

О. Г. ГРИБ, І. Т. КРАПАЛЮК, С. В. ШВЕЦЬ, Т. С. ДОНЕЦЬКА, О. В. ДЯЧЕНКО

ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ УКРАЇНИ ТА ЇХ ЗНИЖЕННЯ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Розглядається питання щодо втрат електричної енергії в енергетичній системі України. Показано тенденції зміни величини втрат за останні роки у бік зростання. Таке збільшення втрат призвело не тільки до фіксації суто технічних параметрів, а й призвело до фінансових втрат у країні та споживачів на десятки мільярдів гривень. Показано статистичні дані щодо рівня загальносвітових втрат електричної енергії, що показує загальносвітову тенденцію у зменшенні величин втрат. Тенденцію щодо зниження втрат реалізують усі розвинені країни. Дані щодо втрат електроенергії корелюють з економічним розвитком країни. Значні величини втрат є ознакою негативних явищ економіки, і навпаки, малі величини втрат є ознакою стійкого економічного стану. Було проаналізовано структуру втрат. Запропоновано загальне подання втрат, яке отримало графічне представлення у вигляді діаграми, де розглядаються два види втрат електричної енергії: технологічні та комерційні. Такий поділ на групи втрат дозволив відокремити проаналізовані частини. Розглянуто саме ті види втрат, на які є найменший сторонній вплив людини, такі як крадіжки, руйнування обладнання, неплатежі та ін. Природа таких впливів не є технічною, тому вони не розглядалися. Проведено паралель між рівнем зносу обладнання та рівнем втрат електроенергії. Показано логічний ланцюжок, щоб зменшити втрати необхідно оновити обладнання. Енергетична система включає різні елементи і є дуже розгалуженою. Її можна виміряти не лише значною кількістю елементів обладнання, а й вартістю цих елементів. Загальна вартість енергетичної системи дуже значна, і провести енергопереоснащення можливо лише поетапно. Пропонується виділити елементи енергосистеми, які найбільш чутливі з погляду їхнього впливу на втрати, для яких переозброєння було б логічно проводити насамперед. Однак, виходячи з міжнародного досвіду, запропоновано, при плануванні відновлення енергосистеми відразу прийняти найперспективніший напрямок, а саме не звичайне переобладнання мереж за рахунок встановлення нового обладнання, а зробити якісний крок по впровадженню системи постійного струму в низьковольтних мережах до 10 кВ включно. Що за дослідженнями європейських вчених дозволить суттєво знизити втрати, підвищити керованість мереж, підвищити якість електричної енергії.

Ключові слова: втрати електричної енергії, структура втрат, низьковольтні мережі, постійний струм, споживач, електрична станція.

O. GRUB, I. KRAPALYUK, S. SHVETS, T. DONETSKA, O. DIACHENKO

LOSSES OF ELECTRIC ENERGY IN THE ENERGY SYSTEM OF UKRAINE AND THEIR REDUCTION DUE TO THE INTRODUCTION OF DIRECT CURRENT

The issue of losses of electrical energy in the energy system of Ukraine is considered. Tendencies of changes in the value of losses in the direction of growth in recent years are shown. Such an increase in losses led not only to the fixation of purely technical parameters, but also led to financial losses in the country and consumers in the amount of tens of billions of hryvnias. Statistical data on global losses of electrical energy are shown, showing a global trend in reducing the magnitude of losses. The trend to reduce losses is being implemented by all developed countries. Data on electricity losses correlate with the economic development of the country. Significant losses are a sign of negative phenomena in the economy, and vice versa, small losses are a sign of a stable economic condition. The structure of losses was analyzed. A general representation of losses has been proposed, which has received a graphical representation in the form of a diagram, where two types of electrical energy losses are considered: technological and commercial. Such a division into groups of losses made it possible to separate the analyzed parts. It is precisely those types of losses that are least affected by extraneous human impact, such as theft, destruction of equipment, non-payments, etc., are considered. The nature of such influences is not technical, so they were not considered. A parallel is drawn between the level of equipment wear and the level of electricity losses. A logical chain is shown, in order to reduce losses it is necessary to upgrade the equipment. The energy system includes different elements and is very branched. It can be measured not only by a significant number of equipment items, but also by the cost of these items. The total cost of the energy system is very significant, and it is only possible to carry out energy re-equipment in stages. It is proposed to identify the elements of the energy system that are most sensitive in terms of their impact on losses, for which it would be logical to carry out rearmament in the first place. However, based on international experience, it was proposed that when planning the restoration of the power system, immediately take the most promising direction, namely, not the usual re-equipment of networks through the installation of newer equipment, but to take a qualitative step towards introducing a DC system in low-voltage networks up to 10 kV inclusive. Which, according to the studies of European scientists, will significantly reduce losses, increase the controllability of networks, and improve the quality of electrical energy.

Keywords: electrical energy losses, structure of losses, low-voltage networks, direct current, consumer, electric power station.

Постановка проблеми. Одна із основних проблем енергетичного комплексу України – це втрати електричної енергії. Величина втрат не є постійною величиною, вона змінюється не тільки від сезону до сезону в межах одного року, але й між роками. В Україні величина втрат за останні роки змінюється в сторону збільшення [1]. Так в [1] зазначається, що «Втрати електричної енергії в електромережах у 2020 році зросли до 10,4%, що коштувало країні та споживачам десятки мільярдів гривень». Автори в [1] приводять для порівняння з 2020 роком величину втрат електроенергії в мережах у 2018 році, тоді цей показник становив 9,8%.

Можна порівняти стан втрат електричної енергії в інших країнах світу. Якщо розглянути

середньосвітові величини показників втрат, то відповідно [2], вони також не є константою і мають динаміку, що показана на рис. 1.

На рис. 1 показано часовий відрізок з 2000 по 2014 роки. Як можна побачити, середньосвітове значення втрат електричної енергії знижується. Що засвідчує загально світову тенденцію – зменшення втрат електричної енергії. І це зрозуміло, бо втрати енергії – це здорожчання самої електричної енергії і, як наслідок, здорожчання продукції, зниження конкурентоздатності. Так сталося, що Україна вибивається із загально світової тенденції. Коли переважна більшість країн світу знижує втрати, то в Україні спостерігається протилежна динаміка. І це вкрай небезпечна тенденція.

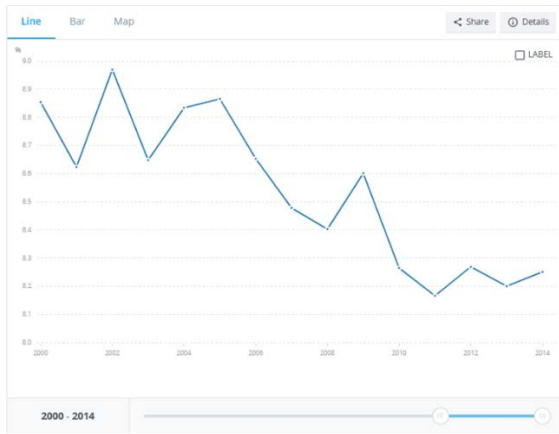


Рис. 1. Середньосвітова динаміка втрат електричної енергії у відсотках до від відпущеної

Якщо розглянути тільки країни із найбільшими втратами електроенергії (рис. 2), то можна провести паралель із економічним станом в таких країнах – Нігер 42 %, Венесуела 36 %, Гондурас 35 %.

Country	Most Recent Year	Most Recent Value
Togo	2014	71
Libya	2014	70
Benin	2008	61
Haiti	2014	60
Iraq	2014	51
Congo, Rep.	2014	45
Niger	2014	42
Namibia	2014	36
Venezuela, RB	2014	36
Honduras	2014	35

Рис. 2. Перелік країн із найбільшими відсотками втрат електричної енергії

В той же час країни із найменшими втратами електричної енергії – це країни із найбільш сталими економіками (рис. 3): Сінгапур 2 %, Німеччина 4 %, Фінляндія 4 %.

В чому полягає основна причина значних втрат електричної енергії? Більшість авторів [1, 3–5] схильються, що величина втрат пов'язана із технічним станом енергетичного обладнання, розвитком систем управління, часткою оновлення обладнання енергетичних систем, використання сучасних технологій в енергетичній сфері, низькою якістю електричної енергії.

Структура втрат електричної енергії.

Структура втрат електричної енергії розглядалася різними авторами із різною метою [6–11]. Наприклад, відокремлення втрат за якимось впливом або залежність втрат від неякісності електроенергії. Є моменти формалізації структури втрат в залежності від використовуваних технологічних процесів генерування і передачі електричної енергії. Тому структура втрат, запропонована різними авторами,

тракується ними не як загальна, а як така, що підкреслює деякі фізичні процеси, або технологічні особливості.

Country	Most Recent Year	Most Recent Value
Singapore	2014	2
Trinidad and Tobago	2014	2
Slovak Republic	2014	2
Iceland	2014	3
Israel	2014	3
Gibraltar	2014	3
Korea, Rep.	2014	3
Germany	2014	4
Bahrain	2014	4
Cyprus	2014	4
Finland	2014	4

Рис. 3. Перелік країн із найменшими відсотками втрат електричної енергії

Зрозуміло, щоб визначити втрати необхідно виконати заміри обсягів потужності електричної енергії.

Електрична енергія має деякі особливості:

- весь обсяг виробленої електричної енергії буде витрачено;
- споживачі можуть використати тільки стільки енергії, скільки її вироблено;
- накопичення енергії в мережі не розглядається.

Електрична мережа має значну протяжність і розгалуженість. Для обліку електричної енергії в мережі використовують відповідні прилади обліку. І за умови складної схеми електричної мережі використовується значна кількість приладів обліку і до того ж вони рознесені в просторі. Виходячи з того, що швидкість передавання електричної енергії дуже висока і становить майже швидкість світла, і, за умови, що накопичення в мережі не розглядається, то показання приладів обліку мають бути синхронізовані за часом проведення замірів. Прилади обліку встановлюють на межі балансової відповідальності. Спрощене представлення електричної мережі показано на рис. 4, з відмітками меж відповідальності.

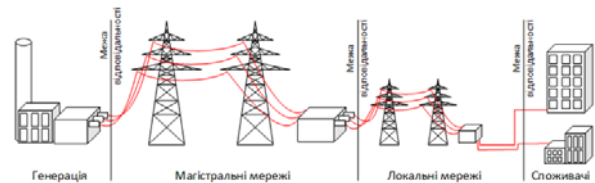


Рис. 4. Спрощене представлення електричної мережі від електростанції до споживача

Перша межа відповідальності знаходиться на підстанції електричної станції, що виконує генерацію електричної енергії. За показанням приладів, що знаходяться на цій межі відповідальності, контролюється весь обсяг відпущеної електричної

енергії в мережу (W_e). Електрична енергія, що поступила в мережу, передається магістральними мережами на значні відстані і після транспортування по локальній мережі розподіляється і подається споживачам, де і споживається. У кожного споживача на межі відповідальності встановлюється прилад обліку, який і фіксує обсяги електричної енергії, що використані споживачем (W_{si}). Всі показання приладів обліку споживачів сумуються:

$$W_s = W_{s1} + W_{s2} + \dots + W_{sn}$$

Отримане значення віднімається від того значення, що було відпущено в мережу електричною станцією. Слід звернути увагу, що показання приладів обліку мають бути синхронізовані в часі і записані за певний однаковий проміжок часу і для генерації і для споживання, що вимагають особливості електричної енергії. Якщо синхронізація за часом не збережена, то показання приладів не будуть виводити дійсності:

$$W_d = W_e - W_s$$

Ми розглядаємо спрощений випадок, коли джерелом електричної енергії виступає тільки електрична станція. Тоді обсяг спожитої електричної енергії (W_s) не може бути більше, ніж відпущеної в мережу (W_e). Тобто завжди $W_e > W_s$, і, відповідно, втрачена електрична енергія (W_d) буде більше нуля $W_d > 0$. Що для наочності представлено на рис. 5.



Рис. 5. Втрачена електрична енергія

Якщо розглядати електричну енергію як товар, то стає зрозумілим бажання всіх виробників зменшити втрати товарів. Електроенергія була вироблена, але не поступила до споживача.

Розглянемо структуру втраченої електроенергії (W_d).

Під час передачі і розподілу електричної енергії обов'язково будуть мати місце витрати енергії на підтримку технологічного процесу передавання і розподілу електроенергії. Функціонування приладів та обладнання, що дозволяє забезпечити необхідні режими роботи системи, використовують саме електричну енергію. Тому такі трати мають назву технологічних втрат (W_t). Без таких технологічних втрат робота системи неможлива. Тому технологічні втрати є зрозумілими. І їх рівень залежить від рівня розвитку технологій. Але в реальних умовах втрачена енергія (W_d) це не тільки технологічні втрати (W_t), а ще якісь не прогнозовані втрати (W_c). Оплата технологічних втрат вноситься в собівартість електричної енергії. А от не прогнозовані втрати має

хтось сплатити, і вони напряму зменшують результат від комерційної діяльності, тому їх називають комерційні втрати (рис. 6).

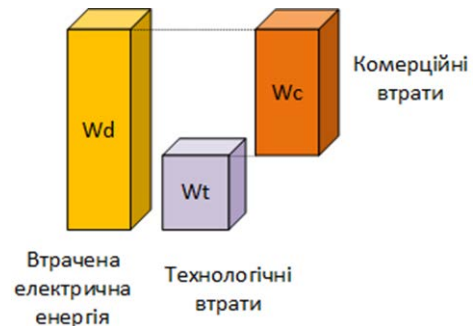


Рис. 6. Структура втраченої електричної енергії

До комерційних втрат відносяться крадіжки електроенергії і системні неможливості урахування витоку електроенергії.

В той же час технологічні втрати можна об'єднати в три групи:

- втрати в енергетичному обладнанні;
- витрати енергії на підтримку технологічного процесу передавання і розподілу електричної енергії;
- недосконалість обліку.

Запропоноване загальне представлення втрат, відображено на діаграмі (рис. 7), де розглядаються два види втрат електричної енергії: технологічні і комерційні.



Рис. 7. Структура втрат електричної енергії

Розглянемо більш детально групи втрат в розділі технологічні втрати.

Втрати в енергетичному обладнанні. До яких ми віднесемо всі втрати, що призвели до нагріву струмопровідних елементів і місць їх з'єднання, розігрів обладнання за рахунок Джоулевого тепла, енергію, що витрачається під час стикання струму на землю за рахунок проблем ізоляції, втрати енергії на гасіння дуги і втрати під час перемикання. До технологічних також віднесемо втрати енергії під час аварій, бо кількість втраченої енергії під час аварій залежить від обладнання і рівня технологій самого обладнання.

Витрати, пов'язані із технологією передавання і розподілу електричної енергії. Ми розглядаємо втрати електроенергії, а в розділі представлені витрати на підтримку технологічного процесу. Така енергія не може бути продана або передана, бо вона необхідна для підтримання технологічного процесу транспортування та розподілу електричної енергії. Тому частку енергії, яка безповоротно втрачається

після її генерування, можна віднести до втрат. Хоча формально вона не втрачена, а витрачена на підтримання технологічного процесу. До цих втрат віднесемо витрати на підтримання самого технологічного процесу передавання електричної енергії. А саме: енергію, що витрачається в приладах вимірювання і керування; енергію на зв'язок, на обробку даних, на енергозабезпечення персоналу. Загалом такі витрати мають назву – витрати на власні потреби. Але є ще й ті, що витрачаються на узгодження різних елементів енергосистеми, їх підключення й відключення. Ці витрати також віднесемо до цього розділу.

Недосконалість приладів обліку електричної енергії. Облік електричної енергії провадиться на межі балансової відповідальності різних підприємств енергосистеми або різних її часток (елементів). За умови, що енергія, яка згенерована і відпущена в мережу, не може бути накопичена і вся і відразу споживається, то показання приладів обліку за часовими мітками мають повністю збігатися. Зрозуміло, що такий стан можливий тільки для ідеальних умов.

Прилад обліку електричної енергії, не зважаючи на його поширеність, є складним приладом. Тобто він не дешевий. Існують різні вимоги до вимірюваних величин, тому є різні види таких приладів (на різні напруги, на різну кількість фаз, на різні типи енергії – реактивна, активна і таке інше).

Відповідно до норм [13] регламентується точність приладів обліку (0,5; 1; 2).

На точність приладів обліку впливають різні фактори, які зазначені в [13]:

- зміна навколишньої температури;
- зміна напруги $\pm 10\%$;
- зміна частоти $\pm 2\%$;
- зворотня послідовність фаз;
- асиметрія напруги;
- гармонічні складники у колах напруги та струму;
- постійний струм та парні гармоніки у колі змінного струму;
- неспрані гармоніки у колі змінного струму;
- субгармоніки у колі змінного струму;
- індукція зовнішнього неперервного магнітного поля;
- індукція зовнішнього магнітного поля 0,5 мТл;
- радіочастотні електромагнітні поля;
- функціонування допоміжних пристроїв;
- кондуктивні завади, наведені радіочастотними полями;
- швидкі перехідні процеси (пакети імпульсів);
- загасні коливальні хвилі.

Для енергопостачальних компаній виникає економічна вимога між вартістю, точністю та строком окупності приладу обліку. Є ще інші критерії: строк експлуатації, частота перевірок, ремонтпридатність.

Для зменшення втрат при проведенні вимірювань. Точність приладу обліку призводить до необхідності дробити споживача на великі і малі об'єкти енергоспоживання і використовувати окремі прилади обліку для різних об'єктів. Це призводить до

удорожчання системи обліку.

Первинні кроки по зменшенню втрат електричної енергії найвірогідніше має сенс проводити там, де втрати є найбільшими.

Розглянемо енергетичні потоки в Україні (рис. 8).

За даними національного статистичного управління динаміка вироблення і споживання електричної енергії в Україні [14] має такий розподіл (рис. 9, 10).

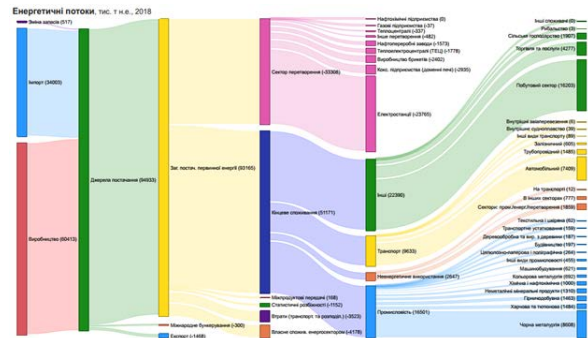


Рис. 8. Енергетичні потоки в Україні

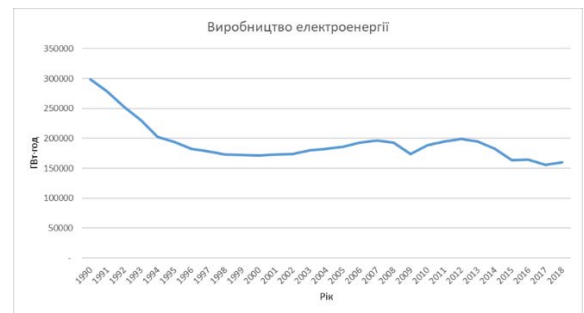


Рис. 9. Виробництво електроенергії в Україні по роках

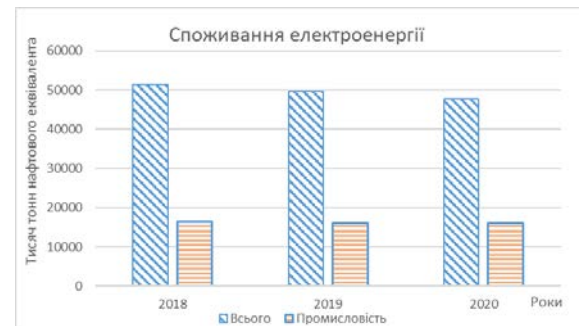


Рис.10. Споживання електроенергії в Україні по роках

В реальних умовах згенерована електрична енергія витрачається на ті самі втрати, що показані на рис. 7, як технологічні втрати.

Для технологічних втрат можна вираховувати деякі залежності, і вони можуть бути розраховані із певною точністю. Так для енергетичної системи України вираховування рівня технологічних втрат виконується за «Методичними рекомендаціями визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання» [12]. Проте за класифікацією авторів таке визначення не є повним і більше відповідає втратам в енергетичному обладнанні (рис. 11). А от визначення витрат на власні потреби задається деяким нормативом споживання, а

не вираховується наприклад відповідно до стану зношеності обладнання, або інших змінних параметрів.



Рис. 11. Окремі позиції втрат електроенергії в Україні по роках

Автори в [1] наводять такі дані «понад 70 % електричних мереж в Україні застаріли та перебувають в аварійному стані. За кількістю та тривалістю відключень споживачів Україна є лідером серед країн Європи».

Зрозуміло, що стан зношеності обладнання електроенергетичної системи України продовжує збільшуватися. Відповідно можна провести паралель рівень зношеності і рівень втрат електроенергії. Тобто вочевидь, щоб зменшити втрати, необхідно оновити обладнання. Але енергетична система включає в себе різні елементи і є дуже розгалуженою і її можна виміряти не тільки значною кількістю елементів обладнання але й вартістю цих елементів. І провести енергопереоснащення можливо тільки поетапно. І це все одно можливе тільки за наявності дуже значних фінансових ресурсів. Потрібно визначитися із найчутливішими елементами енергосистеми з точки зору їх впливу на втрати.

Ще раз звернемо увагу, що наведена структура втрат не включає втрати, що виникають в результаті дії людини (крадіжки, руйнування обладнання, неплатежі і тощо). Такі втрати погано прогнозуються і боротьба із ними здебільшого залежить не від обладнання, а від організаційних і соціальних заходів.

Як видно із діаграми (рис. 12) найбільший відсоток витрат пов'язаний із втратами в високовольтних лініях електропередач 64 %. На другому місці є втрати на коронний розряд 17 %. Для значного зменшення втрат необхідно в першу чергу зменшити втрати саме по цих позиціях.



Рис. 12. Середньостатистичний розподіл втрат енергокомпанії рівня облэнерго, (%)

Питанням займалися різні вчені [2, 17, 18]. Висновок по зменшенню втрат було запропоновано в заміні змінного струму на постійний струм в низьковольтних схемах електропостачання. Тобто від 0,4 кВ до 10 кВ перевести електричні мережі на постійний струм (DC). Для виконання такої задачі в рамках європейських наукових досліджень Horizon Europe були виділені гранти на розробку методики поступового переходу зі змінного струму на постійний струм [18, 19]. Такі дослідження охоплюють понад 14 європейських університетів із сумарним бюджетом понад 6,656 млн. євро.

Висновки. Розуміючи, що енергосистема України зношена, і, до того ж, постраждала в наслідок руйнівних дій військової агресії російської федерації, виникає необхідність відновлення елементів енергосистеми України. Авторі пропонують при плануванні відновлення енергосистеми відразу прийняти найперспективніший напрям, а саме – переобладнання мереж на систему постійного струму в низьковольтних мережах до 10 кВ включно. Використання постійного струму в мережі дозволить зменшити втрати, підвищити керованість, підвищити якість електричної енергії.

Список літератури

- Гурковська Н. *Втрати електроенергії в українських мережах у 2020 році перевищили 10 %*. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/poteri-elektroenergi-ukrainskih-setyah-2020-1627646052.html> (дата звернення: 08.08.2023).
- Electric power transmission and distribution losses (% of output)*. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2014&start=2000&view=chart> (дата звернення: 08.08.2023).
- Онищенко В. А., Самойленко І. А., Гриб О. Г., Жаркин А. Ф., Васильченко В. І., Ущуповский К. В., Сендерович Г. А., Светелик А. Д., Кондратенко К. І., Довгалюк О. Н., Щербакова П. Г., Захаренко Н. С. *Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии*. Харьков: ИП «Граф-Ікс», 2013. 329 с.
- Зниження втрат електроенергії в мережах на її транспортування. Заходи щодо покращання роботи зі споживачами. *Новини енергетики*. 2002. № 7. С. 1–59.
- Гриб О. Г., Сокол Е. І., Жаркин А. Ф., Васильченко В. І., Тесик Ю. Ф. *Качество электрической энергии. Том 2. Контроль качества электрической энергии*. Харьков: ИП «Граф-Ікс», 2014. 244 с.
- Дерзкий В. Г. *Експертиза структури потерь электроэнергии в распределительных сетях Минтопэнерго. Энергетика та електрифікація*. 2002. № 4. С. 18–22.
- Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. *Расчет технологических потерь электроэнергии в электрических сетях. Энергетик*. 2003. № 2. С. 29–33.
- Железко Ю. С. *Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов*. 2009. 456 с.
- Красовський П. Ю., Ципленков Д. В. *Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання. Електротехніка та електроенергетика*. 2015. № 1. С. 77–82.
- Шкрабец Ф. П., Красовський П. Ю. *Расчет технологических потерь электроэнергии в воздушных ЛЭП с учетом срока эксплуатации. Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2014. Вип. 93. С. 48–50.
- Красовський П. Ю. *Расчет технологических потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с учетом срока эксплуатации. Електрифікація транспорту*. 2015. № 10. С. 74–80.
- Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#Text> (дата звернення: 09.08.2023).

13. ДСТУ ІЕС 62053-21:2012. Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Спеціальні вимоги. Частина 21. Лічильники активної енергії статичні (класів точності 1 та 2) (61232) / Нац. стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України, 2013. 16 с.
14. Динамічні ряди показників енергетичних балансів за 1990–2018 роки. URL: https://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2019/energdreb/dr_u.htm (дата звернення: 05.08.2023).
15. Жежеленко І. В., Сасенко Ю. Л. Показники якості електроенергії та їхній контроль на промислових підприємствах. 2000. 252 с.
16. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, in IEEE Std 1159-1995. 70 p. doi: 10.1109/IEEESTD.1995.79050
17. Can we eliminate these 3 types of line losses in transmission systems? URL: <https://www.cencepower.com/blog-posts/line-losses-power-transmission-3-types> (дата звернення: 09.08.2023).
18. HVDC-WISE. URL: <https://hvdc-wise.eu/> (дата звернення: 09.08.2023).
19. D8.8: Visual identity, project website and social media networks. HVDC-WISE, 2022.
- [Calculation of technological losses of electric power in electric networks]. *Enerhetyk*. 2003, no. 2, pp. 29–33.
8. Zhelezko Yu. S. *Poteri elektroenerhii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenerhii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Power losses. Reactive power. Electricity quality: guide for practical calculations]. 2009. 456 с.
9. Krasovs'kyy P. Yu., Tsyplyenkov D. V. Metody ta zasoby znyzhennya tekhnichnykh vtrat elektroenerhiyi v elementakh system elektropostachannya [Methods and means of reducing technical power losses in elements of power supply systems]. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka*. 2015, no. 1, pp. 77–82.
10. Shkrabets F. P., Krasovs'kyy P. Yu. Raschet tekhnologicheskikh poter' elektroenerhii v vozduzhnykh LEP s uchetom stroka ekspluatatsii [Calculation of technological losses of electric power in overhead power lines taking into account service life]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*. 2014, issue 93, pp. 48–50.
11. Krasovs'kyy P. Yu. Raschet tekhnologicheskikh poter' elektroenerhii v silovykh transformatorakh s uchetom stroka ekspluatatsii [Calculation of technological losses of electric power in power transformers with regard to service life]. *Elektryfikatsiya transportu*. 2015, no. 10, pp. 74–80.
12. *Metodychni rekomendatsiyi vyznachennya tekhnologichnykh vytrat elektrychnoyi enerhiyi v transformatorakh i liniyakh elektroperedavannya* [Methodological recommendations for determining the technological consumption of electricity in transformers and power lines]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#Text> (accessed 09.08.2023).

References (transliterated)

1. Hurkovs'ka N. *Vraty elektroenerhiyi v ukraïns'kykh merezhakh u 2020 rotsi perevyschly 10 %* [Electricity losses in Ukrainian grids exceeded 10% in 2020]. Available at: <https://www.rbc.ua/rus/news/poteri-elektroenerhii-ukraïnskih-setyah-2020-1627646052.html> (accessed 08.08.2023).
2. *Electric power transmission and distribution losses (% of output)*. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2014&start=2000&view=chart> (accessed 08.08.2023).
3. Onishchenko V. A., Samoilenko I. A., Grib O. G., Zharkin A. F., Vasil'chenko V. I., Ushchapovskiy K. V., Senderovich G. A., Svetelik A. D., Kondratenko K. I., Dovgalyuk O. N., Shcherbakova P. G., Zakharenko N. S. *Analiz i otsenka ekonomicheskikh ushcherbov ot nizkogo kachestva elektricheskoy energii* [Analysis and assessment of economic damage from poor quality electricity]. Kharkov, PP "Graf-Iks" Publ., 2013. 329 p.
4. Znyzhennya vtrat elektroenerhiyi v merezhakh na yiyi transportuvannya. Zakhody shchodo pokrashchannya roboty zi spozhyvachamy [Reducing electricity losses in the grid due to transmission. Measures to improve customer relations]. *Novyny enerhetyky*. 2002, no. 7, pp. 1–59.
5. Grib O. G., Sokol E. I., Zharkin A. F., Vasil'chenko V. I., Tesik Yu. F. *Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 2. Kontrol' kachestva elektricheskoy energii* [Quality of electrical energy. Vol. 2. Quality control of electrical energy]. Kharkov, PP "Graf-Iks" Publ., 2014. 244 p.
6. Derzskiy V. G. *Ekspertiza struktury poter' elektroenerhii v raspredelitel'nykh setyakh Mintopenergo* [Expertise of the structure of electricity losses in distribution grids of the Ministry of Fuel and Energy]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiya*. 2002, no. 4, pp. 18–22.
7. Zhelezko Yu. S., Artem'ev A. V., Savchenko O. V. *Raschet tekhnologicheskikh poter' elektroenerhii v elektricheskikh setyakh* [Calculation of technological losses of electric power in electric networks]. *Enerhetyk*. 2003, no. 2, pp. 29–33.
8. Zhelezko Yu. S. *Poteri elektroenerhii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenerhii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Power losses. Reactive power. Electricity quality: guide for practical calculations]. 2009. 456 с.
9. Krasovs'kyy P. Yu., Tsyplyenkov D. V. *Metody ta zasoby znyzhennya tekhnichnykh vtrat elektroenerhiyi v elementakh system elektropostachannya* [Methods and means of reducing technical power losses in elements of power supply systems]. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka*. 2015, no. 1, pp. 77–82.
10. Shkrabets F. P., Krasovs'kyy P. Yu. *Raschet tekhnologicheskikh poter' elektroenerhii v vozduzhnykh LEP s uchetom stroka ekspluatatsii* [Calculation of technological losses of electric power in overhead power lines taking into account service life]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*. 2014, issue 93, pp. 48–50.
11. Krasovs'kyy P. Yu. *Raschet tekhnologicheskikh poter' elektroenerhii v silovykh transformatorakh s uchetom stroka ekspluatatsii* [Calculation of technological losses of electric power in power transformers with regard to service life]. *Elektryfikatsiya transportu*. 2015, no. 10, pp. 74–80.
12. *Metodychni rekomendatsiyi vyznachennya tekhnologichnykh vytrat elektrychnoyi enerhiyi v transformatorakh i liniyakh elektroperedavannya* [Methodological recommendations for determining the technological consumption of electricity in transformers and power lines]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#Text> (accessed 09.08.2023).
13. ДСТУ ІЕС 62053-21:2012. Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Спеціальні вимоги. Частина 21. Лічильники активної енергії статичні (класів точності 1 та 2) (61232) [State Standard 62053-21:2012. Electricity metering equipment (a.c.). Particular requirement. Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2)]. Kyiv: Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine Publ., 2013. 16 p.
14. *Dynamichni ryady pokaznykiv enerhetychnykh balansiv za 1990–2018 roky* [Time series of energy balance indicators for 1990–2018]. Available at: https://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2019/energdreb/dr_u.htm (accessed 05.08.2023).
15. Zhezhelenko I. V., Sayenko Yu. L. *Pokaznyky yakosti elektroenerhiyi ta yikhniy kontrol' na promyslovykh pidpryyemstvakh* [Electricity quality indicators and their control at industrial enterprises]. 2000. 252 p.
16. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, in IEEE Std 1159-1995. 70 p. doi: 10.1109/IEEESTD.1995.79050
17. Can we eliminate these 3 types of line losses in transmission systems? Available at: <https://www.cencepower.com/blog-posts/line-losses-power-transmission-3-types> (accessed 09.08.2023).
18. HVDC-WISE. Available at: <https://hvdc-wise.eu/> (accessed 09.08.2023).
19. D8.8: Visual identity, project website and social media networks. HVDC-WISE, 2022.

Надійшло (received) 20.08.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Гриб Олег Герасимович (Grib Oleg) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4758-8350>; e-mail: oleg47gryb@gmail.com

Карпалюк Ігор Тимофійович (Karpaliuk Igor) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-6807>; e-mail: humpway@gmail.com

Швець Сергій Вікторович (Shvets Sergey) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; e-mail: se55sh32@gmail.com

Донецька Тетяна Сергіївна (Donetska Tetiana) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0925-1001>; e-mail: iierusalimovtat@gmail.com

Дяченко Олександр Васильович (Diachenko Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7232-6585>; e-mail: diachenko.a.v@ukr.net