

**МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ
ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ****І.В. Блінов^{1*}**, докт. техн. наук., **Д.О. Олефір^{2**}**, **Є.В. Парус^{1***}**, канд. техн. наук¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: blinovihor@gamil.com; paruseugene@gmail.com² АТ «Оператор ринку»,

вул. Петлюри Симона, 27, Київ, 01032, Україна,

e-mail: olefir.do@gmail.com

Наведено опис моделі участі ПрАТ «Укргідроенерго» каскаду гідроелектростанцій в сегментах ринку електричної енергії з урахуванням обмежень на використання наявних гідроресурсів. Представлено структуру моделі, наведено цільову функцію максимізації вигоди від продажу електричної енергії та систему обмежень рівності і нерівності, якою враховуються економічні й технічні характеристики обладнання електростанцій, а також баланс гідроресурсів. Показано особливості врахування цін у сегментах ринку електричної енергії. Описано основні технологічні обмеження гідроагрегатів та електростанцій. Відображено структуру системи обмежень на використання гідроресурсів з урахуванням визначеної постановкою задачі потреби зміни рівнів заповнюваності водосховищ. Наведено основні підходи до використання запропонованої моделі під час розв'язання задач планування стратегії залучення гідроелектростанцій до участі на торгах ринку електричної енергії. Бібл. 16, рис. 2.

Ключові слова: ринок електричної енергії, оптимізація, гідроелектростанція, допоміжні послуги, балансуєчий ринок, водосховище.

Вступ. Впровадження в Україні у 2019 році моделі сегментів конкурентної торгівлі електричною енергією [1, 2] разом із зростанням частки відновлюваних джерел енергії в балансі ОЕС України [3, 4] принципово змінили підходи до роботи гідроелектростанцій (ГЕС) та ГАЕС в нових умовах. Якщо у попередній моделі оптового ринку виробнича діяльність ГЕС регламентувалася потребами балансування режимів ОЕС України, у новій ринковій моделі ПрАТ «Укргідроенерго» (як і для інших виробників електричної енергії) надано можливість самостійного планування стратегії участі в організованих ринкових сегментах [5-7] та на ринку допоміжних послуг (РДП) [8-10]. Окрім виконання покладених спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії [1], ПрАТ «Укргідроенерго» також ведуть економічну діяльність в усіх ринкових сегментах. Технологічні особливості плотинних ГЕС визначили ці електростанції як основного постачальника послуги відновлення частоти на РДП України та активного учасника балансуєчого ринку (БР). Крім того, ГЕС найчастіше отримують від диспетчерської служби аварійні заявки на завантаження чи розвантаження генераторів. Така активна участь ГЕС у процедурах підтримки операційної безпеки режимів [11-13] ОЕС України призводить до суттєвих відхилень фактично використаних обсягів гідроресурсів від планових показників. Це, у свою чергу, призводить до незапланованих змін рівнів заповнюваності водосховищ поза допустимими межами. Зокрема для Дніпровського каскаду ГЕС в Україні набуває особливої актуальності задача не тільки планування, але і оперативного коригування стратегії участі в ринкових сегментах з огляду на потреби відновлення планових показників рівнів наповнення водосховищ. Складність планування роботи ГЕС та ГАЕС на БР та РДП полягає у тому, що водосховища ГЕС розташовані каскадом на річках, і їхні гідрорежими залежать від погодних метеоумов, кількості опадів, точності прогнозування гідроресурсів, спрацювання того чи іншого водосховища, встановлених Міжвідомчою комісією по узгодженню режимів роботи дніпровських та

Дністровського водосховищ водогосподарських обмежень (позначки водосховищ, санітарно-екологічні пропуски води, пропуск паводків, тощо). Крім того, під час планування рівня наповненості окремого водосховища слід враховувати водні баланси водосховищ вверх по руслу ріки.

Метою статті є побудова моделі оптимального функціонування каскаду ГЕС з урахуванням як технологічних обмежень щодо використання наявних гідроресурсів, так і балансів попиту/пропозиції у сегментах ринку електричної енергії України.

Цільова функція задачі оптимізації. Основна економічна ціль функціонування каскаду ГЕС – максимізація різниці між сумарною вигодою від продажу електричної енергії та послуг в ринкових сегментах $Prof_{\Sigma}$ та сумарними витратами, пов'язаними із виробництвом і продажом електричної енергії та послуг $Cost_{\Sigma}$

$$Prof_{\Sigma} - Cost_{\Sigma} \rightarrow \max .$$

В межах публікації під вигодою розумітиметься загально прийняте в міжнародних публікаціях означення доходу від комерційної діяльності без врахування податкових платежів.

Сумарна вигода від продажу електричної енергії та послуг в кожному j -му ринковому сегменті розраховується окремо для кожного i -го генератора ГЕС. Такий підхід дає змогу точно врахувати особливості кожного генератора ГЕС та приведені до цього генератора витрати, пов'язані з виробничою діяльністю та участю у ринкових сегментах

$$\sum_j \sum_i (Prof_{h,i}^{(j)} - Cost_{h,i}^{(j)}) \rightarrow \max . \quad (1)$$

Для окремого i -го генератора ГЕС на розрахунковий період часу h вигода від продажу електричної енергії чи послуг у j -му ринковому сегменті подається залежностями

$$Prof_{h,i}^{(j)} = C_{h,i}^{(j)} \cdot V_{h,i}^{(j)} , \quad (2)$$

де $C_{h,i}^{(j)}$, $V_{h,i}^{(j)}$ – відповідно ціна у j -му ринковому сегменті та проданий у цьому ринковому сегменті обсяг електричної енергії на розрахунковий період h , проданий у j -му ринковому сегменті.

В (2) взаємно пов'язуються значення цін та обсягів для ринкових сегментів, що накладає окремі умови на вибір розрахункового періоду. Оскільки торгівля електричною енергією в ринкових сегментах України здійснюється на окремі години доби, то і задачу оптимізації (1) слід прив'язувати до погодинних ринкових цін. Тоді результати торгів на БР та РДП на кожен «одиницю реального часу» (15 хвилин) не складно приводити до середньозважених за розрахункову годину значень. Крім того, слід зважати на добову циклічність обсягів споживання електричної енергії та ринкових цін. Тому задачу оптимізації (1) доцільно розв'язувати використанням погодинних цін у ринкових сегментах із формуванням добового балансу гідроресурсів, а за потреби – із врахуванням ринкової кон'юнктури окремо у робочі та вихідні дні

$$\sum_{h=1}^{24} \left(\sum_j \sum_i (Prof_{h,i}^{(j)} - Cost_{h,i}^{(j)}) \right) \rightarrow \max .$$

В задачах довгострокового планування (2) застосовується з використанням середньозважених за місяць (чи навіть за сезон року) цін із формуванням водного балансу на розрахунковий рік.

Слід також зауважити, що ПрАТ «Укргідроенерго» на торгах ринку електричної енергії реалізує сумарні для всіх ГЕС обсяги відпуску електричної енергії. І наведене у (2) розділення сумарного відпуску електричної енергії окремим i -м генератором на окремі цінові пропозиції по кожному ринковому сегменту призначене для індивідуалізації витрат на виробництво електричної енергії цим генератором та витрат на участь у торгових сегментах ринку електричної енергії. Таким чином, подані кожним генератором ГЕС у кожному ринковому сегменті обсяги електричної енергії чи резерви потужностей для надання допоміжних послуг є змінними оптимізації у цільовій функції (1). При цьому постійні витрати ГЕС, які не залежать від кількості працюючих генераторів та обсягів відпуску електричної енергії, в (1) не враховуються. За результатами оптимізації (1) не складно розрахувати сумарні обсяги відпуску електричної енергії для окремого генератора, для ГЕС, для каскаду ГЕС чи для ПрАТ «Укргідроенерго» загалом, а також визначити окремо сумарні обсяги пропозиції електричної енергії по кожному ринковому сегменту. За потреби зменшення розмірності задачі оптимізації, група однотипних генераторів окремої ГЕС подається еквівалентним гідроагрегатом із сумарною потужністю цієї групи. Тоді за результатами оптимізації (1) додатково слід розв'язати задачу оптимального розподілу сумарної потужності ГЕС по окремим генераторам станції. Цільова функція (1) доповнюється системою обмежень рівності та нерівності, якими

визначаються технічні і економічні характеристики, а також рівняння балансу витрат гідроресурсів, починаючи від витрат води для окремого гідрогенератора і закінчуючи водним потоком для всього каскаду ГЕС (рис. 1). Розглянемо детальніше основні складові системи рівностей та нерівностей.

Моделі ринкових сегментів. Моделі ринкових сегментів [14-16] використовуються для означення цін на електричну енергію чи послуги в ринкових сегментах. Для більшості задач імітаційного моделювання допустимо без погіршення точності розрахунків прийняти припущення про відсутність впливу пропонованими каскадом ГЕС обсягами електричної енергії на ціни у відповідних ринкових сегментах. У цьому випадку для розрахунків можливо використовувати ретроспективні дані щодо цін та тарифів на ринку електричної енергії. За потреби вплив обсягів пропозиції електричної енергії чи послуг на ринкові ціни враховується з використанням відповідних засобів імітаційного моделювання процесів ціноутворення у відповідних ринкових сегментах, як наприклад в [7, 8].

Технологічні обмеження ГЕС. Система технологічних обмежень визначає можливості фактичної роботи окремих гідрогенераторів та електростанцій в частині обсягів генерації електричної енергії за розрахунковий період. Так для кожного гідрогенератора визначається обмеження мінімального та максимального рівнів завантаження. Таке обмеження стосується виключно технологічних характеристик гідрогенератора та не залежить від періоду доби чи особливостей режимів українських енергосистем. Крім того, для ГЕС може бути визначений сумарний максимум генерування електричної енергії. У загальному випадку технологічний максимум завантаження ГЕС розраховується як сума технологічних максимумів, доступних для роботи протягом розрахункового періоду h гідрогенераторів. Крім того, значення максимального рівня завантаження ГЕС на розрахунковий період h може бути додатково обмежене максимальним рівнем відпуску електричної енергії з огляду на режимні обмеження електроенергетичних систем України.

Обмеження балансу гідроресурсів. Найбільш важливою складовою моделі участі каскаду ГЕС на ринку електричної енергії України є система рівнянь балансу гідроресурсів. Система рівнянь балансу гідроресурсів пов'язує технічні та економічні характеристики технологічного устаткування на рівнях від окремого гідрогенератора до каскаду ГЕС.

Обсяг електричної енергії на розрахунковий період h для i -го гідрогенератора забезпечується витратами води відповідно до технічних характеристик відповідного генератора

$$V_{h,i}^{IT} = \frac{F_{h,i}^{IT}}{Y_{h,i}^{IT}} \text{ (МВт·год)},$$

де $F_{h,i}^{IT}$ – заданий на розрахунковий період h притік води для ГЕС (м^3); $Y_{h,i}^{IT}$ – технологічні витрати води на виробництво електричної енергії для i -го гідрогенератора ($\text{м}^3/(\text{МВт}\cdot\text{год})$).

Тоді плановий баланс витрат води для i -го гідрогенератора на розрахунковий період h визначається як

$$F_{h,i}^{IT} = \sum_j (V_{h,i}^{(j)} \cdot Y_{h,i}^{IT}),$$

де $V_{h,i}^{(j)}$ – обсяги електричної енергії, вироблені i -м гідрогенератором за розрахунковий період h , які виставляються на торги у ринковому сегменті j .

На рівні s -ї ГЕС водний баланс враховує сумарні витрати води всіх задіяних гідрогенераторів

$$F_{h,s}^{IEC} = \sum_i F_{h,i}^{IT}.$$

Водний баланс на рівні s -ї ГЕС формується на основі загального балансу системи «ГЕС – водосховище»

$$\begin{cases} F_{\min,s}^{BC} \leq F_{h,s}^{BC} + F_{h,s}^{PB} + \Delta F_{h,s}^{PBC} - F_{h,s}^{IEC} \leq F_{\max,s}^{BC}, \\ F_{h,s}^{can} \leq F_{h,s}^{IEC} \end{cases},$$

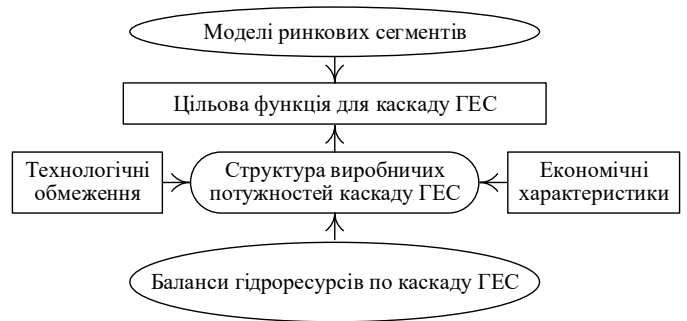


Рис. 1

де $F_{h,s}^{ПВ}$ – заданий на розрахунковий період h притік води для s -ї ГЕС; $F_{h,s}^{BC}$ – початковий для розрахункового періоду h обсяг води у водосховищі s -ї ГЕС; $F_{\min,s}^{BC}$ – мінімально допустимий обсяг заповнення водосховища s -ї ГЕС; $F_{\max,s}^{BC}$ – максимально допустимий обсяг заповнення водосховища s -ї ГЕС; $F_{h,s}^{can}$ – санітарний стік води на розрахунковий період h для s -ї ГЕС; $F_{h,s}^{ГЕС}$ – розрахункова на період h витрата води для s -ї ГЕС; $\Delta F_{h,s}^{PBC}$ – плановий на кінець розрахункового періоду h обсяг збільшення/зменшення рівня заповнення водосховища для s -ї ГЕС.

Водний баланс на рівні каскаду ГЕС відображає послідовний ланцюг, вузлами якого є системи «водосховище+ГЕС». Для кожного вузла цієї системи додатково враховуються проміжний відбір води на господарські потреби навколишніх територій та додатковий притік до основного русла води з менших річок (рис. 2). Система рівнянь водного балансу для каскаду із S ГЕС на розрахунковий період h має наступний вигляд:

$$\begin{cases} F_{h,s}^{ПВ} = F_{h,s}^{ОПВ} + F_{h,s}^{ДПВ} - F_{h,s}^{ВПВ} \\ F_{h,s}^{ОПВ} = \begin{cases} 0 : s=1 \\ F_{h,s-1}^{ГЕС} : \forall s > 1 \end{cases} \quad \forall s \in S, \end{cases}$$

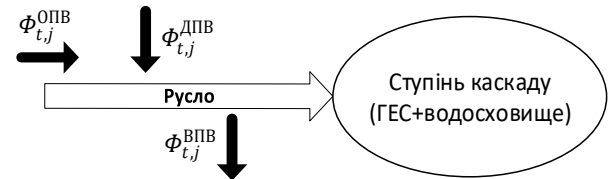


Рис. 2

де $F_{h,s}^{ОПВ}$ – заданий на розрахунковий період h

основний потік води для s -ї ГЕС; $F_{h,s}^{ДПВ}$ – заданий на

розрахунковий період h додатковий потік води для s -ї ГЕС; $F_{h,s}^{ВПВ}$ – заданий на розрахунковий період h проміжний відбір потоку води для s -ї ГЕС.

Система рівнянь водного балансу для каскаду ГЕС сформована виходячи із наступного принципу. Обсяг потоку води по руслу ріки для s -ї ГЕС прирівнюється до витрат води на ГЕС попереднього $s - 1$ ступеня: $F_{h,s}^{ОПВ} = F_{h,s-1}^{ГЕС}$. Згідно із цією концепцією обсяг потоку води по руслу ріки для ГЕС початкового (нульового) ступеня у каскаді прирівнюється нулю.

Постановка задачі оптимізації функціонування каскаду ГЕС. Оптимізація функціонування окремої ГЕС на розрахунковий період h виконується із дотриманням запланованого на кінець розрахункового періоду обсягу заповнення водосховища для кожної ГЕС у каскаді. Проте, ГЕС активно надають значні обсяги допоміжних послуг. При цьому обсяги фактичної активації послуг можуть суттєво відрізнятись від попередньо зарезервованих. В результаті невідповідності планово зарезервованих та фактично наданих обсягів допоміжних послуг, а також внаслідок активної участі ГЕС у сегменті БР, з часом збільшується різниця між запланованим на фактичними обсягами заповнення водосховища ГЕС. Крім того, на відхилення значень фактичного рівня заповнення водосховища від запланованих значень додатково впливають неточні прогнози обсягів основного і додаткового потоків води, а також неточні прогнози обсягів відбору води на господарські потреби.

В результаті виникає потреба у додатковому розв'язанні задачі оптимізації роботи каскаду ГЕС в частині компенсації різниці між плановим та фактичним обсягами заповнення водосховища. Тоді постановка задачі оптимізації здійснюється означенням коригувального обсягу зміни заповнення водосховища $\Delta F_{h,s}^{PBC}$

$$\Delta F_{h,s}^{PBC} = F_{h,s}^{BC} - F_{h,s}^{ГЕС}.$$

Таким чином, використання запропонованої моделі дає змогу ПрАТ «Укргідроенерго» оперативно коригувати стратегію участі у сегментах ринку електричної енергії в умовах відхилення значень фактичних обсягів заповнення водосховища від планових ще до завершення планового розрахункового періоду часу. Слід зважати, що коригувальний обсяг зміни наповнення водосховища у загальному випадку використовується за будь-якої постановки задачі планування роботи каскаду ГЕС з метою приведення рівнів наповнення водосховищ до деяких «цільових» значень. Під потребою у додатковому розв'язанні задачі оптимізації розуміються ситуації, коли показники наповнення водосховищ значно відхиляються від запланованих значень і необхідно змінювати режим роботи каскаду ГЕС для уникнення виходу цих значень за допустимі мінімальні чи максимальні межі. Наведена математична модель у загальному вигляді має достатньо складну систему обмежень та цільову функцію з великою кількістю змінних оптимізації. Ряд припущень дає змогу отримати лінійну модель, яка достатньо просто розв'язується методами лінійної оптимізації. За потреби

врахування нелінійних чинників така лінійна модель використовується у циклі рекурсії чи ітерацій. Проте опис методики розв'язання оптимізаційної задачі виходить за межі даної публікації.

Висновки. Запропонована модель оптимального використання ресурсів ГЕС в сегментах ринку електричної енергії дає змогу максимізувати вигоду від роботи каскаду ГЕС за рахунок оптимального використання виробничих потужностей з огляду на технічні характеристики силового устаткування гідроелектростанцій та обмеження, пов'язані з використанням водних ресурсів. Модель призначена для розв'язання задач планування та оперативного коригування діяльності каскаду ГЕС з урахуванням потреби відновлення балансу гідроресурсів у водосховищах вздовж русла ріки та поточної кон'юнктури на ринку електричної енергії. Використання запропонованої моделі дозволяє максимізувати економічний ефект від діяльності каскаду ГЕС з дотриманням у допустимих межах рівнів заповнюваності водосховищ. Подальше удосконалення моделі у напрямку врахування особливостей функціонування різних сегментів ринку електричної енергії надасть змогу підвищити економічну ефективність як діяльності роботи ГЕС, так і функціонування ринку електричної енергії в цілому.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Науково-технічні засади розвитку та керованості сегменту розосереджених джерел енергії в структурі генеруючих потужностей електро-енергетичних систем («СЕГМЕНТ»)», КПКВК 6541230.

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII.
2. Blinov I., Tankevych S. The harmonized role model of electricity market in Ukraine. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems* (IEPS 2016). Kyiv, Ukraine, June 7-11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521861>.
3. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>.
4. Басок Б.І., Буткевич О.Ф., Дубовський С.В. Техніко-економічні аспекти оцінювання перспектив декарбонізації об'єднаної енергосистеми України. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.055>.
5. Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП № 307 від 14.03.2018.
6. Про затвердження правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку: Постанова НКРЕКП № 308 від 14.03.2018.
7. Blinov I., Kurylenko O., Parus E., Rybina O. Decentralized Market Coupling with Taking Account Power Systems Transmission Network Constraints. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. Vol. 388. Pp. 1-21. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_1
8. 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.
9. Pavlovsky V., Steliuk A., Lenga O., Hrechko V. Frequency stability of the bulk isolated power system with high share of renewables and nuclear generation. In the book: *Power systems research and operation. Selected problems*. Springer, 2021. 180 p. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-82926-1_8 (дата доступу 15.04.2022).
10. Blinov I., Parus E. Approach of Reactive Power Pricing for Ancillary Service of Voltage Control in Ukraine., IEEE International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems* (IEPS). Kyiv, Ukraine, June 2-6, 2014. Pp. 145-148. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874167>
11. Кулик М.М., Кириленко О.В. Стан та перспективи гідроенергетики України. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 56-64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.056>.
12. Kundur P. *Power system stability and control*. McGraw-Hill Inc, 1994. 1199 p.
13. Machowski J., Bialek J., Bumby J. *Power system dynamics. Stability and Control*. John Wiley&Sons, 2012. 629 p.
14. Saukh S., Borysenko A. Representation of Transmission and Distribution Networks in the Mathematical Model of the Electricity Market Equilibrium. IEEE 20th International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering* (CPEE). Lviv-Slavske, Ukraine, September 15-18, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE47179.2019.8949116>.
15. Lin J., Magnago F. *Electricity Markets: Theories and Applications*. Wiley-IEEE Press, 2017. 352 p.
16. Momoh J., Mili L. *Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems*. John Wiley&Sons, Inc., 2009. 277 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470529164>.

MODEL OF OPTIMAL USE OF HYDRO POWER PLANTS IN THE ELECTRICITY MARKET

I.V. Blinov¹, D.O. Olefir², Ye.V. Parus¹

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: blinovihor@gmail.com; paruseugene@gmail.com.

² JSC «Market Operator»,

Petliura Simon Street, 27, Kyiv, 01032, Ukraine, e-mail: olefir.do@gmail.com.

A mathematical model for optimizing the activity of the PJSC «Ukrhydroenergo» cascade of hydroelectric power plants in the segments of the electricity market is described. This model is built taking into account the limitations on the use of available water resources. The structure of the mathematical model as an objective function of maximizing the benefits of electricity sale and the system of restrictions of equality and inequality is presented. This function takes into account the economic and technical characteristics of power plant equipment, as well as the balance of hydro resources. Peculiarities of taking into account prices in electricity market segments are shown. The main technological constraints of hydraulic units and power plants are described. The structure of the system of restrictions on the use of water resources is reflected, taking into account changes in the levels of reservoir occupancy. The main approaches to the use of the proposed model to solve the problems of planning the participation of the cascade of hydropower plants in the auction of the electricity market are presented. References 16, figures 2.

Keywords: electricity market, optimization, hydroelectric power plant, ancillary services, balancing market, water reservoir.

1. On Electricity Market: The Law of Ukraine. No 2019-VIII of 13.04.2017. (Ukr)
2. Blinov I., Tankevych S. The harmonized role model of electricity market in Ukraine. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems* (IEPS 2016). Kyiv, Ukraine, June 7-11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521861>.
3. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Baseyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of Ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>. (Ukr)
4. Basok B.I., Butkevych O.F., Dubovskiy S.V. Technical and economic aspects of decarbonisation prospects assessing of the interconnected power system of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 5. Pp. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.055>. (Ukr)
5. On Approval of Market Rules: NEURC's Resolution KP No 307 of March 14, 2018. (Ukr)
6. On Approval of Day Ahead Market and Intraday market: NEURC's Resolution No 308 of March 14, 2018. (Ukr)
7. Blinov I., Kyrylenko O., Parus E., Rybina O. Decentralized Market Coupling with Taking Account Power Systems Transmission Network Constraints. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. Vol. 388. Pp. 1-21. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_1
8. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V. Operation evaluation of power plants in the provision of ancillary services of primary and secondary frequency control in the Ukrainian power system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 5. Pp. 55-60. (Ukr)
9. Pavlovsky V., Steliuk A., Lenga O., Hrechko V. Frequency stability of the bulk isolated power system with high share of renewables and nuclear generation. In the book: *Power systems research and operation. Selected problems*. Springer, 2021. 180 p. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-82926-1_8 (accessed at 15.04.2022).
10. Blinov I., Parus E. Approach of Reactive Power Pricing for Ancillary Service of Voltage Control in Ukraine., IEEE International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems* (IEPS). Kyiv, Ukraine, June 2-6, 2014. Pp. 145-148. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874167>
11. Kulyk M.M., Kyrylenko O.V. The state and prospects of hydroenergy of Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 4. Pp. 56-64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.056>. (Ukr)
12. Kundur P. *Power system stability and control*. McGraw-Hill Inc, 1994. 1199 p.
13. Machowski J., Bialek J., Bumby J. *Power system dynamics. Stability and Control*. John Wiley&Sons, 2012. 629 p.
14. Saukh S., Borysenko A. Representation of Transmission and Distribution Networks in the Mathematical Model of the Electricity Market Equilibrium. IEEE 20th International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering* (CPEE). Lviv-Slavske, Ukraine, September 15-18, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE47179.2019.8949116>.
15. Lin J., Magnago F. *Electricity Markets: Theories and Applications*. Wiley-IEEE Press, 2017. 352 p.
16. Momoh J., Mili L. *Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, Inc., 2009. 277 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470529164>.

Надійшла 28.04.2022

Остаточний варіант 13.06.2022