

al induction between winding parts by modelling reactive components of winding impedance with opposite signs have been developed. Electromagnetic processes in certain points of a high-voltage winding of the transformer in different modes of operation are studied using the developed mathematical models of a power transformer.

**Scientific novelty.** The methodology allows formation of electrical equipment with high voltage windings mathematical models, which take into consideration parameters distribution and allow studying electromagnetic processes inside windings, without experimental research of real electromagnetic processes inside electrical equipment for model adequacy confirmation.

**Practical value.** For the first time Power engineering field obtains a tool for evaluation of quantitative indicators of electromagnetic processes in a random point of a high voltage winding of a distributed-parameters transformer with mutual induction between its elements, which is influenced by network internal random frequency overvoltage. The tool can be used during all design, production, test and electrical equipment operation stages.

**Keywords:** *electrical equipment, mathematical models, high voltage windings, electromagnetic processes*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук А.А. Маліновським. Дата надходження рукопису 25.10.13.*

УДК 621.316.1

А.Г. Кігель

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м.Дніпропетровськ, Україна,  
e-mail: anatoliy.kigel@gmail.com

## ПРИВЕДЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ДО РОЗРАХУНКОВИХ УМОВ

A.G. Kigel

State Higher Educational Establishment “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,  
e-mail: anatoliy.kigel@gmail.com

## REDUCTION OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF ELECTRIC NETWORKS TO RATED CONDITIONS

**Мета.** Встановити можливість досягнення необхідного рівня достовірності розрахункових показників ефективності роботи електроенергетичних об'єктів споживачів шляхом приведення вихідних даних до визначених розрахункових умов при забезпеченні мінімуму загальних витрат по електричній мережі.

**Методика.** Використані чисельні методи розрахунків на базі системи рівнянь технічного стану та техніко-економічної моделі функціонування електричної мережі для аналізу впливу й прогнозування (розрахунків) показників ефективності в залежності від початкових умов протікання режимів навантаження електричних мереж споживачів. Достовірність результатів досліджень підтверджується шляхом перевірки створених моделей і методів розв'язання відповідних рівнянь стану мережі.

**Результати.** Досягнення достовірних показників ефективності роботи електричних мереж і впроваджуваних заходів можливо тільки при достатній точності вихідної інформації про стан електрообладнання та цінах на матеріали й послуги. Значення цін і послуг, також співвідношення між ними, повинні бути приведені до визначених умов. Доведено, що приведення необхідно виконувати за допомогою дисконтуючих множників.

**Наукова новизна.** Полягає в доведенні можливості використання рівняння загальних витрат для оцінки впливу зміни параметрів режиму на результати їх приведення до розрахункових умов у залежності від початкових вихідних даних та показників протікання режимів в електричних мережах.

**Практична значимість.** Теоретичні дослідження та практичні результати дозволяють отримати достовірні показники ефективності впроваджених заходів з їх підвищення. Це дозволяє обґрунтувати доцільність впровадження заходів і отримати достовірні значення показників ефективності роботи мереж, що необхідно в теперішніх умовах експлуатації.

**Ключові слова:** *електричні мережі, приведені витрати, капітальні вкладення, експлуатаційні витрати, сукупність економічних і технічних параметрів*

**Постановка проблеми.** В останні роки значно погіршилися умови функціонування електричних мереж систем електропостачання. Причиною цього є технічні

та економічні чинники, що негативно впливають на роботу мереж і знижують показники ефективності їх роботи [1, 2]. Для зниження впливу цих негативних факторів на техніко-економічні показники роботи мереж розробляються, а потім впроваджуються, відповідні за-

ходи. Досягнення вказаної мети можливо бути забезпечене за умови правильного вибору варіантів (шляхів) досягнення прийнятного рівня ефективності роботи мереж. Встановлення значень техніко-економічних показників мереж можливе шляхом відповідних розрахунків як у процесі проектування, так і у процесі експлуатації. Дослідження показують, що такі розрахунки на стадії проектування носять перспективний характер, так як, виходячи з особливостей стану економіки, інтервал часу між проектуванням і реалізацією проекту має величину від одного до декількох років. Крім того, потрібно розуміти, що вкладення до мережі носять практично одночасний характер, а повернення інвестицій і отримання прибутку триває досить тривалий період часу. Це є особливістю техніко-економічних розрахунків перспективного характеру, яка полягає в тому, що при цьому маємо справу з об'єктами, які функціонують тривалий період часу (до 50 років). При цьому неможливо достатньо точно передбачити величину та направлення змін характеристик як самого об'єкту, так і зовнішніх умов його функціонування. Тому вихідні дані, що використовуються в перспективних техніко-економічних розрахунках, можуть характеризуватися деякою неточністю, а в деяких випадках – досить суттєвими змінами можливих значень. Це вказує на неоднорідність вихідних даних. При цьому потрібно підкреслити особливість техніко-економічних розрахунків в енергетиці, коли грошові показники приводяться до певних умов, а параметри мереж і навантаження приймають такими, що мають місце на момент виконання розрахунків. Таке положення не забезпечує можливість показати фактичну ефективність функціонування мереж через недостовірність отримуваних показників роботи об'єктів.

**Виділення невирішеної проблеми.** В отриманні достовірних показників найбільш зацікавлені енергопостачальні компанії. В основі такої зацікавленості енергопостачальних компаній лежить тиск ринку, зростання конкуренції, мотивація в економії додаткових витрат і зниження рівня завад у мережах. У цьому відношенні спостерігається зростаючий інтерес до вирішення вказаних проблем шляхом перетворень в електроенергетиці на базі нової концепції, що дістала назву Smart Grid [2].

За результатами досліджень встановлюємо, що в наведених випадках необхідним елементом техніко-економічних розрахунків стає необхідність приведення всіх вихідних даних до єдиного розрахункового періоду часу та до єдиної умови – забезпечення мінімуму приведених затрат при виборі стандартних параметрів електрообладнання мереж. Положення концепції Smart Grid показують, що в ринкових умовах значно зростають вимоги не тільки до точності розрахунків, але й достовірності визначення економічного ефекту, що буде досягнутий у результаті реалізації проектних рішень. Зростання вимог пояснюється великими сумами коштів, що практично одночасно вкладаються у спорудження мережі, та тривалим терміном їх повернення. Задоволення вказаних вимог можливе при застосуванні на стадії проектування теоретично обґрунтованих методів

розрахунків і достовірних вихідних даних. При чому, висувається додаткова вимога до вихідних даних щодо паритету цін на матеріали, обладнання, послуги та на питому вартість (тариф) на втрачену електричну енергію. Не задоволення цієї додаткової вимоги щодо паритету цін на товари, обладнання, послуги та електричну енергію може приводити до різних висновків при поваріантних знаходженнях оптимальних рішень в енергетиці.

Крім того, за відсутності достовірних цінкових даних у [2] пропонується використовувати вихідні дані попередніх років шляхом приведення їх цін до теперішніх умов шляхом застосування коефіцієнта дефляції ( $k_{\text{деф}}$ ). Тому необхідно визначитися, як таке приведення впливатиме на величину загальних витрат при функціонуванні об'єкту в ринкових відносинах.

**Цілі досліджень.** Результати досліджень наукових джерел показують, що набір економічних показників, які визначають ефективність роботи мереж, розширився [2]. На жаль, значення цих показників не можна вважати абсолютно сталими в найближчі 10–15 років, а, отже, не можна покласти їх в основу норм для проектування та експлуатації. Це стосується, насамперед, таких економічних параметрів, як норма дисконту ( $E$ ), коефіцієнт дефляції ( $k_{\text{деф}}$ ) і ціна електроенергії ( $c_0$ ), що істотно залежать від поточної соціально-економічної ситуації, курсу національної валюти по відношенню до долара, темпів інфляції і т.п. Як вказувалося вище, мають місце значні інтервали часу між проектуванням та впровадженням оптимізаційного заходу. Вказані обставини накладають певні особливості на проведення досліджень. Дослідження виконаємо для таких розповсюджених улаштувань, якими є лінії електропередачі [1].

**Основний матеріал досліджень.** У ринкових умовах узагальненим критерієм є прибуток, але, за певних умов, можливо користуватися значеннями зведених (загальних) витрат. Для визначення величини загальних витрат у сучасних умовах необхідно використовувати такий інтегральний економічний показник, як дисконтовані витрати на будівництво та експлуатацію лінії електропередачі за розрахунковий період ( $T_p$ ) [1, 2]

$$Z = I[a(E_n + \alpha_{\text{ол}})/E_n + bF(E_n + \alpha_{\text{ол}})/E_n + 3I^2 \rho \tau_{\text{нб}} c_0 / FE_n], \quad (1)$$

де  $a$  – складова питомих капітальних вкладень  $k_0$ , що не залежить від площі перетину проводів (жил кабелів), тис.грн/км;  $b$  – друга складова  $k_0$ , що залежить від площі перетину проводів (жил кабелів) або коефіцієнт, що визначає нахил залежності  $k_0 = f(F)$  по відношенню до горизонтальної осі, тис.грн/(км·мм<sup>2</sup>);  $\alpha_{\text{ол}}$  – відрахування на експлуатацію.

Складові рівняння (1) показані на рис.1. Прямі 1 та 2 – дві перші складові рівняння (1), а крива 3<sub>n</sub> – вартість втрат електричної енергії за рік (третья складова рівняння (1)). Оптимальне рішення для найбільш доцільного варіанта за оптимізаційним параметром знайдемо як

$$\partial Z / \partial F = b(E_H + \alpha_{ол}) - 3I^2 \rho \tau_{нб} c_0 / F^2 = 0. \quad (2)$$

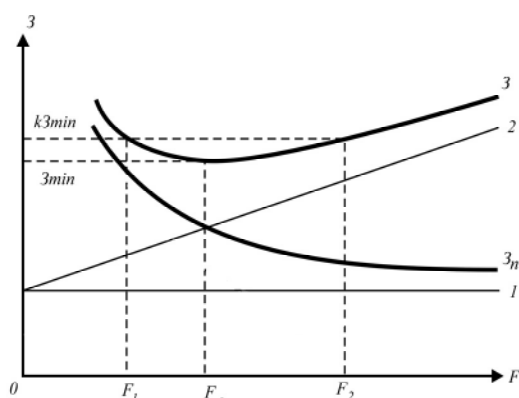


Рис. 1. Залежність функції загальних витрат (3) від оптимізаційного параметру (F): 1 – капітальні вкладення; 2 – вартість втрат енергії; 3 – величина загальних витрат; 3<sub>n</sub> – вартість втрат електричної енергії за рік

З рівняння (2) визначаємо оптимізаційний параметр за умови мінімуму функції (1)

$$F_e = I_{нб} \sqrt{3 \tau_{нб} c_0 \rho / b(E_H + \alpha_{ол})}. \quad (3)$$

Рівняння (2), з урахуванням рівняння (3), набуває вигляду

$$(E_H + \alpha_{ол})b = 3I^2 \rho \tau_{нб} c_0 / F_e^2. \quad (4)$$

Аналізуючи рівняння (4), встановлюємо, що його ліва частина являє собою ту частку капітальних вкладень, яка залежить від площі перерізу проводу (жили кабелю), а права частина рівняння (4) – вартість втраченої електричної енергії. Таким чином, умовою наявності мінімуму функції загальних витрат [1] є рівність між вартістю втрат енергії за рік та щорічних витрат, що визначаються тією часткою капітальних вкладень, яка залежить від площі перерізу проводів (жили кабелів).

При виборі стандартних перерізів буде мати місце збільшення загальних витрат у *k*-разів. Виходячи із загальних положень щодо точності розрахунків в енергетиці, у першому наближенні приймаємо, що зростання не повинно перевищувати 10% [1].

Прийнявши вказані умови, рівняння (1) використовуємо для дослідження положень щодо впливу факторів на значимість функції при виконанні приведення. Для цього формулу (1), з урахуванням умов приведення параметрів, представимо наступним чином (на один кілометр лінії електропередачі) [1]

$$Z_0 = A + B \cdot F + C / F; \quad (5)$$

$$A = ak_{деф} [(1 + E)^{-1} - (1 - \alpha_{рен} T_e) * (1 + E)^{T_p} + \alpha_{обсл} D_p] = ak_{деф} D_{екв}; \quad (6)$$

$$B = bk_{деф} [(1 + E)^{-1} - (1 - \alpha_{рен} T_e)(1 + E)^{T_p} + \alpha_{обсл} D_p] = bk_{деф} D_{екв}; \quad (7)$$

$$C = I_{розр}^2 (3 \cdot c_0 \cdot \rho \cdot \tau \cdot D_p \cdot 10^{-3}) = I_{розр}^2 C_p; \quad (8)$$

$$D_p = \sum_{t=2}^{T_p} (1 + E)^{-t}, \quad (9)$$

де *D<sub>p</sub>* – розрахунковий дисконтуючий множник за період експлуатації до закінчення розрахункового періоду, що визначається тільки значеннями його тривалості та норми дисконту; *D<sub>екв</sub>* – еквівалентний дисконтуючий множник, що дисконтує величин, які входять *A* та *B*; *E* – норма дисконту [1].

Перший із двох додатків у формулі (5) представляє собою складову сумарних витрат, пропорційну вартості спорудження 1 км лінії (*Z<sub>ол</sub>*), а останнє – витрати на відшкодування втрат електричної енергії (*Z<sub>0 ИΔΔЭ</sub>*). Тоді рівняння (5) представимо наступним чином

$$Z_0 = Z_{0 л} + Z_{0 ИΔΔЭ} = K_б D_{екв} + Z_{0 ИΔΔЭ}, \quad (10)$$

де *K<sub>б</sub>* = *k<sub>деф</sub>* *k<sub>0</sub>*.

Таким чином, величина загальних дисконтованих витрат є функцією певної сукупності економічних і технічних параметрів [1].

Отримана функція (10) дозволяє визначити значення загальних витрат і оцінити їх чутливість до варіації факторів, що впливають на можливі значення вихідної інформації.

Розглянемо послідовно, якими є значення перерахованих вище параметрів, що повинні бути покладені в основу техніко-економічних розрахунків, та які можливі діапазони їх зміни.

**Норматив дисконтування.** Як уже зазначалося, у нинішній ситуації має сенс оперувати індивідуальною нормою дисконту, установлюваною господарюючим суб'єктом (інвестором). Згідно з рекомендацією до подібних розрахунків, значення *E* задається на підставі попередніх досліджень ринку капіталу. У світовому масштабі, згідно з даними джерел, норма дисконту лежить у діапазоні 0,05–0,15 [1]. Будемо розглядати діапазон зміни *E* від 0,05 до 0,15, а в якості базового значення приймемо *E<sub>баз</sub>* = 0,1.

**Тривалість розрахункового періоду.** Не повторюючи аргументів, викладених у [1], відзначимо, що для електричних мереж районного та місцевого значення, у відповідності до сформованої практикою їх проектування на перспективу, в якості розрахункового доцільно розглядати термін 5–15 років, а в якості базового значення прийняти *T<sub>p, баз</sub>* = 10 років.

**Питома вартість втраченої електроенергії.** У зв'язку із процесом реструктуризації електроенергетичної галузі, виявлення оптимальних параметрів енергетичних об'єктів повинно проводитися з урахуванням економічних відносин між зазначеними суб'єктами. Для електромережних ланок загальної структури ці взаємини виражаються в купівлі-

продажі електроенергії на кордонах їх економічної відповідальності. У зв'язку з цим, при зіставленні проектних варіантів нових або реконструйованих об'єктів електричних мереж, оцінка витрат на відшкодування втрат електроенергії повинна проводитися за її ринковою вартістю в зазначених межах.

При цьому потрібно проводити перерахунок, що враховує зміну у часі курсу долара по відношенню до гривні. З урахуванням змін курсу та темпів зниження інфляції динаміку зростання курсу долара на таку віддалену перспективу прогнозувати важко. Тому для дослідження чутливості загальних витрат до зміни ціни електроенергії нами прийняті її значення 0,4; 0,8 і 1,2грн/(кВт·год), а в якості базового значення  $c_{\text{баз}} = 0,8\text{грн}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$ , що відповідає, в якійсь мірі, стану енергетики країни.

*Відрахування від капітальних вкладень.* Щорічні відрахування на реновацію, що визначають значення ліквідаційної вартості ЛЕП на момент закінчення розрахункового періоду, як відомо, залежать від тривалості фізичного терміну служби об'єкта.

Оскільки далі розглядаються повітряні лінії (ПЛ) електропередачі, що споруджуються на металевих або залізобетонних опорах, то значення  $\alpha_{\text{рен}}$  прийняте рівним 0,02відн.од./рік. Сумарні відрахування на ремонт і обслуговування для таких ліній  $\alpha_{\text{обсл}}$  складають 0,008відн.од./рік.

*Базова вартість спорудження ЛЕП.* У досліджах використовуємо укрупнені показники вартості спорудження 1км ПЛ ( $Z_{\text{ол.баз}}$ ). Апроксимація  $Z_{\text{ол.баз}}$  функціями призводить до значень коефіцієнтів  $a$  і  $b$  (1), що лежать у межах  $a = (21,0...33,67)\text{тис.грн}/\text{км}$ ,  $b = (0,04...0,0556)\text{тис.грн}/(\text{мм}^2\text{км})$ .

*Коефіцієнт дефляції.* У минулий десятирічний період ціни на промислову продукцію зростали швидше тарифів на електроенергію, оскільки зростання останніх регулювалося відповідними промисловими та енергетичними комісіями. Після серпневої кризи 1998р. стався певний стрибок цін, і до початку 2000р. коефіцієнт подорожчання по відношенню до цін 1991р. досяг значення 20. На сьогоднішній день за деякими оцінками ця цифра збільшилася для ряду видів промислової продукції майже до 30. Прогнозувати темпи подальшого зростання значення  $k_{\text{деф}}$  складно. Очевидно лише те, що це зростання буде поступово сповільнюватися в міру зниження індексу загальної інфляції. Для коректного рішення поставленої задачі на перспективу 10–15 років необхідно встановити кореляцію між темпами зростання вартості електроенергії та зміною ступеня подорожчання устаткування для ЛЕП, що в змозі зробити лише фахівці з макроекономіки [2].

Разом з тим, якщо допустити, що зміни цін відбуваються синхронно, а існуюча диспропорція між вартісними показниками на матеріали, обладнання, послуги та енергію збережеться в майбутньому, то відношення  $k_{\text{деф}}/c_0$  слід вважати незмінним і величина загальних витрат за інших рівних умов буде залишатися стабільною у часі. Однак приймати таке припущення для подальшого аналізу ризиковано через не-

визначеності прогнозу зміни обох показників. Зрозуміло лише, що при розрахунку за наведеними вище формулами, малим значенням  $k_{\text{деф}}$  повинні відповідати і менші значення  $c_0$ . Якщо тільки для оцінки чутливості до зміни інших економічних параметрів, то можна обмежитися будь-яким одним значенням  $k_{\text{деф}}$ , в якості якого для подальших розрахунків приймемо значення  $k_{\text{деф}} = 30$ .

*Розрахунковий та еквівалентний дисконтуючі множники.* Розрахунковий дисконтуючий множник  $D_{\text{р.е}}$  (9) є функцією норми дисконту та тривалості розрахункового періоду. Він має часову розмірність (рік) і за своїм фізичним змістом являє собою показник зміни у часі вартості капіталу за розрахунковий період. Дійсно, за умови незмінності вартості капіталу для визначення будь-якої складової витрат експлуатації (за термін  $T_e = T_p - 1$ ), достатньо було б просто помножити незмінну величину щорічних витрат на час експлуатації до закінчення розрахункового періоду, тобто  $T_e$ . У реальній ситуації цей час скорочується до величини  $D_{\text{р.е}}$ . На рис. 2 показана зміна цього параметра у функції норми дисконту при трьох прийнятих вище значеннях тривалості розрахункового періоду (5, 10 і 15 років). Для базового поєднання параметрів ( $E_{\text{баз}} = 0,1$  і  $T_{\text{р.баз}} = 10$  років) його значення становить  $D_{\text{р.е.баз}} = 5,235$  років.

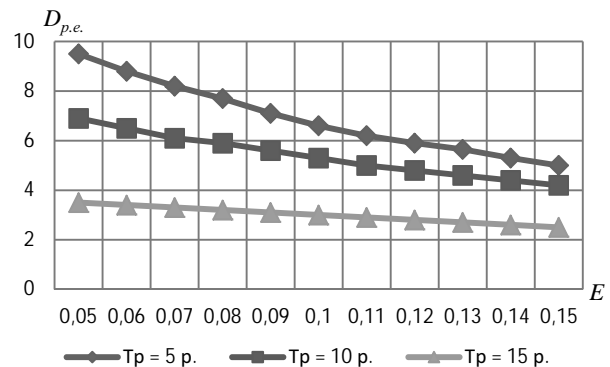


Рис. 2. Залежності розрахункового дисконтуючого множника ( $D_{\text{р.е}}$ ) від норми дисконту ( $E$ ) при тривалості розрахункового періоду ( $T_p$ )

Еквівалентний дисконтуючий множник  $D_{\text{екв}}$  фігурує у виразах (6) та (7) для коефіцієнтів  $A$  і  $B$  відповідно. Множник  $D_{\text{екв}}$  відображає дисконтування сукупності складових загальної функції витрат, що входять до  $Z_{\text{ол}}$ , а саме, власне вартості споруди та пропорційних їй ліквідаційної вартості й витрат на обслуговування та ремонт. На рис. 3 показано зміну цього комплексного параметра, визначеного, відповідно, до значень коефіцієнтів відрахувань на реновацію та на обслуговування й ремонт для ЛЕП, що споруджуються на залізобетонних опорах, у функції норми дисконту при трьох значеннях тривалості розрахункового періоду (5, 10 і 15 років). Для базового поєднання параметрів ( $E_{\text{баз}} = 0,1$  і  $T_{\text{р.баз}} = 10$  років) його значення становить  $D_{\text{екв.баз}} = 0,635$ відн.од.

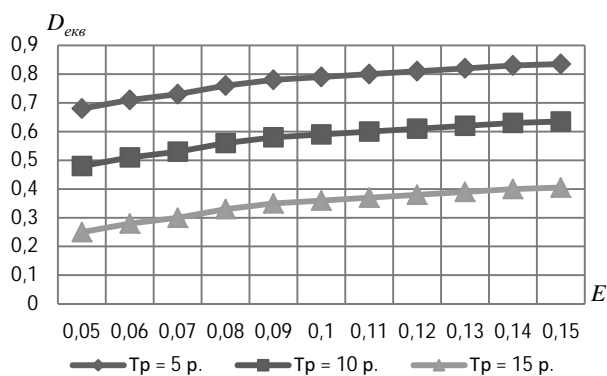


Рис. 3. Залежність еквівалентного дисконтуючого множника ( $D_{екв}$ ) від норми дисконту ( $E$ ) при тривалості розрахункового періоду ( $T_p$ )

Оцінка впливу норми дисконту та тривалості розрахункового періоду на величину загальних дисконтованих витрат. Для виконання такої оцінки доцільно формули (5–9) подати у вигляді, де параметри, що залежать від  $E$  та  $T_p$ , відособлені по відношенню до решти параметрів при мінімумі загальних витрат і економічному перетині проводів

$$I_{розр}/F_e = \sqrt{bk_{деф}/(3c_0\rho\tau \cdot 10^{-3})} \cdot \sqrt{\frac{D_{екв}}{D_{p,e}}} \quad (11)$$

Другий співмножник (11) при інших рівних умовах по суті відображає вплив дисконтування на величину загальних витрат.

Позначимо його через  $D$  і будемо називати коригувальним коефіцієнтом. За базових значень  $E$  та  $T_p$  коефіцієнт  $D = D_{баз} = (D_{екв,баз}/D_{p,e,баз})^{0,5}$ . При зазначених раніше значеннях  $D_{екв,баз}$  і  $D_{p,e,баз}$ , його значення становить  $D_{баз} = (0,635/5,235)^{0,5} = 0,348$ . При довільних значеннях  $E$  та  $T_p$  відносна величину коригуючого коефіцієнта визначається співвідношенням  $D_6 = D/D_{баз}$ . Залежність цього параметра від норми дисконту при прийнятих значеннях  $T_p$  показана на рис. 4.

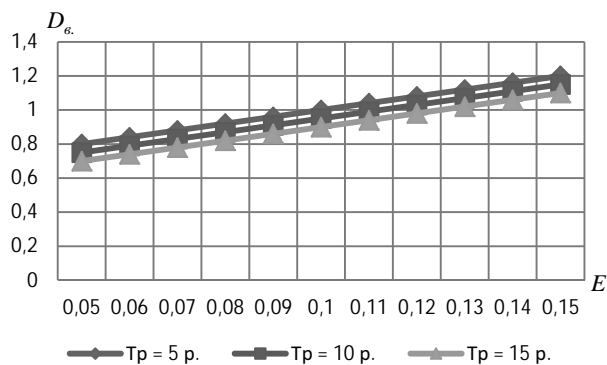


Рис. 4. Залежність відносного значення коригуючого коефіцієнта ( $D_6$ ) від норми дисконту ( $E$ ) за різної тривалості розрахункового періоду ( $T_p$ )

Застосування результатів досліджень розглянемо на наступному прикладі. Повітряна лінія електропередачі з номінальною напругою 35кВ, що споруджується на одноланцюгових сталевих опорах у Дніпропетровській області для енергопостачання поверхневого комплексу шахти.

Графік навантаження лінії характеризується тривалістю періоду максимального навантаження  $T_{нб} = 5000$  год/рік, тому  $\tau = 3411$  год/рік. В якості базового набору економічних параметрів прийємо  $E_{баз} = 0,1$  і  $T_{p,баз} = 10$  років, при яких  $D_{p,баз} = 5,235$  років,  $D_{екв,баз} = 0,635$  відн.од., а також  $c_0_{баз} = 0,8$  грн/(кВт·год) і  $k_{деф,баз} = 30$ . При цьому коефіцієнти функції (6) мають такі значення:  $A = ak_{деф}D_{екв} = 33,67 \cdot 30 \cdot 0,635 = 641,4$  тис. грн/км;  $B = bk_{деф}D_{екв} = 0,0556 \cdot 30 \cdot 0,635 = 1,059$  тис. грн/(км · мм<sup>2</sup>);  $C = I_{розр}^2(3 \cdot c_0 \cdot \rho \cdot \tau \cdot D_p \cdot 10^{-3}) = I_{розр}^2 \cdot (3 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 29,35 \cdot 3411 \cdot 5,235 \cdot 10^{-3}) = I_{розр}^2 \cdot 1,258$  тис. грн · мм<sup>2</sup>/км.

За результатами обчислень (5), що приведена до розрахункових умов, матиме вигляд (крива 1 на рис. 5)

$$Z_0 = 642 + 1,06F + 1,26I_{розр}^2/F. \quad (12)$$

У тому випадку, коли показники не приводити до розрахункових умов, то функція (5) матиме вигляд (крива 2 на рис. 5)

$$Z'_0 = 33,7 + 0,556F + 240,3I_{розр}^2/F. \quad (13)$$

Як бачимо відмінність між формулами (12) та (13) значима.

На рис. 5 представлені залежності  $Z_0$  та  $Z'_0$  цих двох складових для розрахункового значення струму 100А.

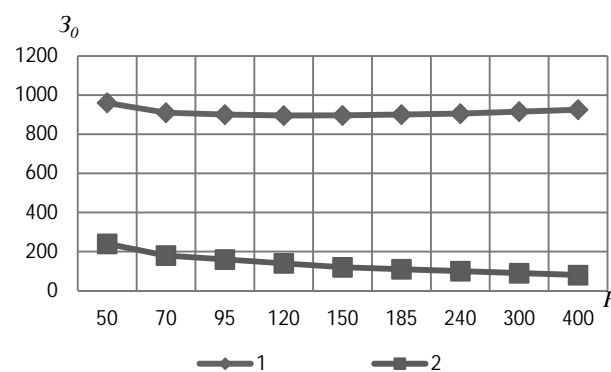


Рис. 5. Залежності питомих дисконтованих витрат ( $Z_0$ ) від перетину проводу ( $F$ ) за прийнятим розрахунковим струмом

**Висновки.**

1. Результати дослідів показали, що в ринкових умовах досягти достовірної інформації про ефективність роботи електричних мереж та впроваджуваних заходів можливо тільки при достатній точності вихідної інформації щодо стану електрообладнання та цінах на матеріали й послуги. Значення цін і послуг, також

співвідношення між ними, повинні бути приведені до визначених умов. Доведено, що приведення необхідно виконувати за допомогою дисконтуючих множників.

2. Аналіз залежностей свідчить про те, що тривалість розрахункового періоду незначно впливає на величину загальних витрат. У першому наближенні цим впливом можна знехтувати, тобто обмежитися розрахунком при базовому значенні  $T_p$ , що дорівнює 10 років. Максимальна похибка при цьому не перевищує 1,5%. Зміна норми дисконту позначається на величині загальних витрат набагато сильніше. На рис. 5 видно, що залежність  $D_e = f(E)$  при  $T_p = const$  досить близька до лінійної, що дозволяє виконувати наближену оцінку зміни загальних витрат при варіації норми дисконту  $E$  по відомому значенню для базового варіанта та тангенсу кута нахилу дотичної до кривої в базовій точці, що складає 0,71. При цьому 5%-ва зміна норми дисконту, як видно з рис. 5, призводить до зміни величини загальних витрат приблизно на 20%. Таким чином, нехтувати впливом зміни  $E$  неприпустимо.

#### Список літератури / References

1. Кігель Г.А. Электричні мережі систем електропостачання: 2-ге вид., перероб і доп. / Г.А. Кігель, Г.Г. Півняк. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011. – 318с.

Kigel, G.A. and Pivniak, G.G. (2011), *Elektrychni merezhi system elektropostachanniia* [Current Network of Power Supply Systems], National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine.

2. Жежеленко И.В. Экономические аспекты электромагнитной совместимости в сетях: сборник трудов седьмой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / И.В. Жежеленко, А.Г. Кигель // Энергетика: управление качеством и эффективность использования энергоресурсов. – Благовещенск: Издательство Амурского государственного университета, 2013. – 582 с.

Zhezhelenko, I.V. and Kigel, A.G. (2013), "Economic aspects of electromagnetic compatibility in networks", *Proc. of the International Conference "Energy: management, quality and energy efficiency"*, Blagoveshensk, ASU, Russia.

**Цель.** Установить возможность достижения необходимого уровня достоверности показателей эффективности работы энергетических объектов потребителей путем приведения выходных данных к определенным расчетным условиям при обеспечении минимума общих затрат по электрической сети.

**Методика.** Используются численные методы расчетов на базе системы уравнений технического состояния и технико-экономической модели функционирования электрической сети для анализа влияния и прогнозирования (расчетов) показателей эффективности в зависимости от начальных условий протекания режимов нагрузки электрических сетей потребителей. Достоверность результатов исследований подтверждается путем проверки созданных моделей и методов решения соответствующих уравнений состояния сети.

**Результаты.** Достижение достоверной информации об эффективности работы электрических сетей и внедряемых мероприятий возможно только при достаточной точности исходной информации о состоянии электрооборудования и ценах на материалы и услуги. Значения цен и услуг, также соотношение между ними, должны быть приведены к определенным условиям. Доказано, что приведение необходимо выполнять с помощью дисконтирующих множителей.

**Научная новизна.** Заключается в доказанной возможности использования уравнения приведенных затрат для оценки влияния изменения параметров режима на условия и результаты их приведения к расчетным условиям в зависимости от начальных условий и показателей протекания режимов в электрических сетях.

**Практическая значимость.** Теоретические исследования и практические результаты позволяют получить достоверные данные эффективности мероприятий по их повышению. Это позволяет обосновать целесообразность внедрения мероприятия и получить достоверные значения показателей эффективности работы сетей, что необходимо в нынешних условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** *электрические сети, приведенные затраты, капитальные вложения, эксплуатационные расходы, совокупность экономических и технических параметров*

**Purpose.** To provide the possibility of reaching the necessary level of authenticity of the performance efficiency indices of consumers' power objects by reduction of initial data to certain rated conditions, providing minimum general costs spent on the electric network.

**Methodology.** We have used the numerical methods of calculation on the base of the system of equalizations of technical state and technical-economic model of functioning of electric network for the analysis of influence and prognostication (calculations) of indices of efficiency depending on the initial conditions of the modes of loading of consumers' electric networks. Results of the research have been validated by verification of the created models and methods of solution of corresponding equalizations of the state of network.

**Findings.** The achievement of reliable information about the work efficiency of electric networks and the measures adopted is possible if only the accuracy of information about the initial state and prices on electrical equipment, materials and services is sufficient. The values of prices and services, and their correlation must be reduced to certain conditions. It is well-proven that the reduction must be executed by means of discount factors.

**Originality.** We have proved the possibility of use of the reduced costs equalization for the estimation of influence of operating mode parameters change on terms and results of their reduction to rated conditions depending on initial conditions and indices of the modes' behaviour in electric networks.

**Practical value.** Theoretical researches and practical results allow us to get reliable data of efficiency of measures adopted. It allows us not only to ground expediency of the measures adopted but also get the reliable values of indices of networks efficiency which is necessary in actual operating conditions.

**Keywords:** *electric networks, reduced expenses, capital investments, exploitation costs, combination of economic and technical parameters*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук  
Ф.П. Шкрабцем. Дата надходження рукопису 08.11.13.*

УДК 631.314.222.8

**Ю.Л. Саенко, д-р техн. наук, проф.,  
В.В. Нестерович, канд. техн. наук, доц.,  
А.С. Попов, канд. техн. наук**

Государственное высшее учебное заведение „Приазовский  
государственный технический университет“, г. Мариуполь,  
Украина, e-mail: artempopov9@gmail.com

## УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

**Yu.L. Sayenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
V.V. Nesterovych, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,  
A.S. Popov, Cand. Sci. (Tech.)**

State Higher Educational Institution “Pryazovskyi State Technical  
University”, Mariupol, Ukraine, e-mail: artempopov9@gmail.com

## DEVICE FOR MEASURING VOLTAGE TRANSFORMERS PROTECTION FROM FERRORESONANCE PROCESSES IN NETWORK WITH ISOLATED NEUTRAL POINT

**Цель.** Анализ принципов работы известных устройств защиты от феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью. Выявление особенностей протекания феррорезонансных переходных процессов. Разработка алгоритма и устройства защиты измерительных трансформаторов напряжения от феррорезонансных процессов, проверка корректности и работоспособности предложенных решений.

**Методика.** Разработана математическая модель электрической сети с изолированной нейтралью. Смоделированы процессы феррорезонанса и однофазного дугового замыкания на землю. Используются методы физического моделирования при оценке работоспособности устройства защиты от феррорезонанса. Применены экспериментальные методы при определении параметров измерительных трансформаторов напряжения, необходимых для математического моделирования.

**Результаты.** Выполнен анализ принципов действия широко известных устройств защиты от феррорезонанса. Выявлено, что в режиме однофазного дугового замыкания на землю возможно ложное срабатывание устройств защиты от феррорезонанса. На основе математического моделирования переходных процессов получен диапазон частот, на которых развиваются феррорезонансные колебания. Предложен способ идентификации режима феррорезонанса, основанный на спектральном анализе напряжения  $3u_0$ , а также способ распознавания однофазного дугового замыкания на землю, который основан на вычислении производной от напряжения  $3u_0$ . Проверена корректность и работоспособность предложенных алгоритмов путем подачи тестовых сигналов на вход устройства защиты.

**Научная новизна.** Научно обоснован метод идентификации режима феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью, который от известных методов отличается способом фильтрации напряжения  $3u_0$  (Фурье-анализ вместо режекторного фильтра), что позволяет более точно распознавать вид переходного процесса. Усовершенствован метод идентификации режима однофазного дугового замыкания на землю, который основан на вычислении производной от напряжения  $3u_0$  и сравнении с уставкой, что позволяет предупредить ложные срабатывания защиты в режиме однофазного дугового замыкания на землю.

**Практическая значимость.** Создан алгоритм защиты измерительных трансформаторов напряжения от феррорезонансных процессов. На основании данного алгоритма разработано устройство защиты. Предложенные методы идентификации разновидностей переходных процессов могут быть использованы при организации защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью.

**Ключевые слова:** *феррорезонанс, трансформатор напряжения, математическое моделирование, однофазное замыкание на землю, спектральный анализ, напряжение нулевой последовательности, режекторный фильтр*

**Постановка проблемы.** Одной из причин, приводящей к снижению надежности работы электриче-

ских сетей с изолированной нейтралью, является возникновение и существование феррорезонансных процессов (ФРП). Данные колебания развиваются между емкостью нулевой последовательности сети и