

Дослідження економічної ефективності використання трансформаторів з еко-дизайном в електричних мережах об'єднаної енергетичної системи України

Я. О. Соколов, В. О. Суворов

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті досліджено економічну доцільність впровадження силових трансформаторів з еко-дизайном у розподільчих електричних мережах Об'єднаної енергетичної системи України. Особливу увагу приділено аналізу енергетичних втрат при експлуатації таких трансформаторів, що здійснено відповідно до методичних рекомендацій Міністерства енергетики та вугільної промисловості України.

Розрахунки проведено для трансформаторів типу ТМГ-1000/10 у різних режимах роботи, що дозволило визначити їх ефективність у реальних умовах експлуатації. Оцінювання економічної вигоди виконано на основі методу чистого дисконтного прибутку, що дало змогу порівняти потенційні фінансові переваги використання еко-дизайну з традиційними варіантами трансформаторного обладнання.

Аналіз показав, що, незважаючи на потенційне зниження втрат електроенергії, капітальні витрати на впровадження трансформаторів з еко-дизайном є значно вищими порівняно з традиційними моделями. Унаслідок цього, за сучасних економічних умов та тарифної політики, їх застосування в розподільчих електромережах Оператора системи розподілу не забезпечує достатнього економічного ефекту.

Отримані результати можуть бути корисними для енергетичних компаній, регуляторних органів та науковців при прийнятті рішень щодо модернізації електроенергетичної інфраструктури. Висновки дослідження також можуть слугувати підґрунтям для подальших наукових робіт, спрямованих на оптимізацію параметрів силових трансформаторів з урахуванням як енергетичних, так і фінансових показників.

Ключові слова: силові трансформатори, оператор системи розподілу, електрична мережа, експлуатація, експлуатація трансформаторів з еко-дизайном, чистий дисконтний прибуток.

Вступ

У зв'язку з реалізацією політики України в сфері енергозбереження, зокрема, у контексті переходу ринку електроенергії на нову модель, що передбачає більшу гнучкість та ефективність експлуатації, а також впровадження стимулюючого РAB-тарифоутворення в електричних мережах оператора системи розподілу, постає актуальне питання зменшення технологічних витрат в електричних мережах. Це питання є особливо важливим в умовах стрімкого зростання вартості електроенергії та необхідності забезпечення економічної ефективності в умовах обмежених ресурсів, що спонукає до постійного вдосконалення інфраструктури та технологій.

Особлива цінність суттєвого підвищення стандартів енергозбереження в Україні виникає в

контексті інтеграції національної енергосистеми до європейської об'єднаної енергосистеми ENTSO-E, що відкриває нові можливості для оптимізації енергетичних потоків, забезпечення надійності і стабільності постачання електроенергії та безпечної експлуатації діючих електроустановок, а також інтеграції відновлювальних джерел енергії та сучасних технологій зберігання енергії. Ці зміни потребують модернізації електричних мереж і підвищення їхньої ефективності експлуатації, що стає необхідною умовою для відповідності новим стандартам та вимогам європейського енергетичного ринку.

Важливою частиною цих зусиль є введення нових технічних стандартів для обладнання, зокрема, для силових трансформаторів. Зокрема, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 152, було затверджено новий технічний регламент до вимог "Еко-дизайну" для силових трансформаторів потужністю до 3150 кВА та

© Соколов Я. О., Суворов В. О., 2025

напругою не більше 24 кВ. Цей регламент розроблено на основі Регламенту Комісії ЄС №548/2014 від 21.05.2014 року, що доповнює Директиву 2009/125/ЄС Європейського Парламенту [1, 2]. Введення цього регламенту спрямоване на забезпечення відповідності національних виробів високим європейським стандартам з енергоефективності та екологічності, що дозволить зменшити енергетичні витрати, знизити негативний вплив на навколишнє середовище та забезпечити більш стійку і ефективну роботу енергетичних систем.

Технічний регламент, що набув чинності 27 лютого 2019 року, є обов'язковим для виконання на території України. Згідно з ним, масляні трансформатори, які використовуються в електричних мережах, повинні відповідати затвердженим технічним параметрам "Еко-дизайну". Особливо важливою є вимога щодо масляних трансформаторів потужністю від 10 кВА до 3150 кВА, що випускаються серії ТМГ. Це гарантує не тільки підвищення технічних характеристик, а й зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення технологічних втрат та підвищення ефективності роботи обладнання.

Контроль за відповідністю продукції цим вимогам здійснює Держпродспоживслужба, яка наглядає за дотриманням технічних параметрів, затверджених регламентом. У разі виявлення невідповідності технічним вимогам Еко-дизайну, служба має право заборонити використання або вилучити таке обладнання з обороту. Цей контроль є важливим елементом забезпечення належної якості та безпеки енергетичної інфраструктури, що сприяє сталому розвитку енергетичного сектора України та його інтеграції в європейське енергетичне співтовариство.

Економічний ефект полягає в зменшенні сплати активної потужності за технологічні витрати в трансформаторі при умові додаткових капітальних вкладень, оскільки енергозберігаючі трансформатори коштують дорожче.

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вивчення економічної ефективності використання трансформаторів з еко-дизайном в електричних мережах є важливим напрямом сучасних наукових досліджень, оскільки це питання охоплює широкий спектр аспектів, від зменшення технологічних витрат до впровадження інноваційних рішень для збереження енергії та екологічної безпеки. В умовах глобальних викликів, пов'язаних із підвищенням попиту на енергоресурси, а також необхідності інтеграції енергосистем різних країн, питання оптимізації викорис-

тання енергетичних ресурсів стає надзвичайно актуальним.

Переробна промисловість споживає надмірну кількість матеріалів, переважно з первинних джерел і потоків енергії, що значно сприяє глобальним екологічним проблемам, таким як зміна клімату. Для досягнення сталого розвитку створення еко-дизайну та його впровадження у виробничому секторі має вирішальне значення [3].

Екологічні аспекти відіграють ключову роль у стимулюванні інноваційних підходів до розробки концепцій екологічного дизайну, сприяючи впровадженню новітніх технологій та матеріалів, що мінімізують негативний вплив на довкілля. Зростаючі вимоги до енергоефективності, зменшення викидів шкідливих речовин і раціональне використання ресурсів змушують науковців та інженерів шукати нові рішення, що відповідають принципам сталого розвитку [4]. Еко-дизайн, інтегруючи стійкі цінності в процес розробки продукту, враховує аспекти життєвого циклу при створенні продуктів, процесів або послуг [5].

Стратегія енергозбереження та зменшення викидів (ESER) є ключовим кроком для забезпечення стійкості обробної промисловості в умовах екологічного переходу. Вивчаючи поточні практики та обмеження ESER у цій галузі, у цьому документі пропонується новий підхід під назвою «економне енергозбереження та зменшення викидів» (LESER), який орієнтований на ефективне підвищення енергоефективності та скорочення викидів відходів [6].

В роботі [7] розповідається, що дизайнери володіють ключем до сталого розвитку продукту через EcoDesign. Існує безліч інструментів, розроблених для допомоги у досягненні цієї мети. Проте більшість з них використовуються рідко, в основному через відсутність вимог до сталого розвитку у специфікаціях продуктів. Якщо немає попиту на покращені екологічні характеристики, то відпадає й потреба в інструментах EcoDesign. Таким чином, відсутність ринкового попиту на екологічно чисті продукти є вирішальним чинником.

У статті [8] досліджуються та класифікуються інструменти, створені для оцінки екологічних вимог до продуктів та їх впровадження в процес розробки, за такими критеріями:

- 1) метод, застосований для екологічної оцінки;
- 2) додаткові вимоги до продукту, які необхідно інтегрувати разом з екологічними (багатокритеріальний підхід);
- 3) чи враховує інструмент усі етапи життєвого циклу продукту (перспектива життєвого циклу);

4) тип результатів (якісні чи кількісні);

5) етапи концептуального проектування, на яких можна використовувати цей інструмент;

6) основна методологія, що лежить в основі інтеграції цих вимог.

В роботі [9] йдеться мова про те, що у трансформаторів з екодизайном підвищення енергоефективності досягається за рахунок використання матеріалів з покращеними магнітними характеристиками та/або збільшенням маси основних компонентів. Це веде до підвищення їх кінцевої вартості, що, в свою чергу, позначається на зростанні цін на стандартну продукцію.

У статті [10] розповідається, що завданням розробників екопродуктів є забезпечення задоволення потреб або вигоди для споживача з мінімальними екологічними та економічними витратами. Для цього екологічні аспекти повинні бути інтегровані на етапі початкової розробки продукту, оскільки без цього екологічні вимоги не зможуть бути належним чином враховані

Як було зазначено раніше, навколишнє середовище стало основною проблемою після того, як традиційні підходи до розробки продуктів, орієнтовані на збільшення економічної вигоди, були піддані критиці. Однак в останні роки інструменти для сталого дизайну продуктів зазнали значних змін порівняно з тим, що існувало раніше. Вони трансформувалися з простих екодизайнерських інструментів у більш складні системи з розширеними можливостями, межами та застосуванням, спрямовані на реалізацію концепції сталого дизайну продукту [11].

Глобальна проблема зростаючих втрат електроенергії та негативного впливу енергетичного сектору на довкілля вимагає пошуку ефективних рішень, спрямованих на зменшення експлуатаційних витрат і скорочення викидів парникових газів. Одним із таких рішень є впровадження трансформаторів з еко-дизайном, які, завдяки використанню сучасних матеріалів з низькими втратами, удосконаленій конструкції магнітопроводів та інтеграції систем моніторингу стану обладнання, демонструють значні переваги в порівнянні з традиційними моделями. Їх підвищена енергоефективність дозволяє не лише мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, а й сприяє досягненню цілей сталого розвитку.

Саме ці виклики сучасності зумовлюють необхідність детального вивчення економічної ефективності впровадження трансформаторів з екодизайном та їх ролі в оптимізації роботи електромереж.

2. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є визначення економічного ефекту від впровадження енергоефективних трансформаторів ТМГ зі зменшеними витратами, які виробляються підприємством-флагманом ТОВ «Укрелектроапарат».

Для досягнення мети дослідження необхідно:

1) розрахувати втрати електричної енергії в трансформаторі;

2) оцінити економічний ефект від встановлення трансформаторів з еко-дизайном.

3. Визначення втрат електричної енергії в трансформаторі

Розрахунок проводився для широко впровадженого трансформатора потужністю 1000 кВА, паспортні параметри якого наведені в таблиці 1.

Таблиця 1
Паспортні дані трансформаторів ТМГ
(ТОВ «УЕА»)

Тип трансформатора	U_k , %	$P_{кз}$, кВт	$P_{хх}$, кВт	Маса повна, кг	Вартість*, тис. грн
ТМГ-1000/10 (звичайні характеристики)	5,5	10,6	1,4	2570	250
ТМГ-1000/10 (зменшені витрати)	5,5	10,5	1,1	2730	335

* вартість на основі прайсової пропозиції заводу-виробника за червень 2022р.

Визначення технологічних витрат електроенергії проводилося у відповідності до Методичних рекомендацій визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередач, затверджених наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 399 від 21.06.2013 [1, 2]. Дотримання зазначених методичних рекомендацій забезпечило коректність і порівнянність отриманих результатів із нормативними та галузевими вимогами, що є важливим для подальшого аналізу економічної доцільності впровадження нових технічних рішень у розподільчих електричних мережах.

Технологічні втрати в трансформаторі визначаються за формулою

$$\Delta W_T^{(P)} = 3I^2 R_T k_\phi^2 \cdot 10^{-3} T_p + P_{н.х} T_n, \quad (1)$$

де I^2 – середнє протягом розрахункового періоду діюче значення сили струму трансформатора, квадрат якого обчислюється за формулою (2);

k_ϕ^2 – коефіцієнт форми графіка навантаження трансформатора;

R_T – активний опір трансформатора, Ом;

$P_{н.х}$ – втрати неробочого ходу трансформатора, кВт;

T_p – час роботи трансформатора під навантаженням протягом розрахункового періоду, години;

T_n – час знаходження трансформатора під напругою протягом розрахункового періоду, години.

Квадрат середнього діючого значення сили струму в елементі електричної мережі протягом розрахункового періоду в обчислюють за формулою

$$I^2 = \frac{(W^{(P)})^2 + (W^{(Q)})^2}{bT_p^2 U_H^2}, \quad (2)$$

де $W^{(P)}$, $W^{(Q)}$ – перетікання відповідно активної і реактивної енергії через елемент мережі за розрахунковий період, кВт·год. (кВАр·год.);

b – коефіцієнт, що дорівнює 3 для трифазної мережі і 1 для однофазної мережі;

U_H – номінальна вища напруга трансформатора згідно з ГОСТ 11677, кВ.

Визначення середньомісячного споживання електричної енергії проводиться так:

$$W^{(P)} = \frac{P_{p.3}}{12} T_{\max}, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3)$$

$$W^{(Q)} = \frac{Q_{p.3}}{12} T_{\max}, \text{ кВАр} \cdot \text{год}, \quad (4)$$

де T_{\max} – час максимального навантаження в рік, який умовно приймається рівним 2000, 4000 та 6000 годин для одно-, дво- та тризмінного графіка навантаження відповідно, годин;

$P_{p.3}, Q_{p.3}$ – розрахункові активна та реактивна потужності, які визначаються із умови відповідності завантаження трансформатора на рівні

0,9 та 0,65 для одно- та двотрансформаторної підстанції, кВт, кВАр.

За формулами (3), (4) проведено розрахунок технологічних витрат електроенергії для однострансформаторної трансформаторної підстанції (ТП), яка функціонує відповідно до однозмінного графіка споживання електроенергії і становить

$$W^{(P)} = \frac{873}{12} \cdot 2000 = 145,5 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год},$$

$$W^{(Q)} = \frac{218,3}{12} \cdot 2000 = 36,38 \text{ тис. кВАр} \cdot \text{год}.$$

Так, за формулою (2) квадрат середнього діючого значення сили струму в трансформаторі протягом розрахункового періоду становить для однострансформаторної ТП, працюючої за однозмінним графіком навантаження дорівнює

$$I^2 = \frac{145500^2 + 36380^2}{3 \cdot 720^2 \cdot 10^2} = 136,1 \text{ А}^2.$$

За формулою (1) середньомісячні втрати активної енергії в трансформаторі складатимуть

$$\Delta W_T^{(P)} = 3 \cdot 136,1 \cdot 1,06 \cdot 1,48 \cdot 720 / 1000 + \dots \rightarrow$$

$$\leftarrow \dots + 1,4 \cdot 720 = 1469,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Розрахунок технологічних витрат електроенергії проводився для різних режимів роботи трансформатора, що дозволило оцінити зміну втрат залежно від навантаження та експлуатаційних умов. У дослідженні враховувалися як холості втрати, так і втрати короткого замикання, що дало змогу отримати повну картину енергетичної ефективності трансформаторів.

Результати розрахунків для трансформатора зі стандартними характеристиками наведені в таблиці 2, де детально відображено величини втрат електроенергії у різних режимах його роботи. Зокрема, в таблиці представлені значення холостих втрат, втрат короткого замикання, а також сумарні технологічні витрати електроенергії при різних рівнях навантаження.

Аналіз отриманих даних дозволяє оцінити, як змінюються втрати електроенергії залежно від експлуатаційних умов, зокрема від рівня завантаженості трансформатора.

Таблиця 2

Результати розрахунку технологічних витрат в трансформаторі зі стандартними характеристиками

Режим	Параметри навантаження трансформатора					Середньомісячне споживання			Середньомісячні витрати	
	P_p , кВт	Q_p , кВАр	T_{\max} , год	β_T	K_Φ^2	W_a , тис. кВт*год	W_p , тис. кВАр*год	I^2 , А	dW_a , кВт*год	dW_a , %
Трансформатор ТМГ-1000 зі стандартними характеристиками										
1 трансформаторна ТП однозмінний графік	873	218,3	2000	0,9	1,48	145,5	36,38	136,13	1469,3	1,01
1 трансформаторна ТП двозмінний графік	873	218,3	4000	0,9	1,27	291	72,75	544,54	2591,4	0,89
1 трансформаторна ТП тризмінний графік	873	218,3	6000	0,9	1,02	436,5	109,13	1225,21	3869,3	0,89
2 трансформаторна ТП однозмінний графік	630,5	157,6	2000	0,65	1,48	105,08	26,27	71	1248,6	1,19
2 трансформаторна ТП двозмінний графік	630,5	157,6	4000	0,65	1,27	210,17	52,54	284,04	1833,9	0,87
2 трансформаторна ТП тризмінний графік	630,5	157,6	6000	0,65	1,02	315,25	78,81	639,07	2500,5	0,79

Для трансформатора з покращеними характеристиками, зокрема зі зменшеними технологічними витратами, результати розрахунків наведені в таблиці 3.

У ній представлено детальні значення втрат електроенергії у різних режимах роботи.

Особливу увагу приділено порівнянню показників із трансформатором зі стандартними характеристиками, що дозволяє оцінити ефективність заходів, спрямованих на зменшення технологічних витрат.

У розрахунках враховано вплив модернізованих конструктивних рішень, таких як покращені магнітопроводи, використання провідників з нижчим електричним опором та оптимізація режимів роботи.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальшого аналізу економічної доцільності використання трансформаторів із покращеними характеристиками в розподільчих електромережах, оскільки вони надають детальну інформацію щодо зниження технологічних втрат електроенергії в різних умовах експлуатації. Цей аналіз є ключовим для обґрунтування можливості підвищення ефективності функціонування електричних мереж за допомогою модернізованого трансформаторного обладнання.

Зокрема, отримані дані дозволяють обґрунтувати можливість зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення втрат електроенергії.

Результати розрахунку технологічних витрат в трансформаторі зі зменшеними витратами

Режим	Параметри навантаження трансформатора					Середньомісячне споживання			Середньомісячні витрати	
	P_p , кВт	Q_p , кВАр	T_{\max} , год	β_T	K_Φ^2	W_a , тис. кВт*год	W_p , тис. кВАр*год	I^2 , А	dW_a , кВт*год	dW_a , %
Трансформатор ТМГ-1000 зі зменшеними витратами										
1 трансформаторна ТП однозмінний графік	873	218,3	2000	0,9	1,48	145,5	36,38	136,1	1248,9	0,86
1 трансформаторна ТП двозмінний графік	873	218,3	4000	0,9	1,27	291	72,75	544,5	2360,5	0,81
1 трансформаторна ТП тризмінний графік	873	218,3	6000	0,9	1,02	436,5	109,13	1225,2	3626,4	0,83
2 трансформаторна ТП однозмінний графік	630,5	157,6	2000	0,65	1,48	105,08	26,27	71	1030,3	0,98
2 трансформаторна ТП двозмінний графік	630,5	157,6	4000	0,65	1,27	210,17	52,54	284	1610,1	0,77
2 трансформаторна ТП тризмінний графік	630,5	157,6	6000	0,65	1,02	315,25	78,81	639,1	2270,4	0,72

З метою оцінки ефективності впровадження трансформаторів із зменшеними втратами проведено порівняння основних показників енергетичних витрат, яке відображене в таблиці 4. Це порівняння має на меті оцінити вплив модернізації трансформаторів на зниження загальних втрат електричної енергії в електричних мережах, що дозволяє обґрунтовано порівняти два типи трансформаторів — зі стандартними та покращеними характеристиками. Порівняння включає детальний аналіз втрат електричної енергії для кожного типу трансформатора у різних режимах роботи. Це дозволяє виявити відмінності в рівнях втрат за умов номінального навантаження, коли трансформатор

працює в оптимальному режимі, а також при частковому навантаженні, коли трансформатор працює при знижених навантаженнях.

Виконання цього порівняння дозволяє детально оцінити вплив покращених характеристик на зменшення втрат в кожному з режимів.

4. Визначення економічного ефекту

Чистий дисконтний прибуток (ЧДП) визначається як сума поточних ефектів за весь розрахунковий період, приведена до початкового кроку, або як перевищення інтегральних резуль-

Порівняння витрат в трансформаторах

Режим	Трансформатор зі стандартними витратами	Трансформатор зі зменшеними витратами	Різниця	
	Середньомісячні витрати dWa, кВт*год	Середньомісячні витрати dWa, кВт*год	dWa, кВт*год	dWa, грн/міс
1 трансформаторна ТП однозмінний графік	1469,3	1248,9	220,4	771,4
1 трансформаторна ТП двозмінний графік	2591,4	2360,5	230,9	808,15
1 трансформаторна ТП тризмінний графік	3869,3	3626,4	242,9	850,15
2 трансформаторна ТП однозмінний графік	1248,6	1030,3	218,3	764,05
2 трансформаторна ТП двозмінний графік	1833,9	1610,1	223,8	783,3
2 трансформаторна ТП тризмінний графік	2500,5	2270,4	230,1	805,35

над інтегральними витратами:

$$NPV = \sum_{t=0}^T ((R_t - B_t) / (1 + E)^t), \text{ грн}, \quad (5)$$

де R – прибуток за t -років;

B – річні витрати за t -років;

K_t – капітальні вкладення в році t ;

E – норма дисконтування (приймається у відповідності до розрахункової ставки НБУ за червень 2022 року на рівні 25%).

Період окупності проекту T_n - період за який віддачі на капітал досягає значення дисконтованих початкових вкладень. Період окупності визначають за такою формулою

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_n} ((R_t - B_t) / (1 + E)^t) = 0. \quad (6)$$

Внутрішня норма прибутку IRR характеризує рентабельність проекту і визначається наступним чином:

$$IRR = 1/T, \% \quad (7)$$

де T_n – термін окупності.

Під час виконання економічного розрахунку основні показники визначались так:

– капітальні витрати: як різницю між вартістю трансформатора зі стандартними та поліпшеними характеристиками;

– доход від енергозбереження: як різницю між щорічною вартістю витрат з урахуванням щорічного подорожчання електроенергії на 5%;

– щорічні витрати: як амортизаційні витрати (на рівні 4%) помножені на різницю вартості трансформаторів.

Оскільки за даними розрахунків різниця економічного ефекту для різних видів трансформаторів незначна, то ЧДП розраховується для найбільш та найменш вигідних режимів.

В таблицях 5 та 6 наводяться результати розрахунку NVP для найгіршого та найліпшого варіанта.

5. Результати дослідження

За результатами проведених розрахунків було отримано такі висновки щодо економічної доцільності встановлення трансформаторів зі зменшеними витратами від ТОВ «Укрелектроапарат» для споживачів різних класів напруги:

– аналіз фінансових показників показав, що впровадження трансформаторів зі зменшеними витратами для підприємств, які належать до 2 класу напруги, не є економічно виправданим. Внутрішній коефіцієнт рентабельності (IRR) для

таких підприємств становить -22%, що свідчить про значний економічний ризик та неможливість

Таблиця 5

Розрахунок NVP для двотрансформаторної ТП з однозмінним графіком навантаження
(найгірший варіант)

Роки розрахункового періоду	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Капітальні витрати К, тис грн	85										
Доход від енергозбереження R, тис грн		9,2	9,6	10,1	10,6	11,1	11,7	12,3	12,9	13,6	14,2
Щорічні витрати С, тис грн		3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Прибуток	-85	5,8	6,2	6,7	7,2	7,7	8,3	8,9	9,5	10,1	10,8
Кумулятивний прибуток, тис. грн	-85	-79	-73	-66	-59	-51	-43	-34	-25	-1	-3,7
Коефіцієнт дисконтування	1	0,80	0,64	0,51	0,41	0,33	0,26	0,21	0,17	0,13	0,11
Дисконтований прибуток, тис. грн	-85	4,61	3,98	3,43	2,95	2,54	2,18	1,86	1,59	1,36	1,16
$NVP = \sum (R-C) \cdot (1+E)^{-t}$	-85	-80,4	-76,4	-73,0	-70,0	-67,5	-65,3	-63,4	-61,8	-60,5	-59,3

Таблиця 6

Розрахунок NVP для однострансформаторної ТП з тризмінним графіком навантаження
(найліпший варіант)

Роки розрахункового періоду	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Капітальні витрати К, тис грн	85										
Доход від енергозбереження R, тис грн		9,66	10,2	10,7	11,2	11,8	12,3	13	13,6	14,3	15
Щорічні витрати С, тис грн		3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Прибуток	-85	6,3	6,7	7,3	7,8	8,3	8,9	9,6	10,2	10,9	11,6
Кумулятивний прибуток, тис. грн	-85	-78,7	-72,0	-64,7	-56,9	-48,6	-39,7	-30,1	-19,9	-9,0	2,6
Коефіцієнт дисконтування	1	0,8	0,64	0,51	0,41	0,33	0,26	0,21	0,17	0,13	0,11
Дисконтований прибуток, тис. грн	-85	5,01	4,32	3,71	3,19	2,74	2,34	2,00	1,71	1,46	1,24
$NVP = \sum (R-C) \cdot (1+E)^{-t}$	-85	-80,0	-75,7	-72,0	-68,8	-66,0	-63,7	-61,7	-60,0	-58,5	-57,3

повернення інвестицій у встановлення цього обладнання. Від'ємне значення IRR означає, що очікувані економічні вигоди не компенсують витрат на придбання та експлуатацію трансформаторів, що робить їх використання нерентабельним у даних умовах;

– у випадку споживачів 1 класу напруги ситуація виглядає дещо краще: економічні показники демонструють покращення порівняно з підприємствами 2 класу. Проте, незважаючи на це покращення, рівень фінансової доцільності все ще залишається недостатнім для того, щоб обґрунтувати широкомасштабне впровадження даних трансформаторів. Отримані розрахунки показують, що навіть за сприятливіших умов для підприємств 1 класу інвестиції у такі трансформатори не дають бажаного рівня прибутковості. Таким чином, без додаткових стимулюючих факторів, таких як державні субсидії, зменшення вартості обладнання або введення пільгових тарифів на електроенергію для енергоефективного обладнання, впровадження трансформаторів зі зниженими втратами для споживачів 1 класу залишається фінансово невиправданим;

– аналіз вартості трансформаторів у різних режимах роботи показав, що різниця у витратах не перевищує 11,3%. Основним чинником, що впливає на цю незначну варіацію, є відмінність у втраті короткого замикання (Ркз) між різними моделями силових трансформаторів. Це означає, що, незважаючи на впровадження трансформаторів зі зниженими втратами, кінцевий економічний ефект залишається відносно малим через незначну різницю у витратах на експлуатацію обладнання.

На рисунках 1 – 4 наведені графіки NPV та кумулятивного прибутку для двотрансформаторної ТП.

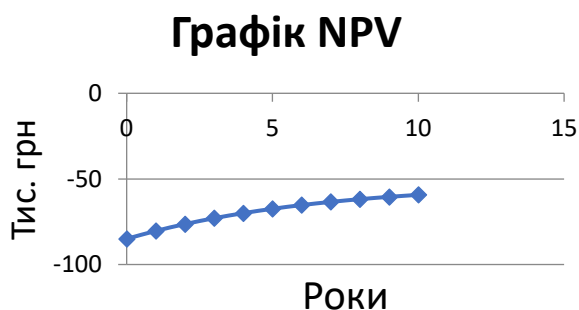


Рис. 1. Графік NPV для двотрансформаторної ТП з однозмінним графіком навантаження

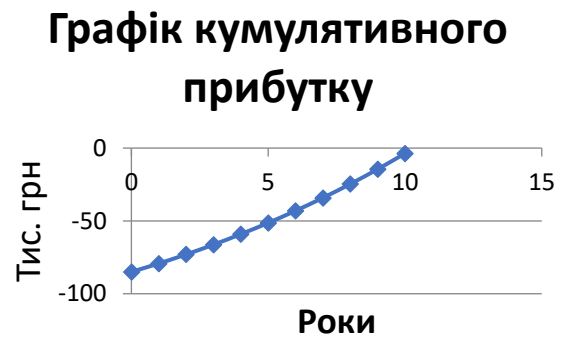


Рис. 2. Графік кумулятивного прибутку для двотрансформаторної ТП з однозмінним графіком навантаження

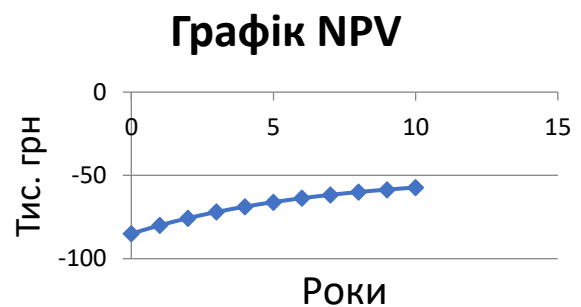


Рис. 3. Графік NPV для однострансформаторної ТП з тризмінним графіком навантаження

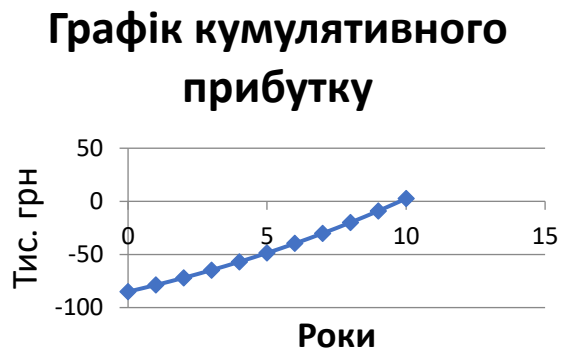


Рис. 4. Графік кумулятивного прибутку для однострансформаторної ТП з тризмінним графіком навантаження

6. Висновки

Результати проведеного аналізу свідчать про те, що в поточних економічних умовах застосування трансформаторів з еко-дизайном є фінансово невиправданим. Висока початкова вартість таких трансформаторів призводить до того, що їх окупність не досягається протягом 10-річного

періоду експлуатації незалежно від рівня навантаження. Це створює серйозні бар'єри для їх впровадження у розподільні електричні мережі та промислові підприємства.

Основною причиною незадовільних економічних показників є значне зростання масогабаритних параметрів трансформаторів, що безпосередньо впливає на їхню кінцеву вартість.

У конструктивному рішенні для зменшення витрат холостого ходу було використано метод збільшення маси магнітопроводу на 470 кг та об'єму трансформаторного масла на 480 кг. Проте така стратегія не передбачала застосування високоефективних марок сталі з покращеними магнітними властивостями, що могло б суттєво знизити втрати без значного збільшення маси трансформатора. Таким чином, вибір технологічного підходу до зниження витрат холостого ходу виявився неефективним з точки зору економіки виробництва та експлуатації.

Згідно з технічним регламентом, параметри силових трансформаторів з еко-дизайном суттєво відрізняються за рівнем витрат холостого ходу, однак мають лише незначні (менше 1%) відмінності у витратах короткого замикання. Це є критичним фактором, оскільки у розподільних електромережах витрати короткого замикання є значно вищими за втрати холостого ходу. Особливо це стосується навантажених підстанцій, де основна частка втрат припадає саме на режим роботи під навантаженням.

Аналіз режимів експлуатації показує, що у мережах ОСР (операторів системи розподілу) значна кількість одотрансформаторних підстанцій, де навантажувальні втрати короткого замикання відіграють значно більшу роль, ніж витрати холостого ходу. Водночас, у двотрансформаторних підстанціях, особливо при низьких навантаженнях, частка витрат холостого ходу є вищою. Це вказує на необхідність гнучкого підходу до розробки трансформаторів з еко-дизайном, які б мали різне співвідношення витрат холостого ходу та короткого замикання. Такий підхід дозволить підвищити енергоефективність обладнання у залежності від специфічних умов експлуатації.

Щодо забезпечення економічної доцільності впровадження трансформаторів ТМГ-1000/10 з еко-дизайном, розрахунки показують, що їхня окупність може бути досягнута лише за умови застосування високого коефіцієнта дисконтування (10%) та вартості електроенергії на рівні 9 грн/кВт·год. Такий сценарій є малоімовірним у поточних умовах ринку електроенергії та не відповідає тарифним реаліям для більшості споживачів.

Окремо слід зазначити, що економічний ефект від використання трансформаторів з еко-дизайном у мережах ОСР буде ще гіршим. Це пояснюється тим, що вартість електроенергії для ОСР не включає тариф на розподіл, що значно знижує потенційний економічний зиск від зменшення втрат. Відповідно, ОСР будуть менш зацікавлені у впровадженні таких трансформаторів через низьку фінансову віддачу від їх експлуатації.

Отримані результати вказують на необхідність подальшого вдосконалення технологічних параметрів трансформаторів для досягнення більш вираженого економічного ефекту, що може зробити їх привабливішими для споживачів у майбутньому.

Список використаної літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України № 152 від 27.02.19 «Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для малих, середніх та великих силових трансформаторів».
2. Наказ № 399 від 21.06.2013 «Про Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання».
3. S. Kamalakkannan, A.K. Kulatunga (2021). Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 27, Pages 1297-1316, ISSN 2352-5509, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.006>.
4. C.K.M. Lee, Jingying Liang, K.L. Yung, K.L. Keung (2024). Generating TRIZ-inspired guidelines for eco-design using Generative Artificial Intelligence. *Advanced Engineering Informatics*, Volume 62, Part C, 102846, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102846>.
5. William Z. Bernstein, Melissa Tensa, Maxwell Praniewicz, Soonjo Kwon, Devarajan Ramanujan (2020). An automated workflow for integrating environmental sustainability assessment into parametric part design through standard reference models. *Procedia CIRP*, Volume 90, Pages 102-108, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.058>.
6. Michael P. Brundage, William Z. Bernstein, Steven Hoffenson, Qing Chang, Hidetaka Nishi, Timothy Kliks, K.C. Morris (2018). Analyzing environmental sustainability methods for use earlier in the product lifecycle. *Journal of Cleaner Production*, Volume 187, Pages 877-892, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.187>.

7. Wei Cai, Kee-hung Lai, Conghu Liu, Fangfang Wei, Minda Ma, Shun Jia, Zhigang Jiang, Li Lv (2019). Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. *Science of The Total Environment*, Volume 665, Pages 23-32, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.069>.

8. M.D. Bovea, V. Pérez-Belis, A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process, *Journal of Cleaner Production*, Volume 20, Issue 1, 2012, Pages 61-71, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.012>.

9. М. Р. Іщенко, О. А. Козловський (2024). Підвищення енергетичної ефективності трансформаторних підстанцій 10/0, 4 кВ. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/59395/1/EE_tekhnolohiyi_APK_2024_17-18.pdf

10. Conrad Luttrupp, Jessica Lagerstedt (2006). EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, Issues 15–16, Pages 1396-1408, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.022>.

11. Shamraiz Ahmad, Kuan Yew Wong, Ming Lang Tseng, Wai Peng Wong (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 132, Pages 49-61, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.020>.

References

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 152 dated 27.02.19 "On Approval of the Technical Regulation Regarding Requirements for Eco-design for Small, Medium, and Large Power Transformers."

2. Order No. 399 dated 21.06.2013 "On Methodical Recommendations for Determining Technological Losses of Electrical Energy in Transformers and Power Transmission Lines."

3. S. Kamalakkannan, A.K. Kulatunga (2021). Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 27, Pages 1297-1316, ISSN 2352-5509, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.006>.

4. C.K.M. Lee, Jingying Liang, K.L. Yung, K.L. Keung (2024). Generating TRIZ-inspired guidelines for eco-design using Generative Artificial

Intelligence. *Advanced Engineering Informatics*, Volume 62, Part C, 102846, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102846>.

5. William Z. Bernstein, Melissa Tensa, Maxwell Praniewicz, Soonjo Kwon, Devarajan Ramanujan (2020). An automated workflow for integrating environmental sustainability assessment into parametric part design through standard reference models. *Procedia CIRP*, Volume 90, Pages 102-108, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.058>.

6. Michael P. Brundage, William Z. Bernstein, Steven Hoffenson, Qing Chang, Hidetaka Nishi, Timothy Kliks, K.C. Morris (2018). Analyzing environmental sustainability methods for use earlier in the product lifecycle. *Journal of Cleaner Production*, Volume 187, Pages 877-892, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.187>.

7. Wei Cai, Kee-hung Lai, Conghu Liu, Fangfang Wei, Minda Ma, Shun Jia, Zhigang Jiang, Li Lv (2019). Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. *Science of The Total Environment*, Volume 665, Pages 23-32, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.069>.

8. M.D. Bovea, V. Pérez-Belis, A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process, *Journal of Cleaner Production*, Volume 20, Issue 1, 2012, Pages 61-71, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.012>.

9. М. Р. Іщенко, О. А. Козловський (2024). Improvement of Energy Efficiency of 10/0.4 kV Transformer Substations. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/59395/1/EE_tekhnolohiyi_APK_2024_17-18.pdf

10. Conrad Luttrupp, Jessica Lagerstedt (2006). EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, Issues 15–16, Pages 1396-1408, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.022>.

11. Shamraiz Ahmad, Kuan Yew Wong, Ming Lang Tseng, Wai Peng Wong (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 132, Pages 49-61, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.020>.

Research on the Economic Efficiency of using Eco-Designed Transformers in the Electric Grids of the Unified Energy System of Ukraine

Ya. O. Sokolov, V. O. Suvorov
Odessa Polytechnic National University

Abstract. The article investigates the economic feasibility of implementing eco-designed power transformers in the distribution electricity networks of Ukraine's Unified Energy System. Special attention is given to the analysis of energy losses during the operation of such transformers, which was carried out in accordance with the methodical recommendations of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine.

Calculations were made for TMH-1000/10 type transformers in various operational modes, allowing for the assessment of their performance under real-world operating conditions. The economic benefits were evaluated using the net present value (NPV) method, which made it possible to compare the potential financial advantages of using eco-design with traditional transformer equipment options.

The analysis showed that, despite the potential reduction in energy losses, the capital expenditures for implementing eco-designed transformers are significantly higher compared to traditional models. As a result, under current economic conditions and tariff policies, their application in the distribution networks of the Distribution System Operator does not provide sufficient economic benefit.

The obtained results may be useful for energy companies, regulatory authorities, and researchers when making decisions regarding the modernization of the electric power infrastructure. The conclusions of the study could also serve as a foundation for further scientific work aimed at optimizing the parameters of power transformers, taking into account both energy and financial indicators.

Keywords: Power Transformers, Distribution System Operator, Electrical Grid, Operation, Operation of Eco-Designed Transformers, Net Present Value (NPV)

Отримано 09.04.2025



Соколов Ярослав Олександрович, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: sokolov@op.edu.ua, тел. +38 098 955 60 41

Yaroslav Sokolov, senior lecture of Department of Electricity and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: sokolov@op.edu.ua, ph.: +38 098 955 60 41

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0698-7160>



Суворов Владислав Олегович, доктор філософії, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

E-mail: suvorov@op.edu.ua, тел. +38 063 593 94 91

Vladyslav Suvorov, PhD, senior lecture of Department of Electricity and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine

E-mail: suvorov@op.edu.ua, тел. +38 063 593 94 91

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2842-887X>