

Андрій КОТИШ

Центральноукраїнський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4938-5234>
e-mail: akotysh@gmail.com

Іван САВЕЛЕНКО

Центральноукраїнський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-0078-5755>
e-mail: ivan.savelenko@gmail.com

Катерина ПЕТРОВА

Центральноукраїнський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-1928-6833>
e-mail: kateflash27@gmail.com

НАДЛИШКОВІ ТЕХНІЧНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

В роботі проведено аналіз виникнення втрат електроенергії в електротехнічних системах та електричних мережах різного класу напруг. Особливу увагу приділено так званим надлишковим втратам, які не враховуються при проектуванні та експлуатації.

Ключові слова: комерційні та технічні втрати електроенергії, енергоринок, електрична мережа, підстанція

Andrii KOTYSH, Ivan SAVELENKO, Kateryna PETROVA
Central Ukrainian National Technical University

THE EXCESSIVE TECHNICAL LOSSES OF ELECTRICITY IN ELECTRICAL SYSTEMS OF POWER CONSUMPTION

Reducing electricity losses in electrical networks is a complex complex problem that requires significant capital investments necessary for optimizing the development of electrical networks, improving the electricity accounting system, introducing new information technologies in marketing activities and managing network modes, training personnel and equipping them with means of testing measuring devices etc. In reality, in recent years, in connection with the inclusion of normative losses in the tariff for electric energy transmission services, a dangerous trend of adapting these norms to actual losses has emerged.

The article analyzes the occurrence of power losses in electrical engineering systems and electrical networks of various voltage classes. Special attention is paid to the so-called excess losses, which are not taken into account during design and operation. These losses occur in insulators, linear fittings, current-limiting reactors, electricity meters, windings of current and voltage transformers, etc. Excessive losses of electricity in electric networks are direct financial losses of electric power companies. Savings from reducing losses could be directed to technical re-equipment of networks; staff salary increase; improvement of the organization of electricity transmission and distribution; increasing the reliability and quality of electricity supply to consumers. Unaccounted losses reach approximately 1% of the total amount. This fact must be taken into account. Because currently we are talking about millions of losses.

Keywords: commercial and technical losses of electricity, energy market, electrical network, substation

Постановка проблеми

Зниження втрат електроенергії в електричних мережах - складна комплексна проблема, що вимагає значних капітальних вкладень, необхідних для оптимізації розвитку електричних мереж, вдосконалення системи обліку електроенергії, впровадження нових інформаційних технологій в маркетинговій діяльності і управління режимами мереж, навчання персоналу і його оснащення засобами перевірки пристроїв вимірювань тощо.

Наднормативні втрати електроенергії в електричних мережах - це прямі фінансові збитки електроенергетичних компаній. Економію від зниження втрат можна було б спрямувати на технічне переоснащення мереж; збільшення зарплати персоналу; вдосконалення організації передачі і розподілу електроенергії; підвищення надійності і якості електропостачання споживачів; зменшення тарифів на електроенергію.

Аналіз останніх джерел

Питанню зменшення втрат електроенергії присвячено чимало наукових праць, як чисто теоретичного так і прикладного характеру [1, 2, 3]. Та реальна картина залишається не дуже втішною, втрати електроенергії у кращому випадку перевищують 10%, а іноді й 13% [4, 5]. Методика визначення технологічних втрат регламентується нормативними документами, а саме наказами міністерства Енергетики та вугільної промисловості України [6, 7].

Реально ж останніми роками у зв'язку з включенням нормативних втрат в тариф на послуги по передачі електричної енергії намітилася небезпечна тенденція підгонки цих нормативів під фактичні втрати. Така практика приводить до зростання тарифів на послуги по передачі електроенергії і тарифів на електроенергію для її споживачів. Зростання тарифів на електроенергію створює додаткові стимули для її розкрадань, що призводить до подальшого зростання втрат.

В ідеальному випадку комерційні втрати електроенергії в електричній мережі, що визначаються розрахунковим шляхом, повинні бути рівні нулю. У реальних умовах передача в мережу електроенергії,

корисна передача і технічні втрати визначаються з похибками. Їх різниці фактично і є структурними складовими комерційних втрат. Вони повинні бути по можливості зведені до мінімуму за рахунок виконання відповідних заходів щодо їх зниження. У загальному випадку складові комерційних втрат електроенергії можна об'єднати в три групи:

- обумовлені похибками вимірювань відпущеною в мережу і корисно відпущеною електроенергії споживачам;
- обумовлені заниженням корисної передачі через недоліки енергозбутової діяльності і розкрадання електроенергії;
- обумовлені заборгованістю по оплаті за електроенергію.

Метою роботи є: дослідження обсягів технічних втрат електричної енергії в обладнанні мереж та підстанцій.

Виклад основного матеріалу

До устаткування, втрати в якому фахівці з розрахунків втрат електроенергії в мережах вважають незначними і не враховують в розрахунках, можна віднести:

- лінійну арматуру повітряних ліній, призначену для кріплення проводів, - підтримуючі зажими (човники), гасителі вібрації (на лініях 110-220 кВ), дистанційні розпірки між проводами розщепленої фази (на лініях 330-750 кВ);
- ізолятори повітряних ліній (втрати від струмів витоку);
- височастотні загороджувачі (ВЗ) і пристрої приєднання ВЧ-зв'язку (УПВЧ);
- вентильні розрядники (ВР) і обмежувачі перенапруг (ОПН);
- вимірювальні трансформатори струму (ТС) і напруги (ТН);
- електричні лічильники 0,38 кВ безпосереднього включення (без ТН);
- кабельні лінії (у частині діелектричних втрат в ізоляції);
- струмообмежувальні реактори;
- сполучні проводи і збірні шини розподільних пристроїв підстанцій.

Наявність в конструкціях лінійної арматури замкнених контурів з магнітних матеріалів (сталевих болтів з плашками і човниками із сталі або ковкого чавуну) призводить до втрат електроенергії в них на перемагнічування і вихрові струми. Втрати потужності в лінійній арматурі з магнітних матеріалів можна виразити через збільшення розрахункових опорів проводів, приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Питомий опір проводів ПЛ та лінійної арматури

Напруга ПЛ, кВ	Розрахунковий перетин, мм ²	Питомий опір проводу, r_0 , Ом/мм·10 ⁻³	Значення r_0 , Ом/мм·10 ⁻³ , для різновиду лінійної апаратури			
			Підтримуючі зажими	Гасителі вібрації та дистанційні розпірки	Всього	У відсотках r_0
110	185	160	2,0	0,7	2,7	1,7
220	300	100	1,2	0,5	1,7	1,7
330	2×300	50	2,4	3,3	5,7	11,4
500	3×400	25	3,7	7,0	10,7	43,0
750	4×400	18	4,9	11,7	16,6	92,0

Вентильний розрядник є послідовно сполучені активний опір, що шунтує іскровий проміжок, і колонка послідовно зібраних дисків, виготовлених з матеріалів на основі карбіду кремнію і що є нелінійними опорами (резистори). У нормальному режимі через ВР тече невеликий струм, визначуваний сумарним опором даному електричному ланцюгу. Обмежувачі перенапруг, що використовуються в мережах 35 кВ і вище, є колонками послідовно зібраних дисків, виготовлених на основі оксидно-цинкових матеріалів і є ще більш нелінійними опорами, ніж у ВР. Найчастіше використовуються резистори діаметром 28 мм і заввишки 8 мм. Висота колонки резисторів пропорційна номінальній напрузі. Наприклад, у фазі ОПН 500 кВ встановлюються колонки резисторів заввишки 4,8 м. Число паралельних колонок у фазі також залежить від номінальної напруги: 1 - при напрузі до 35 кВ; 4 - на 110 кВ; 7 - на 220 кВ; 12 - на 330 кВ; 18 - на 500 кВ; 26 - на 750 кВ. Розрахункові значення втрат в ВР і ОПН різної напруги приведені в таблиці 2.

Вимірювальні трансформатори струму і напруги є багатovitковими трансформаторами спеціальної конструкції, що складаються з однієї первинної обмотки і декількох вторинних. Одна з вторинних обмоток призначена для вимірювальних кіл, до неї приєднуються відповідні кола лічильників, ватметрів і вимірювальних перетворювачів системи телевимірювань. До решти обмоток ТС, званих захисними, приєднуються різні види пристроїв релейного захисту і автоматики. Число захисних обмоток у найбільш поширених типів ТС складає: одна - у трансформаторів 6-10 кВ; дві - 35 кВ; три - 110 кВ і вище. У ТН, що використовуються в мережах загального призначення, передбачаються дві вторинні обмотки: основна і додаткова.

Таблиця 2

Втрати електроенергії у ВР та ОПН

Вид обладнання	Втрати електроенергії, тис. кВт·год на рік, для класу напруги, кВ											
	6	10	15	20	35	60	110	150	220	330	500	750
ВР	0,00 9	0,02 1	0,03 3	0,04 7	0,09 1	0,27	0,60	1,05	1,59	3,32	4,93	5,31
ОПН	0,00 1	0,00 1	0,00 2	0,00 4	0,01 3	0,10	0,22	0,40	0,74	1,80	3,94	8,54

На кожен тип ТН встановлюються значення найбільшого вторинного навантаження, при якому забезпечується той або інший клас точності. Наприклад, ТН типа ЗНОЛ-06 при потужності вторинного навантаження не більше 50 Вт забезпечує клас точності 0,2, при 75 Вт - клас 0,5, при 150 Вт - клас 1, при 300 Вт - клас 3. Втрати в ТС і його вторинному навантаженні відносяться до втрат навантажень і залежать від квадрата фактичного струму. При відносному струмовому навантаженні ТС, рівному, наприклад, 50% номінального первинного струму, втрати складуть 25% номінальних. Втрати потужності, споживаною ТС від силового ланцюга, визначається сумою чотирьох складових:

- втрат в первинній обмотці - ΔP_1 ;
- у магнітній системі - ΔP_m ;
- у вторинних обмотках - вимірювальною $\Delta P_{2 \text{ изм}}$ і захисною $\Delta P_{1 \text{ защ}}$;
- і в їх навантаженнях - $\Delta P_{н \text{ изм}}$ і $\Delta P_{н \text{ защ}}$.

Сума перших чотирьох складових є втратами у внутрішніх елементах ТС - $\Delta P_{вн}$, а останніх два - в зовнішніх елементах ТС. Дослідження показали, що розрахункові річні втрати в ТС у всьому діапазоні номінальної напруги добре апроксимуються лінійною залежністю (тис. кВт·год/рік):

$$\Delta W_{ТС} = 0,07 U_{ном} \cdot \beta_{ТС}^2, \quad (1)$$

де $\beta_{ТС}$ - відносне струмове навантаження ТС.

Трансформатори напруги, на відміну від ТС, працюють в практично стабільному режимі впродовж всього розрахункового періоду і належать до втрат холостого ходу.

У кожній точці обліку електроенергії на напрузі 6-35 кВ використовується два ТС, а на напрузі 110 кВ і вище - три, у всіх випадках встановлюється три ТН (у мережах 6-10 кВ можуть використовуватися трифазні ТН).

Втрати електроенергії в ТН і ТС, встановлених в одній точці обліку, складають (тис. кВт·год на рік):

- 2,8 - в мережі напругою 6-10 кВ;
- 5,1 - 35 кВ;
- 14,2 - 110 кВ;
- 17,4 - 220 кВ;
- 23,8 - 330 кВ;
- 36,0 - 500 кВ;
- 68,5 - 750 кВ.

В таблиці 3 приведені дані по споживанню потужності колами струму і напруги індукційних і електронних лічильників безпосереднього включення, нормованому стандартами. Ці втрати відносяться до постійних втрат, тому неважко обчислити річне споживання енергії лічильниками, яке приведене в тій же таблиці. Слід мати на увазі, що приведені цифри відображають витрату електроенергії на забезпечення роботи лічильника і не впливають на свідчення споживаної абонентом енергії.

Таблиця 3

Параметри лічильників безпосереднього включення

Вид лічильника	Типовий клас точності	Споживана потужність одним колом		Сумарна споживана потужність, Вт	Споживання електроенергії кВт·год на рік
		напруги, Вт	струму, ВА		
Однофазний індукційний	2,5	2,0	0,5	2,1	18,4
Однофазний електронний	2,0	2,0	2,5	2,5	21,9
Трифазний індукційний	1,0	3,0	2,5	10,5	92,0
Трифазний електронний	1,0	2,0	4,0	8,4	73,6

Річні втрати в ізоляції кабелів залежать від напруги кабелю і тангенса кута діелектричних втрат. Для найбільш поширених в даний час кабелів річні втрати в ізоляції, залежно від їх перетину, складають:

- 0,9 - 1,5 тис. кВт·год/км для кабелів 6-10 кВ;

2,5 - 5,5 тис. кВт-год/км для кабелів 20-35 кВ;

30 - 60 тис. кВт-год/км для кабелів 110 кВ.

Втрати в струмообмежувальних реакторах залежать від робочого струму, що протікає по його обмотках. Розрахункові значення втрат при середньому значенні робочого струму можуть бути визначені по формулі:

$$\Delta W_p = 0,66\sqrt{3}U_{ном} \cdot I_{ном}, \quad (2)$$

Втрати в сполучних проводах і збірних шинах розподільних пристроїв підстанцій визначаються сумарною довжиною провідників на території підстанції. Відомо, що опір алюмінієвого проводу (Ом/км.) пов'язаний з його перетином F , мм² співвідношенням $r_0 = 32/F$. При економічній щільності струму $I=F$ і річні втрати електроенергії можуть бути визначені за формулою (тис. кВт-год/рік):

$$\Delta W_{n/cm} = 96F \cdot L \cdot \tau \cdot 10^{-9}, \quad (3)$$

Середні протяжності, розрахункові перетини провідників на підстанціях різної напруги і річні втрати електроенергії, визначені по формулі (3) при $\tau = 4000$ год, приведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Втрати електроенергії у з'єднувальних проводах та збірних шинах розподільчих пристроїв підстанцій

Номинальна напруга, кВ	Середня довжина з'єднувальних проводів та збірних шин на підстанції, м	Розрахунковий перетин, мм ²	Втрати електроенергії, тис. кВт-год на рік
6-20	50	70	1,3
35	50	150	2,9
110	160	185	11,4
150	200	240	18,4
220	270	300	31,1
330	430	600	99,1
500	900	1200	414,7
750	1200	1600	737,3

Розрахунки показали, що для порівняно невеликої у лінійній арматурі - 1 млн. кВт-год;
у ізоляторах ПЛ - 7 млн. кВт-год;
у ВР і ОПН - 1 млн. кВт-год;
у пристроях ВЧ-зв'язку - 1,5 млн. кВт-год;
у струмообмежувальних реакторах - 0,5 млн. кВт-год;
у ізоляції кабелів - 0,1 млн. кВт-год;
у ТС і ТН - 5,5 млн. кВт-год;
у лічильниках - 6,7 млн. кВт-год;
у сполучних проводах і збірних шинах підстанцій - 1,2 млн. кВт-год.

Висновок

Таким чином сумарні втрати складають 23,3 млн. кВт-год або близько 1% загального споживання енергії. При звичайних значеннях технічних втрат від складових, що традиційно враховуються, близько 8-12%, додаткові втрати у розмірі 1% не можуть вважатися неістотними.

Література

1. Буцьо З. Ю. Аналіз втрат електричної енергії в електромережах усіх рівнів напруги в енергосистемах провідних зарубіжних країн та України / З.Ю. Буцьо, В.І. Мартинюк // Енергетика та електрифікація – 2020. – № 2. – С. 15 – 17.
2. Васюченко П.В. Особенности внедрения мероприятий по снижению потерь электрической энергии на промышленных предприятиях Украины / П.В. Васюченко, И.Г. Кирисов, А.М. Чернюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 29 (68) Ч. 2 № 3 2018. С. 66 – 69.
3. Ципленков Д.В. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання / Д.В. Ципленков, П.Ю. Красовський // Електротехніка та електроенергетика – 2015. – № 1. – С. 77 – 82.
4. РБК-Україна: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rbc.ua/ukr/news/poteri-elektroenerгии-ukrainskih-setyah-2020-1627646052.html>

5. ЕнергоВсесвіт: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vse.energy/news/pek-news/electro/1214-techno-energy-losses>
6. Методика по визначенню втрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередач: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN7392>
7. Про Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN96969>
8. Котиш А.І. Аналіз заходів по зниженню надлишкових технічних втрат електроенергії в електричних мережах /А.І. Котиш, І.О. Переверзев // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. /Вип. 19. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – С.235-239.
9. Орлович А.Е. Анализ возникновения сверхнормативных технических потерь электроэнергии в электрических сетях / А.Е. Орлович, А.И. Котыш // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – С. 99-105.
10. Котиш А.І. Автоматизовані засоби технічної діагностики та електричного контролю за станом ізоляції в сільських електричних мережах: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.11.13 / НТУ «ХПІ». – Харків, 2001. – 17 С.

References

1. Butso Z. Yu. Analiz vtrat elektrychnoi enerhii v elektromerezhakh usikh rivniv napruhy v enerhosystemakh providnykh zarubizhnykh krain ta Ukrainy / Z.Iu. Butso, V.I. Martyniuk // Enerhetyka ta elektryfikatsiia – 2020. – № 2. – С. 15 – 17.
2. Vasiuchenko P.V. Osobennosti vnedreniya meropriyatiy po snyzheniyu poter elektrycheskoi enerhy na promyshlennykh predpriyatiyakh Ukrainy / P.V. Vasiuchenko, Y.H. Kyrsov, A.M. Cherniuk // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: tekhnichni nauky. Tom 29 (68) Ch. 2 № 3 2018. S. 66 – 69.
3. Tsyplenkov D.V. Metody ta zasoby znyzhennia tekhnichnykh vtrat elektroenerhii v elementakh system elektropostachannia / D.V. Tsyplenkov, P.Iu Krasovskiy // Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka – 2015. – № 1. – С. 77 – 82.
4. RBK-Ukraina: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.rbc.ua/ukr/news/poteri-elektroenerhii-ukrainskih-setyah-2020-1627646052.html>
5. EnerhoVsesvit: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://vse.energy/news/pek-news/electro/1214-techno-energy-losses>
6. Metodyka po vyznachenniu vtrat elektroenerhii u transformatorakh i liniyakh elektroperedach: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN7392>
7. Pro Metodychni rekomendatsii vyznachennia tekhnolohichnykh vytrat elektrychnoi enerhii v transformatorakh i liniyakh elektroperedavannia: [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN96969>
8. Kotysh A.I. Analiz zakhodiv po znyzhenniu nadlyshkovykh tekhnichnykh vtrat elektroenerhii v elektrychnykh merezhakh /А.І. Котыш, І.О. Переверзев // Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. /Вип. 19. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – С.235-239.
9. Orlovych A.E. Analiz voznyknovenyia sverkhnormatyvnykh tekhnicheskyykh poter elektroenerhy v elektrycheskykh setiakh / А.Е. Орлович, А.І. Котыш // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – С. 99-105.
10. Kotysh A.I. Avtomatyzovani zasoby tekhnichnoi diahnostryky ta elektrychnoho kontroliu za stanom izoliatsii v silskykh elektrychnykh merezhakh: Avtoref. dys... k-ta tekhn. nauk: 05.11.13 / NTU «KhPI». – Kharkiv, 2001. – 17 S.