної потужності генеруючих одиниць, здатних переходити в режим СК;

– послуга із забезпечення відновлення функціонування ОЕС України після системних аварій. Метою послуги є можливість пуску одиниці генерації в умовах відсутності напруги в зовнішній мережі та електричне розташування в мережі, що дозволяє здійснити передачу виробленої енергії на власні потреби АЕС (ТЕС) з урахуванням втрат електричної енергії в мережі, а також наявність одиниці генерації у плані відновлення «ОЕС України»/«острову Бурштинської ТЕС» після особливої системної аварії (та/або регіональних планах відновлення).

Потенційно, одним з основних учасників на РДП в частині постачальників послуг з регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України можуть бути оператори системи накопичення енергії (далі – СНЕ).

Проте, на сьогоднішній день нормативними актами не врегульоване питання приєднання електроустановок такого типу до мереж операторів систем, а також відсутнє визначення – система накопичення енергії. В рамках цієї статті, посилаючись на Проект Закону про внесення змін до Закону України «Про ринок електричної енергії» (щодо енергетичної безпеки, балансування енергосистеми та системи накопичення енергії), розуміємо, що:

– система накопичення енергії – технологічний комплекс, приєднаний до системи передачі чи розподілу з метою відбору, накопичення, у тому числі шляхом перетворення (фізичні, інерційні, хімічні, водневі та інші технології) раніше виробленої електричної енергії, її зберігання та подальшого відпуску;

– оператор системи накопичення енергії – суб'єкт господарювання, який використовує систему накопичення електричної енергії для купівлі-продажу електричної енергії на ринку електричної енергії, та надає допоміжні послуги і є відповідальним за безпечну експлуатацію та технічне обслуговування такої системи накопичення енергії.

Таким, чином, на сьогоднішній день, для реалізації нового суб'єкта на ринку електроенергії – оператора системи накопичення, актуальною є задача розробки математичної моделі роботи СНЕ на ринку. Дана задача є техніко-економічною, що повинна враховувати зміну ціни на ринку допоміжних послуг ОЕС України та визначати такий графік роботи СНЕ

на ринку, що принесе максимальну рентабельність його власнику та мінімізує штрафні санкції при невідповідності виконання команд диспетчера ОСП.

### Мета роботи

Метою статті є розробка математичної моделі роботи системи накопичення енергії на ринку допоміжних послуг, що забезпечить максимальну рентабельність роботи системи накопичення енергії.

### Виклад основного матеріалу

Відповідно до положень Закону України «Про ринок електричної енергії» ст. 8 господарська діяльність з виробництва, передачі, розподілу електричної енергії, постачання електричної енергії споживачу, трейдерська діяльність, здійснення функцій оператора ринку та гарантованого покупця проводиться на ринку електричної енергії за умови отримання відповідної ліцензії.

Пунктом 1.6 Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з виробництва електричної енергії, затверджених постановою НКРЕКП від 27 грудня 2017 р. № 1467 (далі – Ліцензійні умови) передбачено, щодо заяви про отримання ліцензії здобувачем ліцензії надається, зокрема відомість про місце та засоби провадження господарської діяльності з виробництва електричної енергії.

При цьому, згідно із пунктом 1.4. Ліцензійних умов:

– електрогенеруюче обладнання – комплекс функціонально взаємопов'язаного устаткування, що здійснює виробництво електричної енергії та складається з одного або більшої кількості генераторів чи іншого обладнання, що використовується для перетворення енергетичних ресурсів будь-якого походження на електричну енергію;

– засоби провадження господарської діяльності – електрогенеруюче обладнання, розташоване на об'єкті електроенергетики, та інше функціонально взаємопов'язане з ним устаткування і споруди що призначаються для виробництва електричної енергії.

Також слід зазначити, що система накопичення енергії є електрохімічною системою, в яких реалізуються функції накопичувачів електричної енергії. Системи накопичення енергії, як джерело електричної енергії застосовують в пристроях, апаратах або системах, дія яких заснована на автономному принципі функціонування, тобто незалежно від наявності у безпосередньої близькості електричної мережі. В акумуляторах під час зарядки електрична енергія перетворюється в хімічну і система знаходиться в рівновазі доти, доки між електродами протікає навіть дуже малий струм. При підключенні контактів системи накопичення енергії до споживача електричної енергії (елементу з кінцевим електричним опором) відбувається зворотний процес: хімічна енергія перетворюється в

електричну – при цьому частина її перетворюється в тепло.

Таким чином, особливості систем накопичення енергії є те, що в залежності від режиму роботи, вона може бути, як споживачем електричної енергії так і здійснювати відпуск електричної енергії в мережу, а отже однозначно віднести систему накопичення енергії до генеруючої одиниці не вбачається можливим.

Враховуючи зазначене, Законом України «Про ринок електричної енергії» діяльність пов'язана із накопиченням, зберіганням та подальшою реалізацією електричної енергії системи накопичення електричної енергії чітко не визначена. Відповідно до діючих Ліцензійних умов, ліцензування господарської діяльності системи накопичення електричної енергії не передбачено. Крім цього, згідно Кодексів систем розподілу та передачі затверджених постановами НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 309 та № 310 надання оператором системи розподілу, або передачі послуг з приєднання до електричних мереж системи накопичення енергії не передбачена, що, в свою чергу, унеможливує діяльність таких систем на ринку електричної енергії та надання відповідних послуг.

Законодавче забезпечення впровадження систем накопичення електричної енергії має здійснюватися з дотриманням принципів європейської політики та законодавства. Так, при прийнятті у грудні 2018 р. Загальних рекомендацій щодо політики цілей на 2030 рік для Договірних Сторін Енергетичного Співтовариства, однією з яких є Україна, Радою Міністрів Енергетичного Співтовариства анонсовано початок роботи щодо включення актів 4-го Енергетичного пакету законодавства ЄС (Clean Energy Package) до складу законодавства Енергетичного Співтовариства (Energy Community acquis), що стане обов'язковим для транспозиції та імплементації Договірними Сторонами.

Директива (ЄС) 2019/944 Європейського Парламенту та Ради від 05 червня 2019 року щодо спільних правил внутрішнього ринку електричної енергії (далі – Директива), що входить до складу Clean Energy Package, визначає основні вимоги щодо розвитку та участі систем накопичення на ринку електричної енергії.

### Математична модель роботи СНЕ на організованих сегментах ринку

З урахуванням положень Директиви ключовим при опрацюванні питання законодавчого забезпечення впровадження систем накопичення електричної енергії: беззастережне дотримання ринкових принципів розвитку та участі систем накопичення електричної енергії на ринку електричної енергії, уникнення створення для таких систем необґрунтованих економічних та регуляторних переваг.

Цільова функція має бути спрямована на досягнення максимального прибутку за звітній період. Загальний прибуток в загальному складається з доходів та витрат та формується таким чином, щоб визначити оптимальні умови роботи СНЕ при різних сценаріях формування ціни на послуги, що надаються:

$$P_{sum.pr} = \left( \sum_s p_s \sum_t \left( R_{s(t)}^{PDH} + R_{s(t)}^{PDP} - C_t^{dP} - C_t^{DOD} \right) - C^{OM} \right) \rightarrow \max \quad (1)$$

де  $p_s$  – імовірність виникнення сценарію  $s$  з відповідною ціною на послуги СНЕ;  $R_{s(t)}^{PDH}$  – дохід від надання послуг на РДН у сценарії  $s$  в годину  $t$ ;  $R_{s(t)}^{PDP}$  – дохід від надання послуг на РДП у сценарії  $s$  в годину  $t$ ;  $C_t^{dP}$  – вартість задіяння накопичувача на РДН/ВДР та РДП;  $C_t^{DOD}$  – вартість деградації накопичувача при допустимій глибині розряду та нижче допустимого рівня;  $C^{OM}$  – витрати на сервісне обслуговування.

Таким чином, оператор системи накопичення може заздалегідь передбачити низку сценаріїв  $s$  ринкової ціни та оцінювати різні ймовірності виникнення таких сценаріїв  $p_s$ , використовуючи дані попередніх та поточного розрахункового періоду  $t$ . Такий підхід дає можливість прогнозувати техніко-економічні показники роботи системи накопичення енергії.

Дохід від реалізації електроенергії на ринку на добу наперед або внутрішньодобовому ринку  $R_{s(t)}^{PDH}$  досягається за рахунок закупівлі електроенергії в нічний час доби, коли ринок має профіцит генерації (тобто ціна низька) та реалізації в денний час доби коли ціна висока. Ще одним джерелом надходження є надання послуг РДП  $R_{s(t)}^{PDP}$ , що позначають дохід від реалізації послуг з первинного, вторинного та третинного регулювання відповідного сценарію  $s$  за годину  $t$ , відповідно.

Витратна частина (1) складається з вартості задіяння накопичувача на РДН/ВДР та РДП –  $C_t^{dP}$  при наданні відповідних послуг, вартості деградації накопичувача при допустимій глибині розряду та нижче допустимого рівня  $C_t^{DOD}$ , а також витрат на сервісне обслуговування –  $C^{OM}$ .

Доходи з реалізації послуг на РДП та РДН визначаються за формулами 2 та 3 відповідно.

$$R_{s(t)}^{PDH} = p_{s(t)} W_{s(t)} \Delta t \quad (2)$$

де  $p_{s(t)}$  – ймовірність виникнення сценарію  $s$ ;  $W_{s(t)}$  – фінансовий результат з купівлі-продажу електроенергії на ринку в часовий проміжок  $\Delta t$ .

$$R_{s(t)}^{PDP} = b_t^{reg} + R_{s(t)}^{redPDP} \quad (3)$$

$$b_t^{reg} = p_{s(t)} w_{s(t)}^{PDP} P_{s(t)}^{PDP} \quad (4)$$

де  $w_{s(t)}^{PDP}$  – загальний обсяг електроенергії, що продається/купується на ринку допоміжних послуг;  $P_{s(t)}^{PDP}$  – ціна електроенергії на РДП у сценарії  $s$  в годину  $t$ ;  $R_{s(t)}^{redPDP}$  – плата за готовність надання послуги на ринку допоміжних послуг;  $b_t^{reg}$  – плата за обсяг електроенергії, що був реалізований на ринку допоміжних послуг.

Вартість задіяння потужностей СНЕ на ринках на РДН/ВДР та РДП  $C_t^{dP}$  при наданні відповідних послуг, що пропорційна обсягу електроенергії, яка була використана накопичувачем (як в режимі заряду так і розряду), згідно (5).

$$C_t^{dP} = C_{op} \left[ (b_t^{e.sell} + b_t^{e.buy}) \Delta t \right] \quad (5)$$

де  $C_{op}$  – ціна задіяння СНЕ при купівлі-продажу одиниці електроенергії;  $b_t^{e.sell}$  – електроенергія, що була продана на ринку електроенергії за проміжок часу  $\Delta t$ ;  $b_t^{e.buy}$  – електроенергія, що була куплена на ринку електроенергії за проміжок часу  $\Delta t$ .

Вартість, що враховує погіршення стану  $v$ -того накопичувача, яким керує оператор розподіленого СНЕ –  $C_t^{DOD}$ , визначається відповідно до виразів (6-9):

$$Y_{v(t)} = p_{v(t)}^{reg} / \eta_v^{dsg} \quad (6)$$

$$\sigma_{v(t)} = p_{v(t)}^{reg} \eta_v^{chg} \quad (7)$$

$$C_t^{DOD} = \sum_{v \in V} C_{v(t)}^{DOD} \quad (8)$$

$$C_{v(t)}^{DOD} = \frac{C_{v(t)}^{CHE} \left| \frac{M_{v(t)}}{100} \left[ \sum_{t \in T} \left( P_{v(t)}^{e.dsg} \Delta t + p_{v(t)}^{e.chg} \Delta t + Y_{v(t)} + \sigma_{v(t)} \right) \right] \right|}{E_v} \quad (9)$$

де  $E_v$  – повна ємність СНЕ, кВт\*год;  $\eta_v^{dsg}$  та  $\eta_v^{chg}$  – ефективність заряду та розряду  $v$ -того накопичувача, відповідно;  $p_{v(t)}^{reg}$  – команда на регулювання (розряду/заряду) в період  $t$ ;  $P_{v(t)}^{e.dsg}$  – потужність при якій за час  $t$   $v$ -тий СНЕ повністю розрядиться;  $p_{v(t)}^{e.chg}$  – потужність при якій за час  $t$   $v$ -тий СНЕ повністю зарядиться;  $\sigma_{v(t)}$  – обсяг електроенергії, відповідно до команди на розвантаження, яким заряджають  $v$ -тий СНЕ, в період часового ряду  $t$ ;  $Y_{v(t)}$  – обсяг електроенергії, відповідно до команди на завантаження, яким розряджають  $v$ -тий СНЕ, в період часового ряду  $t$ ;  $C_{v(t)}^{CHE}$  – вартість  $v$ -того накопичувача, що враховує рівень його деградації –  $M_{v(t)}$ .

Вартість сервісного обслуговування  $v$ -того СНЕ  $C^{OM}$  залежить від ціни обслуговування одиниці

потужності СНЕ та сумарної потужності розподілених СНЕ –  $P_{\max}$  визначаються як

$$C^{OM} = c_{om} P_{\max}, \quad (10)$$

$$P_{\max} = \sum_{v \in I'} P_{v, \max}$$

де  $c_{om}$  – ціна обслуговування одиниці потужності СНЕ, грн;  $P_{v, \max}$  – номінальна потужність  $v$ -того накопичувача.

Загальна ціна за електроенергію визначається проданою та купленою електроенергією, що проілюстровано у виразі (11).  $v$ -тий накопичувач протягом певного періоду часового ряду  $t$  не можна одночасно заряджати та розряджати, отже  $P_{v(t)}^{e.dsg}$  та  $P_{v(t)}^{e.chg}$  не можуть обидва бути позитивними. Однак, через те, що існує багато розподілених СНЕ, технічно можливо, щоб оператор системи накопичення продавав і купував електроенергію одночасно, при умові що за певний період часового ряду  $t$ , одна частина накопичувачів буде заряджатись, а інша – розряджатись. В оптимальному варіанті загальна ціна на електроенергію повинна розподілитися між

накопичувачами, як показано в (12) та (13). Загальний обсяг торгів на РДП наведено в (14).

$$W_{s(t)} = b_t^{e.sell} - b_t^{e.buy} \quad (11)$$

$$b_t^{e.sell} = \sum_{v \in I'} P_{v(t)}^{e.dsg} \eta_v^{dsg} \quad (12)$$

$$b_t^{e.buy} = \sum_{v \in I'} P_{v(t)}^{e.chg} / \eta_v^{chg} \quad (13)$$

$$b_t^{reg} = \sum_{v \in I'} P_{v(t)}^{reg} \quad (14)$$

### Модельовання роботи СНЕ на РДП

При приєднанні СНЕ до мереж ОСР та участі в балансуєчому ринку та ринку допоміжних послуг основне використання потужностей оператора СНЕ буде спрямовано на надання симетричної послуги аРВЧ 80%. Дане співвідношення прийнято з урахуванням технічних характеристик акумуляторів на основі LiFePO4 для них глибина розряду (Depth of Discharge, DOD) приймається на рівні 80%, що забезпечує оптимальну кількість циклів.

Загальний принцип балансування збурень ОС з використанням ДП наведено на рис. 1

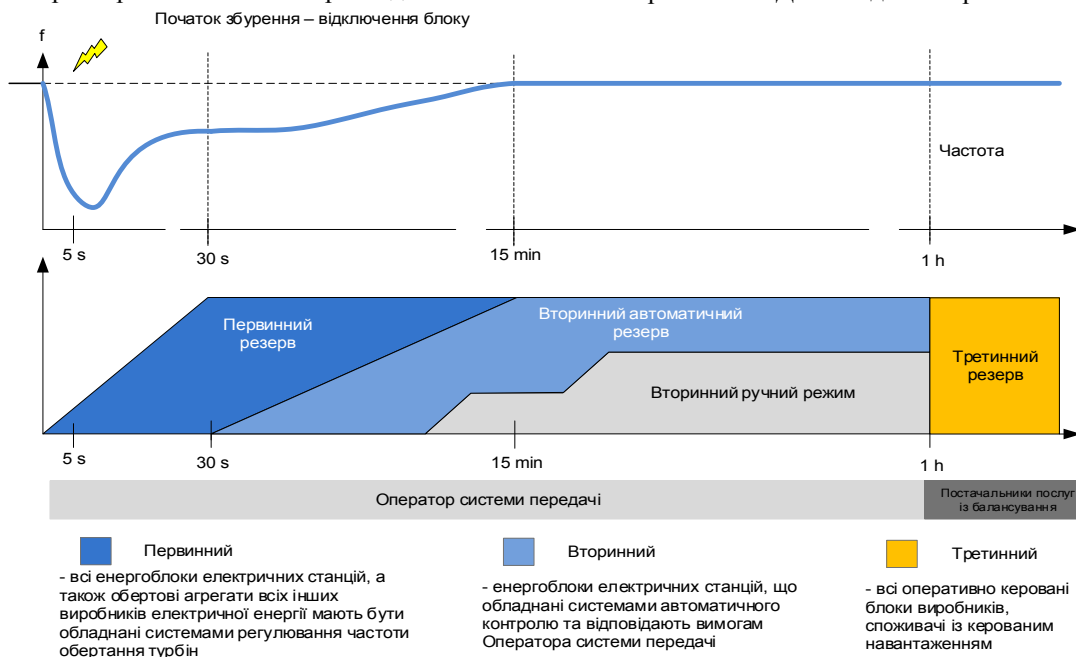


Рис. 1 – Принцип балансування збурень системи з використанням різних видів резервів

На сьогоднішній день на сайті НЕК «Укренерго» опубліковано аналіз роботи ринку електроенергії за серпень 2020 р. На рис. 2 наведено результати роботи РДП. В ОЕС України закупівля резервів підтримки частоти (РПЧ) в середньому 21 МВт на одну годину. Закупівля аРВЧ (автоматичних резервів відновлення частоти) протягом місяця була

волатильною через недостатній рівень пропозицій учасників даного ринку. В середньому, аРВЧ на завантаження було закуплено 31% – 71% від аукціонної потреби (у середньому 53%), на розвантаження – від 10% до 95% (в середньому – 58%) [11].

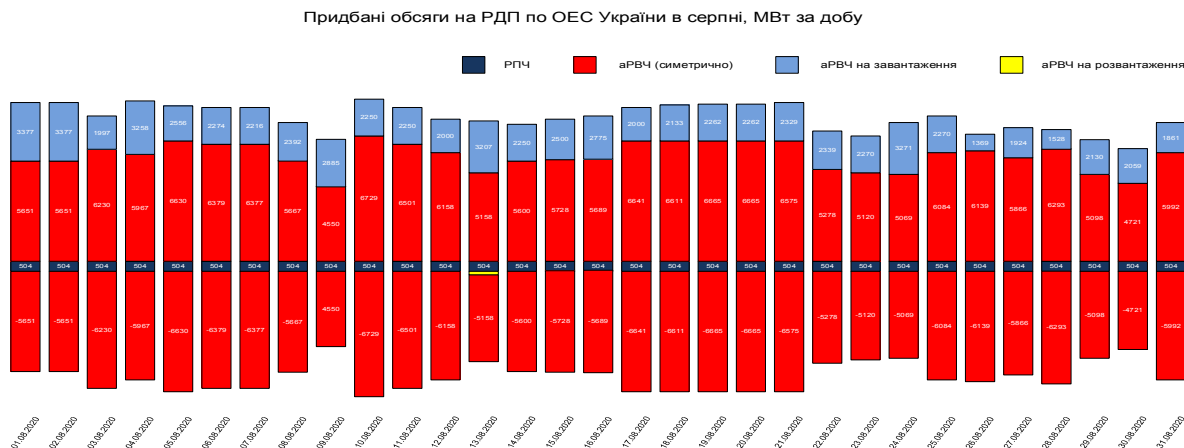


Рис. 2 – Результати роботи РДП за серпень 2020 року

Виходячи з вище наведеної інформації, СНЕ замовника буде приймати участь на РДП з використання  $\pm 0.4S_n$  для надання послуги з аРВЧ. При подачі заявки на симетричні послуги РПЧ та аРВЧ, обсяг вказується лише в одному з напрямків, при цьому ціна не має перевищувати величину, яка являє собою суму граничних цін на завантаження та на розвантаження ( $512,27 + 289,27 = 801,54$ ). Враховуючи, що на сьогоднішній день недостатній рівень пропозицій по аРВЧ, ціна за дану послугу приймається максимальна, 801,54 (грн/МВт без ПДВ).

Купівля та продаж електроенергії буде здійснюватися на балансуєчому ринку [12, 13] відповідно до Правил ринку електричної енергії України [14, 15], за цінами небалансу, ІМSP (грн/МВт\*год) [12], плата за передачу та розподіл (Вінницька область) складає 24 та 15 коп/кВт\*год відповідно.

Передбачається що СНЕ ємністю 5 МВт\*год та DOD 80% буде працювати на симетричних послугах наступним чином:

- 00:00–01:00 при першому включення в мережу СНЕ з «пустими» акумуляторами відбувається заряд установки шляхом купівлі електроенергії на БР

3,255 МВт\*год. В результаті ємність СНЕ буде складати 3,1 МВт.

3,255 МВт\*год складається з

- 2 МВт\*год – симетрична електроенергія при DOD 80%, тобто  $5 \cdot 0,8/2 = 2$  МВт\*год, яка буде використана для задіяння резерву аРВЧ;

- 1 МВт\*год – для забезпечення залишкової електроенергії в акумуляторах при DOD 80%, тобто  $5 \cdot (1 - 0,8) = 1$  МВт\*год;

- 0,155 кВт\*год – 5% втрати від 3,1 МВт\*год в режимі заряду.

- 01:00–02:00 за командою диспетчера відбувається задіяння резерву аРВЧ у мережу СНЕ видає 2 МВт\*год по вартості БР з отриманням плати за готовність. З врахуванням 5% втрат в інверторі з СНЕ буде використано 2,1 МВт\*год. В результаті ємність СНЕ складатиме 1 МВт\*год.

- 02:00–03:00 відбувається заряд установки шляхом купівлі електроенергії на БР 2,205 МВт\*год (0,105 МВт\*год складають 5%). У результаті ємність СНЕ складає 3,1 МВт\*год.

В наступні години СНЕ працює до кінця доби циклічно з погодинним розрядом/зарядом аналогічно періоду, описаного з 01:00 до 03:00 год. Повний розрахунок наведено на рис. 3.

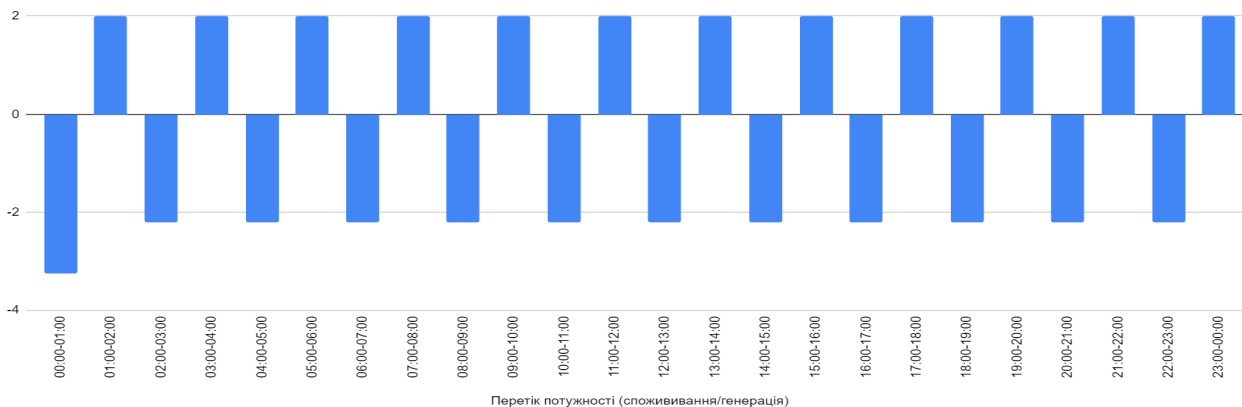


Рис. 3 – Розрахунок добового графіку роботи СНЕ

Сальдо перетоків за перший день складає – 3,51 МВт\*год, а за другий і всі наступні дні – 2,46 МВт\*год. У зв'язку з тим, що СНЕ у перший день починає працювати з нуля.

– Для СНЕ даної потужності та ємності дохід за добу складає 19 114,90 грн з урахуванням ПДВ (рис.4). Відповідно до проведених розрахунків середньодобове сальдо перетоків складає 2,495 МВт\*год.

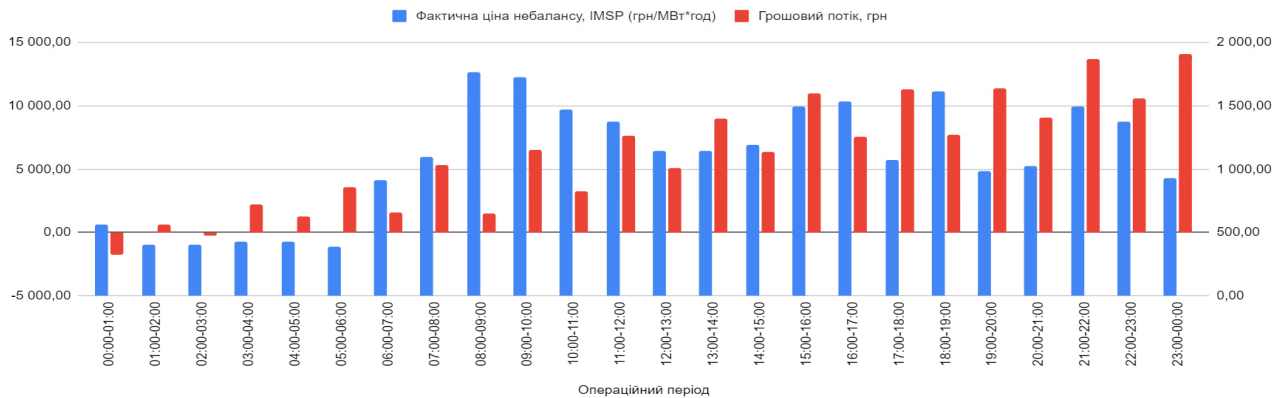


Рис. 4 – Графік зміни цін на балансуєчому ринку (права вісь) та зміни грошового потоку (ліва вісь) за добу

## Висновки

Передумовами впровадження систем накопичення енергії є постійний ріст обсягів негарантованої генерації ВДЕ та фактичне спрацювання свого паркового ресурсу значною частиною теплової генерації, що на сьогоднішній день, разом з гідроелектростанціями є основними засобами балансування енергосистеми. Такі фактори значно впливають на операційну безпеку роботи ОЕС України.

Оскільки впровадження нових технологій потребує капіталовкладень, в роботі розроблена математична модель функціонування накопичувача на ринку на добу наперед, балансуєчому та ринку допоміжних послуг, що дає змогу визначити термін окупності такого проекту під час надання допоміжних послуг оператору системи передачі.

## Список літератури

1. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В., Котилко І. В., Прокопенко І. О. Оцінювання якості електропостачання в локальних електричних системах з різнотипними відновлювальними джерелами енергії. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. 2018. Вип. 195. С. 23–25.
2. Блінов І. В., Парус Є. В., Іванов Г. А. Дослідження організації конкурентної моделі ринку електроенергії України з урахуванням мережевих обмежень в ОЕС України. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 34–39.
3. Кириленко О. В., Блінов І. В., Парус Є. В. Оцінка роботи електростанцій при наданні допоміжних послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 5. С. 55–60.
4. Feng L, Zhang J. N., Li G. J. [et al]. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation

- between wind and PV power. *Prot Control Mod Power Syst*. 2016. 1(1). doi: 10.1186/s41601-016-0021-1.
5. Chen Q., Liu D., Lin J. et al. Business models and market mechanisms of energy internet. *Power Syst Technol*. 2015. 11(39). doi: 10.1109/HICSS.2001.927035
6. Li H., Abinet T. E., Zhang J. H. et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables. *Prot Control Mod Power Syst*. 2017. 2(1). doi:10.1186/s41601-017-0040-6.
7. Vatanparvar K., Al Faruque M. A. Design Space Exploration for the Profitability of a Rule-Based Aggregator Business Model Within a Residential Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6. No. 3. P. 1167–1175. doi: 10.1109/TSG.2014.2380318.
8. Hidalgo-León R. et al. A survey of battery energy storage system (BESS), applications and environmental impacts in power systems. *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. 2017. P. 1–6. doi: 10.1109/ETCM.2017.8247485.
9. Wu D., Gui Q., Zhao W., Wang J., Shi S., Zhou Y. Battery Energy Storage System (BESS) Sizing Analysis of Bess-Assisted Fast-Charge Station Based on Double-Layer optimization Method. *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*. 2020. P. 658–662. doi: 10.1109/SCEMS48876.2020.9352324.
10. Актуальні Граничні ціни на ДП на 2020 рік. *НЕК Укренерго*. URL: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/04/Granychni-tsiny\\_2020\\_red3.pdf](https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/04/Granychni-tsiny_2020_red3.pdf) (дата звернення 26.04.2021).
11. Реєстр одиниць надання допоміжних послуг на 30.09.2020. *НЕК Укренерго*. URL: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/09/Reyestr-PDP\\_30.09.2020.pdf](https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/09/Reyestr-PDP_30.09.2020.pdf) (дата звернення 26.04.2021).
12. Деталі аукціонів згідно Графіка проведення аукціонів. *НЕК Укренерго*. URL: [https://ua.energy/uchasnikam\\_rinku/balansuyuchyj-rynok-ta-rynok-dopomizhnyh-poslug/dopomizhni-poslugy/auksiony-na-dopomizhni-poslugy-2020-j-rik/](https://ua.energy/uchasnikam_rinku/balansuyuchyj-rynok-ta-rynok-dopomizhnyh-poslug/dopomizhni-poslugy/auksiony-na-dopomizhni-poslugy-2020-j-rik/) (дата звернення 26.04.2021).
13. Результати ринку допоміжних послуг за серпень 2020 року (ОЕС України + Бурштин). *НЕК Укренерго*. URL: <https://ua.energy/peredacha-i->

dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dopomizhni-poslugy/ (дата звернення 26.04.2021).

14. Фактичні ціни небалансів. *НЕК Укренерго*. URL: [https://ua.energy/uchasnikam\\_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/#1590479495816-2c212666-d2fa](https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/#1590479495816-2c212666-d2fa) (дата звернення 26.04.2021).
15. Робота ринку електроенергії за серпень 2020 р. URL: <https://www.slideshare.net/Ukrenergo/2020-238748424> (дата звернення 26.04.2021).
16. Кодекс системи передачі. *Постанова НКРЕКП* від 14.03.2018 № 309.
17. Правила ринку. *Постанова НКРЕКП* від 14.03.2018 № 307.

#### References (transliterated)

1. Lezhnyuk P. D., Komar V. O., Kravchuk S. V., Kotylo I. V., Prokopenko I. O. Otsinyuvannya yakosti elektropostachannya v mistsevykh elektrichnykh systemakh z riznotypnymu vidnovlyuval'nymu dzherelamy enerhiyi [Evaluation of power supply quality in local electrical systems with different types of renewable energy sources] *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 2018, Iss. 195, pp. 23–25.
2. Blinov I. V., Parus Ye. V., Ivanov H. A. Doslidzhennya orhanizatsiyi konkurentnoyi modeli rynku elektroenerhiyi Ukrainy z urakhuvanniam merezhevykh обмеzen' v OES Ukrainy [Research of the organization of the competitive model of the electricity market of Ukraine taking into account network restrictions in the UES of Ukraine]. *Pr. Intu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, 2016, Iss. 45, pp. 34–39.
3. Kyrylenko O. V., Blinov I. V., Parus Ye. V. Otsinka roboty elektrostantsiy pry nadanni dopomizhnykh poslug z pervynnoho ta vtorynnoho rehulyuvannya chasto v OES Ukrainy [Evaluation of power plants in the provision of ancillary services for primary and secondary frequency control in the UES of Ukraine]. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2013, no. 5, pp. 55–60.
4. Feng L., Zhang J. N., Li G. J. [et al]. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power. *Prot Control Mod Power Syst.*, 2016, 1(1), doi: 10.1186/s41601-016-0021-1.
5. Chen Q., Liu D., Lin J. [et al]. Business models and market mechanisms of energy internet. *Power Syst Technol.*, 2015, 11(39), doi: 10.1109/HICSS.2001.927035.
6. Li H., Abinet T.E., Zhang J.H. [et al] Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables. *Prot Control Mod Power Syst.*, 2017, 2(1), doi:10.1186/s41601-017-0040-6.
7. Vatanparvar K., Al Faruque M. A. Design Space Exploration for the Profitability of a Rule-Based Aggregator Business Model Within a Residential Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, Vol. 6, no. 3, pp. 1167–1175, doi: 10.1109/TSG.2014.2380318.
8. Hidalgo-León R. [et al.] A survey of battery energy storage system (BESS), applications and environmental impacts in power systems. *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/ETCM.2017.8247485.
9. Wu D., Gui Q., Zhao W., Wang J., Shi S., Zhou Y. Battery Energy Storage System (BESS) Sizing Analysis of Bess-Assisted Fast-Charge Station Based on Double-Layer optimization Method. *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*, 2020, pp. 658–662, doi: 10.1109/SCEMS48876.2020.9352324.
10. Faktychni hranychni tsyny na DP na 2020 rik [Actual Marginal prices for SOEs for 2020] *NEK Ukrenerho*. Available at: [https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/04/Granychni-tsyny\\_2020\\_red3.pdf](https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/04/Granychni-tsyny_2020_red3.pdf) (accessed 26.04.2021).
11. Reyestr odynyts' nadannya dopomizhnykh poslug na 30.09.2020 [Register of ancillary services units on 30.09.2020] *NEK Ukrenerho*. Available at: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/09/Reyestr-PDP-30.09.2020.pdf> (accessed 26.04.2021).
12. Detali auktsioniv za dopomohoyu Hrafika provedennya auktsioniv [Details of auctions according to the Schedule of auctions]. *NEK Ukrenerho*. Available at: [https://ua.energy/uchasnikam\\_rinku/balansuyuchyj-rynk-ta-rynok-dopomizhnyh-poslug/dopomizhni-poslugy/auksiony-na-dopomizhni-poslugy-2020-j-rik/](https://ua.energy/uchasnikam_rinku/balansuyuchyj-rynk-ta-rynok-dopomizhnyh-poslug/dopomizhni-poslugy/auksiony-na-dopomizhni-poslugy-2020-j-rik/) (accessed 26.04.2021).
13. Rezul'taty rynku dopomizhnykh poslug za serpen' 2020 roku (OES Ukrainy + Burshtyn) [Results of the market of ancillary services for August 2020 (UES of Ukraine + Amber)]. *NEK Ukrenerho*. Available at: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dopomizhni-poslugy/> (accessed 26.04.2021).
14. Faktychni tsyny nebalansiv [Actual imbalance prices]. *NEK Ukrenerho*. Available at: [https://ua.energy/uchasnikam\\_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/#1590479495816-2c212666-d2fa](https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/#1590479495816-2c212666-d2fa)
15. Robota rynku elektroenerhiyi za serpen' 2020 roku <https://www.slideshare.net/Ukrenergo/2020-238748424> (accessed 26.04.2021).
16. Kodeks systemy peredachi [Transmission System Code]. *Postanova NKREKП* of 14.03.2018 no. 309
17. Pravyła rynku [Market rules]. *Postanova NKREKП* of 14.03.2018 no. 307.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Лежнюк Петро Дем'янович** – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: lezhpd@gmail.com.

**Petro Lezhnyuk** – Doctor of Technical Sciences (Ph. D), professor, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: lezhpd@gmail.com.

**Кравчук Сергій Васильович** – кандидат технічних наук, асистент, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: sv.kravchuk@ukr.net.

**Sergey Kravchuk** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), assistant, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: sv.kravchuk@ukr.net.

**Малогулко Юлія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: malogulko.y.v@vntu.edu.ua.



**Yulia Malogulko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Senior Lecturer, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: malogulko.y.v@vntu.edu.ua.

**Прокопенко Ігор Олександрович** – аспірант, Вінницький національний технічний університет, асистент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: delfin11071994@gmail.com.

**Ihor Prokopenko** – Postgraduate, Vinnitsa National Technical University, assistant of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: delfin11071994@gmail.com.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю так:*

Лежнюк П. Д., Кравчук С. В., Малогулко Ю. В., Прокопенко І. О. Математичне моделювання роботи системи накопичення енергії на ринку допоміжних послуг об'єднаної електроенергетичної системи України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 21-29. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04.

*Please cite this article as:*

Lezhniuk P., Kravchuk S., Malogulko Y., Prokopenko I. Mathematical modeling of battery energy storage systems in the additional service market of the united electric power system of Ukraine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2(8), pp. 21-29, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Лежнюк П. Д., Кравчук С. В., Малогулко Ю. В., Прокопенко И. А. Математическое моделирование системы накопления энергии на рынке вспомогательных услуг объединенной электроэнергетической системы Украины. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 21-29 doi:10.20998/2413-4295.2021.02.04.

**АННОТАЦІЯ** Внедрение систем накопления и дальнейшего переноса электроэнергии достаточно важная задача, которая решается в разных странах по-разному, исходя из типов продуктов, которые могут предоставляться системами накопления энергии. Анализ структуры генерирующих мощностей в Объединенной электроэнергетической системе Украины показывает значительный дефицит маневровых мощностей, среди которых на сегодня является тепловая генерация, имеет значительный уровень износа основного генерирующего оборудования и гидроэлектростанции. Исходя из вышеприведенного, логично было бы предположить, что запуском новой модели рынка электроэнергии, будут сформированы такие сегменты рынка, на которых ценовые сигналы станут привлекательными для инвестиций в новые маневровые мощности. Однако, на сегодняшний день, формирования таких сигналов, ограничено установлением верхних ценовых индексов на балансирующем рынке и рынке на сутки вперед. Итак, для моделирования работы систем накопления энергии, был избран рынок вспомогательных услуг, на котором системный оператор закупает услуги у поставщиков вспомогательных услуг. Моделирование работы систем накопления энергии для оказания вспомогательных услуг задача многокритериальная, учитывающая как технические особенности работы системы накопления энергии, так и соответствующие ценовые индексы, которые были сформированы для каждого вида услуги. В работе рассмотрена возможность предоставления услуг автоматического резерва восстановления частоты и услуг балансировки. На основе статистических данных по работе рынка вспомогательных услуг объединенной электроэнергетической системы Украины разработана математическая модель, позволяющая оценить эффект от использования систем накопления энергии, для предоставления услуг с первичного, вторичного и третичного регулирования частоты. Определены взаимосвязи между ценовыми индексами на рынке вспомогательных услуг и технико-экономическими характеристиками работы системы накопления энергии.

**Ключевые слова:** рынок вспомогательных услуг; система накопления энергии; резерв поддержки частоты; резерв восстановления частоты

Надійшла (received) 30.04.2021