

DOI 10.36074/logos-06.02.2026.029

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОРІВНЯЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВРАХУВАННЯМ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

**Стасів Андрій Зеновійович¹, Судомир Валентин Петрович²,
Миколишин Владислав Васильович³, Буняк Олег Андронікович⁴,
Сисак Іван Михайлович⁵, Оробчук Богдан Ярославович⁶**

1. здобувач факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА
ORCID ID: 0009-0005-2966-5529

2. здобувач факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА
ORCID ID: 0009-0007-1173-9272

3. здобувач факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА
ORCID ID: 0009-0000-9154-6890

4. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0001-9304-8254

5. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-2315-7911

6. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, УКРАЇНА
ORCID ID: 0000-0002-6375-2440

У сучасних умовах розвитку електроенергетики особливої актуальності набуває підвищення енергоефективності та економічної доцільності роботи електричних мереж та підстанцій. Силові трансформатори є одним з ключових елементів систем електропостачання, від техніко-економічних характеристик яких безпосередньо залежить рівень втрат електроенергії, надійність електропостачання та експлуатаційні витрати.

Зростання вартості електроенергії, необхідність оптимізації капітальних і експлуатаційних витрат, а також впровадження сучасних нормативних вимог щодо енергоефективності обумовлюють потребу у виборі трансформаторів на основі не лише номінальних технічних параметрів, але й економічних показників протягом усього терміну служби. У цьому контексті особливо важливим є застосування математичних моделей і методів, які дозволяють виконувати порівняльний аналіз різних типів і варіантів трансформаторів з урахуванням економічних критеріїв.

Розробка та використання математичної методики, моделювання для розрахунку порівняльних характеристик трансформаторів забезпечує можливість комплексної оцінки втрат холостого ходу і короткого замикання, навантаження, приведених витрат та терміну окупності. Це дозволяє приймати обґрунтовані інженерні рішення при проєктуванні, модернізації та реконструкції електричних мереж і підстанцій.

Таким чином, тема математичного моделювання та методики при розрахунку порівняльних характеристик трансформаторів з урахуванням економічних показників є актуальною та має практичну цінність для сучасної електроенергетики.

При проєктуванні або модернізації трансформаторів різних класів напруги вибір силових трансформаторів проводять на основі розрахункової потужності та коефіцієнтів навантаження в номінальних та аварійних режимах роботи. При цьому не беруть до уваги ряд економічних складових: вартість приведених витрат при роботі силових трансформаторів, ціна на електричну енергію та режими споживання [3, 4].

Тому, для вибору потужності силових трансформаторів ТП при проведенні розрахунку їх порівняльних характеристик оптимальними критеріями є капітальні та експлуатаційні витрати, технічні характеристики й вартість електроенергії, річна тривалість роботи та графік електричних навантажень. [5].

Перейдемо до безпосереднього представлення методики розрахунку порівняльних характеристик трансформаторів з врахуванням економічних показників. Для кращої наочності зразу наведемо приклад розрахунку. Умовно методику можна поділити на чотири блоки.

В перший блок входять вхідні дані для розрахунку:

- повна потужність споживачів - навантаження усіх споживачів, які розміщені на підприємстві:

$$S_p = 378 \text{ кВА.}$$

- час включення - показує час роботи силового трансформатора за календарний рік протягом 365 днів, 24 години за кожен день:

ABSCHNITT 15.

ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK

$$t_{\text{екл}} = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ год.}$$

- коефіцієнт зміни втрат - передбачає можливу зміну силового навантаження:

$$K_{\text{зм.втр.}} = 0,02 \text{ кВт/кВАр.}$$

- вартість одного кіловата електроенергії - показує вартість 1 кВт електричної енергії в даний час:

$$m = 10,5 \text{ грн.}$$

- коефіцієнт експлуатаційних відрахувань – становить 10% від капітальних затрат на покупку силових трансформаторів.

$$\varphi = 0,1.$$

Другий блок показано у вигляді вхідних даних для двох силових трансформаторів, представлених у вигляді окремих стовпців.

Блок містить паспортні дані трансформаторів (повна потужність трансформаторів, втрати холостого ходу, втрати короткого замикання, струм холостого ходу, напруга короткого замикання), кількість трансформаторів, перевантаження одного трансформатора, вартість одного трансформатора:

- потужність трансформаторів - характеризує повну потужність трансформаторів згідно каталогів виробників, має стандартний ряд значень:

$$S_{T1} = 630 \text{ кВА}; S_{T2} = 400 \text{ кВА.}$$

- кількість трансформаторів - характеризує споживачів електричної енергії згідно категорії по надійності електропостачання:

$$n_1 = 1; n_2 = 2.$$

- перевантаження одного трансформатора - допускається на 40%, записується у вигляді коефіцієнту, який становить 1,4.

- значення втрат холостого ходу - паспортні дані трансформатора, які визначаються з дослідження холостого ходу:

$$\Delta P_{xx1} = 1,05 \text{ кВт}; \Delta P_{xx2} = 0,83 \text{ кВт.}$$

- значення втрат короткого замикання - паспортні дані трансформатора, які визначаються з дослідження короткого замикання:

$$\Delta P_{кз1} = 7,6 \text{ кВт}; \Delta P_{кз2} = 5,5 \text{ кВт.}$$

- значення струму холостого ходу - паспортні дані трансформатора, які визначаються з дослідження холостого ходу:

$$i_{xx1} = 1,6 \% ; i_{xx2} = 1,8 \% .$$

- значення напруги короткого замикання - паспортні дані трансформатора, які визначаються з дослідження короткого замикання:

$$u_{кз1} = 5,5 \% ; u_{кз2} = 4,5 \% .$$

- вартість одного трансформатора - показує вартість одного трансформатора в даний час згідно прайс-листу заводу-виробника:

$$C_{T1} = 312000 \text{ грн}; C_{T2} = 229000 \text{ грн.}$$

У третьому блоці надаємо вихідні дані для двох трансформаторів, представлених у вигляді окремих стовпців.

Блок містить:

- коефіцієнт завантаження в нормальному режимі - характеризує завантаження трансформатора при роботі на навантаження всіх трансформаторів:

$$K_{зав.Т1.норм.} = \frac{S_p}{n_1 \cdot S_{T1}} = 0,6; K_{зав.Т2.норм.} = \frac{S_p}{n_2 \cdot S_{T2}} = 0,472.$$

- коефіцієнт завантаження в аварійному режимі - характеризує завантаження трансформатора при роботі на навантаження лише одного трансформатора, при цьому враховується перевантаження одного трансформатора на 40%:

$$K_{зав.Т1.авар.} = \frac{S_p}{1,4 \cdot S_{T1}} = 0,429; K_{зав.Т2.авар.} = \frac{S_p}{1,4 \cdot S_{T2}} = 0,675.$$

- реактивна потужність холостого ходу:

$$\Delta Q_{xx.T1} = S_{T1} \cdot \frac{i_{xx1}}{100} = 10,08 \text{ кВАр}; \Delta Q_{xx.T2} = S_{T2} \cdot \frac{i_{xx2}}{100} = 7,2 \text{ кВАр.}$$

- реактивна потужність короткого замикання - споживається трансформатором при номінальному навантаженні:

$$\Delta Q_{кз.T1} = S_{T1} \cdot \frac{u_{кз1}}{100} = 34,65 \text{ кВАр}; \Delta Q_{кз.T2} = S_{T2} \cdot \frac{u_{кз2}}{100} = 18 \text{ кВАр.}$$

- приведені втрати холостого ходу - враховують втрати активної потужності в самому трансформаторі, і втрати, створювані ним в елементах всієї системи електропостачання в залежності від реактивної потужності, яку споживає трансформатор:

$$\Delta P'_{xx.T1} = \Delta P_{xx1} + K_{зм.втр.} \cdot \Delta Q_{xx.T1} = 1,2516 \text{ кВт};$$

$$\Delta P'_{xx.T2} = \Delta P_{xx2} + K_{зм.втр.} \cdot \Delta Q_{xx.T2} = 0,974 \text{ кВт.}$$

- приведені втрати короткого замикання:

$$\Delta P'_{кз.T1} = \Delta P_{кз1} + K_{зм.втр.} \cdot \Delta Q_{кз.T1} = 8,293 \text{ кВт};$$

$$\Delta P'_{кз.T2} = \Delta P_{кз2} + K_{зм.втр.} \cdot \Delta Q_{кз.T2} = 5,86 \text{ кВт.}$$

- приведені втрати електроенергії - одночасно з вибором номінальної потужності трансформаторів потрібно передбачати оптимально раціональні режими їх роботи, які характеризуються мінімумом втрат потужності в



ABSCHNITT 15.

ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK

трансформаторах. При цьому слід враховувати не тільки втрати активної потужності в самих трансформаторах, але й втрати активної потужності, які виникають в системі електропостачання по всьому колі живлення від генераторів електростанцій до трансформаторів, що розглядаються. Ці втрати виникають із-за споживання трансформаторами реактивної потужності і називаються приведеними:

$$\Delta P'_{T1} = \Delta P'_{xx.T1} + K_{заб.T1.норм.}^2 \cdot \Delta P'_{кз.T1} = 4,237 \text{ кВт};$$

$$\Delta P'_{T2} = \Delta P'_{xx.T2} + K_{заб.T2.норм.}^2 \cdot \Delta P'_{кз.T2} = 2,282 \text{ кВт}.$$

- приведені втрати у всіх трансформаторах за варіантами:

$$\Delta P'_{1-2.T1} = n_1 \cdot \Delta P'_{T1} = 4,237 \text{ кВт}; \Delta P'_{1-2.T2} = n_2 \cdot \Delta P'_{T2} = 4,564 \text{ кВт}.$$

- втрати електроенергії за рік:

$$\Delta E_{T1} = \Delta P'_{1-2.T1} \cdot t_{вкл} = 37116,82 \text{ кВт-год}; \Delta E_{T2} = \Delta P'_{1-2.T2} \cdot t_{вкл} = 39985,57 \text{ кВт-год}.$$

- вартість втрат електроенергії за рік:

$$C_{e.T1} = \Delta E_{T1} \cdot m = 389726,62 \text{ грн}; C_{e.T2} = \Delta E_{T2} \cdot m = 419848,53 \text{ грн}.$$

- капітальні затрати:

$$K_{зaмп.T1} = n_1 \cdot C_{T1} = 312000 \text{ грн}; K_{зaмп.T2} = n_2 \cdot C_{T2} = 458000 \text{ грн}.$$

- річні експлуатаційні затрати:

$$C_{a.T1} = \varphi \cdot K_{зaмп.T1} = 31200 \text{ грн}; C_{a.T2} = \varphi \cdot K_{зaмп.T2} = 45800 \text{ грн}.$$

- сумарні річні затрати:

$$C_1 = C_{e.T1} + C_{a.T1} = 420926,62 \text{ грн}; C_2 = C_{e.T2} + C_{a.T2} = 465648,53 \text{ грн}.$$

В четвертий блок входять економічні показники порівняння трансформаторів, а саме: термін окупності та економічна ефективність:

- термін окупності - показник, який показує час, протягом якого проект може себе окупити (значення не повинно перевищувати 7 років):

$$T_{окT1} = \frac{K_{зmT2} - K_{зmT1}}{C_2 - C_1} = 3,265 \text{ роки}.$$

- економічна ефективність - показує суму зекономлених грошей при виборі економічно-доцільнішого варіанту:

$$E = C_1 - C_2 = 44721,9 \text{ грн}.$$

Розрахунок передбачає виконання значної кількості багатоетапних обчислень. При виконанні таких розрахунків вручну зростає трудомісткість процесу, ймовірність арифметичних і методичних помилок, а також ускладнюються перевірка та коригування результатів.

Крім того, ручні розрахунки є малоефективними при необхідності багаторазового перерахунку параметрів у разі зміни вхідних даних, зокрема

потужності трансформатора, режиму навантаження або вартості електроенергії. Це суттєво ускладнює проведення порівняльного аналізу кількох варіантів трансформаторів і обмежує можливість оптимізації за економічними критеріями.

Тому, авторами статті запропоновано використання математичного пакету Mathcad 15.0. Представимо отримані результати у вигляді відповідних блоків.

Перший блок (рис.1):

$$S_p := 378 \quad t_{vkl} := 365 \cdot 24 = 8760 \quad K_{zm.vtr} := 0.02 \quad m := 10.5 \quad \phi := 0.1$$

Рис. 1. Перший блок в середовищі Mathcad 15.0

Другий блок (рис. 2):

$S_{tr1} := 630$	$S_{tr2} := 400$
$n_1 := 1$	$n_2 := 2$
$\Delta P_{xx.tr1} := 1.05$	$\Delta P_{xx.tr2} := 0.83$
$\Delta P_{kz.tr1} := 7.6$	$\Delta P_{kz.tr2} := 5.5$
$I_{xx.tr1} := 1.6$	$I_{xx.tr2} := 1.8$
$U_{kz.tr1} := 5.5$	$U_{kz.tr2} := 4.5$
$C_{tr1} := 312000$	$C_{tr2} := 229000$

Рис. 2. Другий блок в середовищі Mathcad 15.0

Третій блок (рис. 3):

$K_{zav.tr1.nom} := \frac{S_p}{n_1 \cdot S_{tr1}} = 0.6$	$K_{zav.tr2.nom} := \frac{S_p}{n_2 \cdot S_{tr2}} = 0.472$
$K_{zav.tr1.avar} := \frac{S_p}{1.4 \cdot S_{tr1}} = 0.429$	$K_{zav.tr2.avar} := \frac{S_p}{1.4 \cdot S_{tr2}} = 0.675$
$\Delta Q_{xx.tr1} := S_{tr1} \cdot \frac{I_{xx.tr1}}{100} = 10.08$	$\Delta Q_{xx.tr2} := S_{tr2} \cdot \frac{I_{xx.tr2}}{100} = 7.2$
$\Delta Q_{kz.tr1} := S_{tr1} \cdot \frac{U_{kz.tr1}}{100} = 34.65$	$\Delta Q_{kz.tr2} := S_{tr2} \cdot \frac{U_{kz.tr2}}{100} = 18$
$\Delta P_{xx.sh.tr1} := \Delta P_{xx.tr1} + K_{zm.vtr} \cdot \Delta Q_{xx.tr1} = 1.2516$	$\Delta P_{xx.sh.tr2} := \Delta P_{xx.tr2} + K_{zm.vtr} \cdot \Delta Q_{xx.tr2} = 0.974$
$\Delta P_{kz.sh.tr1} := \Delta P_{kz.tr1} + K_{zm.vtr} \cdot \Delta Q_{kz.tr1} = 8.293$	$\Delta P_{kz.sh.tr2} := \Delta P_{kz.tr2} + K_{zm.vtr} \cdot \Delta Q_{kz.tr2} = 5.86$
$\Delta P_{sh.tr1} := \Delta P_{xx.sh.tr1} + K_{zav.tr1.nom}^2 \cdot \Delta P_{kz.sh.tr1} = 4.237$	$\Delta P_{sh.tr2} := \Delta P_{xx.sh.tr2} + K_{zav.tr2.nom}^2 \cdot \Delta P_{kz.sh.tr2} = 2.282$
$\Delta P_{1.2.sh.tr1} := n_1 \cdot \Delta P_{sh.tr1} = 4.237$	$\Delta P_{1.2.sh.tr2} := n_2 \cdot \Delta P_{sh.tr2} = 4.565$
$\Delta E_{tr1} := \Delta P_{1.2.sh.tr1} \cdot t_{vkl} = 37116.82$	$\Delta E_{tr2} := \Delta P_{1.2.sh.tr2} \cdot t_{vkl} = 39985.57$
$C_{e.tr1} := \Delta E_{tr1} \cdot m = 389726.62$	$C_{e.tr2} := \Delta E_{tr2} \cdot m = 419848.53$
$K_{z.tr1} := n_1 \cdot C_{tr1} = 312000$	$K_{z.tr2} := n_2 \cdot C_{tr2} = 458000$
$C_{a1} := \phi \cdot K_{z.tr1} = 31200$	$C_{a2} := \phi \cdot K_{z.tr2} = 45800$
$C_1 := C_{e.tr1} + C_{a1} = 420926.62$	$C_2 := C_{e.tr2} + C_{a2} = 465648.53$

Рис. 3. Третій блок в середовищі Mathcad 15.0



ABSCHNITT 15.
ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK

Четвертий блок (рис. 4):

$$T_{ok} := \frac{K_{z.tr2} - K_{z.tr1}}{C_2 - C_1} = 3.265$$

$$E := |C_1 - C_2| = 44721.9$$

Рис. 4. Четвертий блок в середовищі Mathcad 15.0

Використання математичного пакету Mathcad 15.0 дозволяє автоматизувати процес розрахунків, забезпечити наочне представлення формул у традиційному інженерному вигляді та значно скоротити час виконання обчислень. Програмне середовище Mathcad 15.0 забезпечує швидке виконання параметричних досліджень, зручну зміну вхідних даних, графічне відображення результатів і мінімізацію ймовірнісних помилок. Це робить Mathcad 15.0 ефективним інструментом для реалізації математичних моделей і проведення техніко-економічного порівняння трансформаторів.

У підсумку застосування Mathcad 15.0 значно підвищує точність, наочність та ефективність розрахунків у порівнянні з ручними методами, що є важливим при вирішенні інженерних задач у галузі електроенергетики.

Проте навіть використання такого підходу має ряд недоліків. Потрібно відмітити, що для користування математичним пакетом Mathcad 15.0 потрібно мати ліцензійний програмний продукт та навички роботи з програмою. Тому, не кожен працівник енергетичної компанії може скористатися даним продуктом.

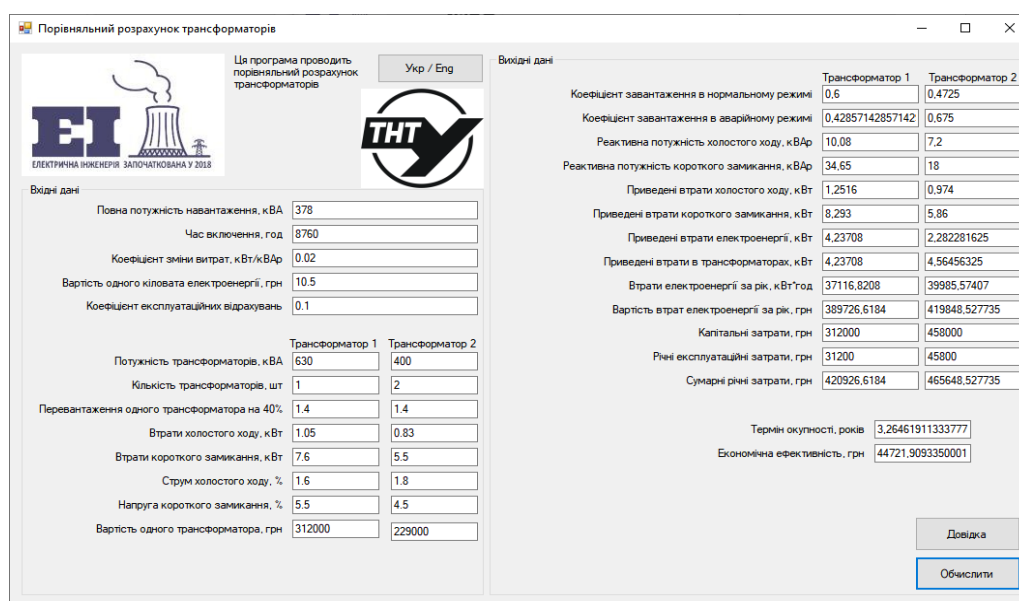


Рис. 5. Загальний вигляд програмного модуля «Порівняльний розрахунок трансформаторів»

Авторами статті запропонована програма для розрахунку порівняльних характеристик трансформаторів, розроблена з використанням Windows Forms на мові програмування C# [1, 2]. Даний продукт є безкоштовним, може працювати на будь-якій версії Microsoft Windows, не потребує навиків роботи з програмою. На рис. 5 зображено загальний вигляд програмного модуля «Порівняльний розрахунок трансформаторів».

Необхідно зауважити, що в запропонованому програмному модулі в перший стовпець для правильності розрахунків потрібно вносити початкові дані потужнішого трансформатора. Також потрібно звернути увагу, що розділовим знаком в вхідних даних є кома, а не крапка.

Так само як і при використанні математичного пакету Mathcad 15.0, програму умовно розділено на чотири блоки.

Потрібно відмітити, що дана програма може працювати на українському (рис. 5) та англійському інтерфейсі (рис. 6).

Рис. 6. Загальний вигляд програми «Порівняльний розрахунок трансформаторів» (англійський інтерфейс)

В [1, 2] автори даної статті детально описали запропонований програмний продукт з точки зору програмування, зосередивши увагу на структурі програмного забезпечення, логіці реалізації алгоритмів та особливостях використання обчислювального середовища. Водночас у роботі [1, 2] відсутній чіткий опис методики, яка покладена в основу розрахунків.



ABSCHNITT 15.
ENERGIE- UND ELEKTROTECHNIK

Тому, автори статті доопрацювали даний програмний продукт за рахунок додавання довідки, що містить повну методику, яка лежить в основі запропонованого продукту (рис. 7).

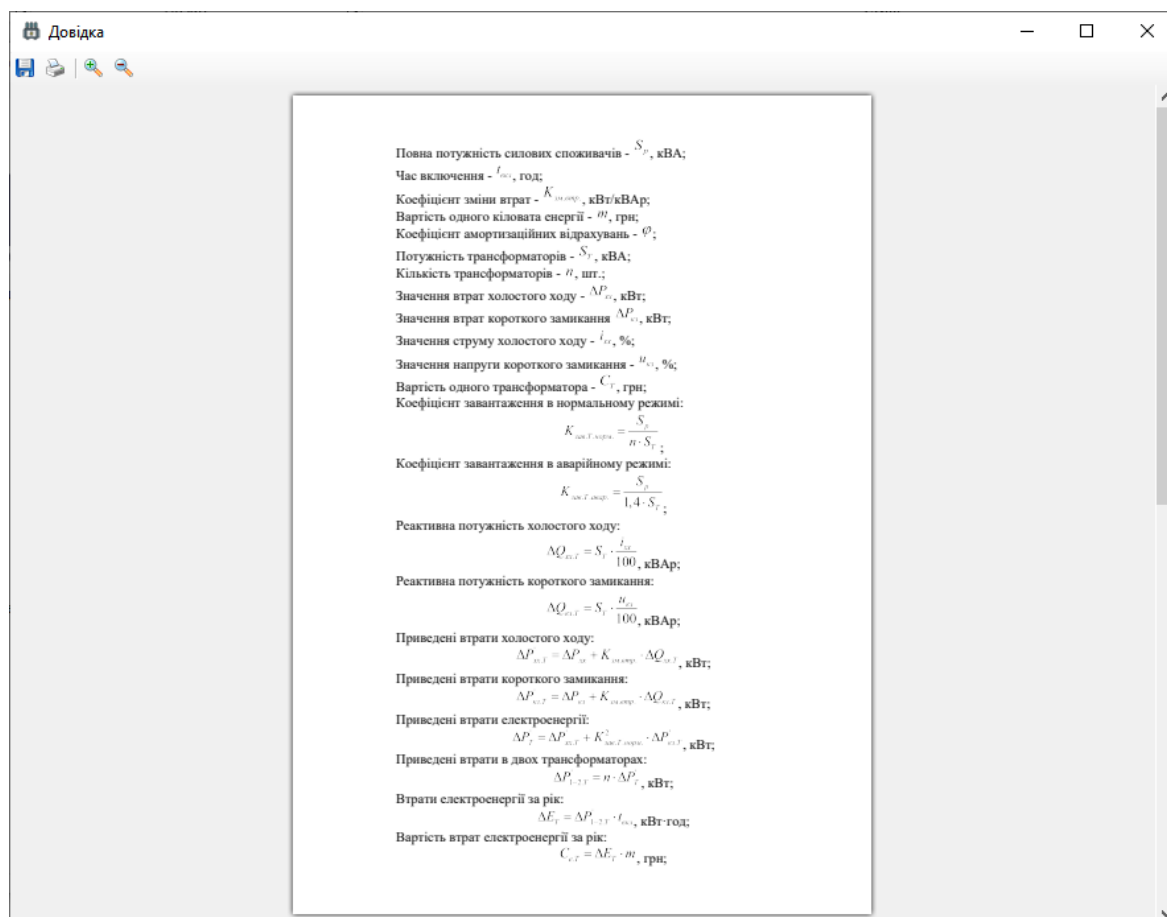


Рис. 7. Довідка програмного модуля.

Висновки. У статті розглянуто актуальну задачу підвищення енергоефективності та економічної доцільності вибору силових трансформаторів у системах електропостачання. Обґрунтовано доцільність застосування математичного моделювання для розрахунку порівняльних характеристик трансформаторів з урахуванням економічних критеріїв, що дозволяє враховувати не лише технічні параметри, але й економічні показники протягом усього терміну експлуатації.

Запропоновано математичну методику, структуровану у вигляді чотирьох блоків, яка охоплює вхідні дані, паспортні характеристики трансформаторів, розрахунок техніко-економічних показників та визначення критеріїв

економічної ефективності. Такий підхід забезпечує комплексну оцінку втрат електроенергії, приведених витрат, капітальних і експлуатаційних затрат, а також терміну окупності різних варіантів трансформаторів.

Показано, що використання зазначених розрахунків вручну є трудомістким і супроводжується підвищеною ймовірністю помилок, особливо при проведенні параметричних досліджень та порівняльного аналізу кількох варіантів. Використання математичного пакету Mathcad 15.0 дозволяє автоматизувати розрахунковий процес, підвищити точність та наочність результатів, однак потребує наявності ліцензійного програмного забезпечення та відповідної кваліфікації користувача.

Альтернативною є розроблений програмний модуль на мові програмування C# з використанням технології Windows Forms, який забезпечує зручний інтерфейс, підтримку української та англійської мов і реалізацію повного алгоритму порівняльних характеристик трансформаторів. На відміну від попередніх реалізацій, програмний продукт доопрацьовано шляхом додавання довідникової інформації з повним описом математичної моделі, що підвищує прозорість розрахунків та наукову обґрунтованість отриманих результатів.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та можливість практичного застосування розробленої математичної моделі і програмного забезпечення при проектуванні, модернізації та реконструкції трансформаторних підстанцій різних класів напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Буняк, О., Стасів, А., Орбчук, Б., & Судомир, В. (2025). Розробка програмного модуля для розрахунку порівняльних характеристик трансформаторів з врахуванням умови економічності. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 357(5.2), 115-122. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-73>
- [2] Стасів А.З., Судомир В.П., Миколишин В.В., Сисак І.М., Буняк О.А. Комплекс програмних модулів для проектування електропостачання промислових та муніципальних об'єктів // IX International Scientific and Practical Conference «EDUCATION AND SCIENCE OF TODAY: INTERSECTORAL ISSUES AND DEVELOPMENT OF SCIENCES», Cambridge, 28 November 2025. – Cambridge : «P.C. Publishing House» «UKRLOGOS Group», 2025. – С. 150–157. – ISBN 978-1-8380558-4-4. – DOI 10.36074/logos-28.11.2025.028
- [3] Романюк Ю., Соломчак О., Федорів М. Вибір оптимальної потужності силових трансформаторів знижувальних підстанцій підприємств нафтогазової галузі з урахуванням умови економічності. *Нафтогазова енергетика*. 2015. № 1. С. 45–51.
- [4] Харченко В., Якунін О., Воропай В. Електропостачання міст та промислових підприємств : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання галузі знань 14 – Електрична інженерія, спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, професійне спрямування «Електротехнічні системи електроспоживання») : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 238 с.
- [5] Лежнюк П., Добровольська Л., Кулик В. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем : навч. посіб. / ред. П. Лежнюк. Луцьк : ІВВ Луц. НТУ, 2018. 328 с.

