

# ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.3.013.62 УДК 621.314.21 УДК 621.314.222.8

Л.О. Никонець, д-р техн. наук, проф.,  
М.М. Молнар, М.Б. Сабат, І.Р. Бучковський

Національний університет „Львівська політехніка“, м.Львів,  
Україна, e-mail: myroslav003@gmail.com; molnarmisi@ukr.net

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА ЗА ДІЇ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ МЕРЕЖІ

L.O. Nykonets, Dr. Sci. (Tech), Professor,  
M.M. Molnar, M.B. Sabat, I.R. Buchkovskyi

National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine,  
e-mail: myroslav003@gmail.com; molnarmisi@ukr.net

## MODELLING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRANSFORMER WINDINGS UNDER THE INFLUENCE OF INTERNAL NETWORK OVERVOLTAGE

**Мета.** Створення математичної моделі трансформатора, що адекватно відтворює електромагнітні процеси в обмотках трансформатора за дії внутрішніх перенапруг мережі, та дослідження електромагнітних процесів в обмотках трансформатора за допомогою створеної моделі.

**Методика.** Модель трансформатора отримана на основі положень теоретичної електротехніки, що не потребують експериментального дослідження реальних електромагнітних процесів в обладнанні для підтвердження адекватності математичних моделей, з урахуванням конструктивних елементів трансформатора (обмотка, магнітопровід, ізоляція), а також взаємоіндукції між частинами обмотки.

**Результати.** Розроблені методи створення математичних моделей трансформатора, що дозволяють урахувати взаємоіндукцію між частинами обмотки за допомогою моделювання реактивних складових опорів обмотки з протилежними знаками. З використанням створених математичних моделей силового трансформатора досліджено електромагнітні процеси в конкретних точках обмотки високої напруги трансформатора за різних режимів його роботи.

**Наукова новизна.** Розроблена методика дозволяє створювати математичні моделі електрообладнання з обмотками високої напруги, що враховують розподіл параметрів та дозволяють досліджувати електромагнітні процеси всередині обмоток без експериментального дослідження реальних електромагнітних процесів в обладнанні для підтвердження адекватності моделі.

**Практична значимість.** Уперше енергетика отримала інструмент для оцінки кількісних показників електромагнітних процесів у довільній точці обмотки високої напруги трансформатора з розподіленими параметрами, між повздовжніми елементами якого існує взаємоіндукція за дії на нього внутрішніх перенапруг мережі довільної частоти. Модель може бути використана на всіх стадіях проектування, виготовлення, випробування та експлуатації електрообладнання з обмотками високої напруги.

**Ключові слова:** електрообладнання, математичні моделі, обмотки високої напруги, електромагнітні процеси

**Постановка проблеми.** Між традиційними науковими підходами до обґрунтування необхідного рівня ізоляції трансформаторів, узагальнених в існуючій нормативній базі [1–2], та досвідом експлуатації [3] існує протиріччя, оскільки, незважаючи на вжиті відповідно до директивних документів [1–2] заходи, внутрішні перенапруги з боку мережі є небезпечними й можуть зумовити пошкодження обладнання. Причиною згаданого протиріччя може бути невідповідність використовуваних методів дослідження суті проблеми. Без ро-

зуміння фізичних процесів, що виникають в обмотках та ізоляції трансформатора, неможливо обґрунтувати та вибрати адекватні методи досліджень, а, відповідно, забезпечити надійність роботи електрообладнання в системах електропостачання підприємств гірничої, металургійної промисловості та інших.

Експериментально дослідити напруги в різних точках об'єму ізоляції електрообладнання за дії на нього внутрішніх перенапруг є складною задачею. Тому дослідження повинні проводитися з використанням математичних моделей, що адекватно відтворюють властивості реальних трансформаторів і процеси в них.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Електрообладнання з обмотками вищої напруги складається, як мінімум, з обмоток, магнітопроводу та ізоляції. На етапі проектування електрообладнання, як правило, не враховують усі можливі взаємозв'язки між вказаними конструкційними елементами та режимами роботи електромереж. Наприклад, ізоляцію проектують за заданими рівнями допустимих перенапруг, а, розглядаючи обмотки, магнітопроводи та їх режими роботи, керуються конструкційними особливостями ізоляції, умовно вважаючи, що опір ізоляції прямує до безмежності.

Є багато моделей, наприклад [4], а поррахувати щось конкретно немає можливості, бо під кожним конкретним символом таких математичних моделей повинно стояти якесь конкретне число, яке для кожного типорозміру, навіть однотипного, обладнання може бути своє. А без конкретних чисел перевірити адекватність математичних моделей оригіналу неможливо. Для перевірки адекватності моделі потрібно провести фізичний експеримент, який для електромагнітних процесів у трансформаторі, що нас цікавлять, неможливо виконати. Навіть у випадку, якщо такий експеримент теоретично можливий, потрібно врахувати, що деякі небезпечні перенапруги можуть виникати тільки за особливих параметрів електричної мережі. Не знаючи наперед конкретних параметрів, за яких виникають небезпечні перенапруги, та діючи методом проб та помилок, отримаємо ймовірність успішного експерименту як добуток імовірності виконання кожного конкретного параметру в даній довільно вибраній точці. А це означає замкнуте коло. Характер та кількісні характеристики електромагнітних процесів у трансформаторах мережі до сьогодні залишаються невідомими.

У математичних моделях [4] зроблена спроба аналізу перенапруг в обмотках трансформаторів з урахуванням розподіленості їх параметрів. Значна складність створення таких моделей полягає в необхідності визначення функції взаємодії між частинами обмотки.

**Задача дослідження.** Обґрунтувати нові підходи до синтезу математичних моделей з використанням положень теоретичних основ електротехніки (ТОЕ), що не потребують експериментального дослідження реальних електромагнітних процесів в обладнанні для підтвердження адекватності математичних моделей, та дослідити електромагнітні процеси в обмотках трансформатора за дії внутрішніх перенапруг мережі.

**Виклад основного матеріалу.** Для адекватної оцінки впливу внутрішніх перенапруг на ізоляцію електричних машин і трансформаторів давно виникла потреба в синтезі математичних моделей головної ізоляції, що б відображали розподіл напруг на окремих елементах ізоляційних конструкцій у тих чи інших режимах роботи обладнання. У звіті об'єднаної робочої групи CIGRE JWG A2-A3-B3.21 за 2005 рік [5] звертається увага на те, що для аналітичного визначення значення внутрішніх перенапруг на елементах конструкції трансформаторів у цілому необхідне дуже детальне моделювання обмоток разом з обов'язковим урахуванням шляхів проходження електромагнітних хвиль в ізоляції трансформаторів, а

також відтворення в моделі явища загасання цих хвиль на різних частотах.

Для синтезу моделі (на прикладі трифазного трансформатора 20кВА зі схемою з'єднання обмоток  $Y/Y^{\Delta}$  і коефіцієнтом трансформації 20кВ/0,4кВ) запропонований комбінований метод моделювання нелінійних об'єктів, що передбачає моделювання нелінійних елементів об'єкту традиційними методами, а лінійних – за частотними характеристиками, що дозволяє врахувати нелінійність магнітної системи трансформатора й відносно просто змоделювати ізоляцію та обмотки трансформатора.

Характерною рисою експлуатації електроустановки є відсутність інформації щодо конструктивних особливостей виконання його ізоляції. Тому кожен екземпляр електроустановки слід розглядати як „чорну скриню“, з якої виходять виводи обмоток. Зі сказаного випливає перша принципова суперечність, яку необхідно подолати. Нас цікавлять процеси всередині „чорної скрині“, до якої немає доступу. Як правило, нам відомі інтегральні характеристики електроустановки, що наводять у паспортних даних. Решту інформації необхідно отримати за допомогою спеціальних дослідів, використовуючи виводи обмоток. Така інформація буде носити також інтегральний характер без прив'язки до якоїсь конкретної точки в об'ємі обладнання. Формально одна й та сама інтегральна характеристика може відповідати безлічі варіантів сполучення окремих елементів, що входять до складу обладнання. Мета дослідження – отримати, як мінімум, якісні уявлення щодо процесів в окремих елементах, а як максимум – кількісну характеристику процесів. Найпростіше вирішити це питання виведенням на кришку бака додаткового виводу з конкретної точки об'єму, що нас цікавить. Оскільки нас цікавив, у першу чергу, розподіл перенапруг між поздовжньою та головною ізоляцією, було додатково виведено на кришку бака нейтральний вивід обмотки високої напруги (ВН) трансформатора.

Друга принципова суперечність полягає в тому, що характер електромагнітних процесів в обладнанні суттєво залежить від значень вимушеної та вільної складових перенапруг і частоти вільних коливань. Тому інформація, яку планується одержати за допомогою згаданих вище спеціальних дослідів, буде залежати від значення напруги, при якій ці досліді проводяться.

Процес синтезу моделі розбито на наступні етапи:

1) на першому етапі створюється математична модель магнітної системи трансформатора, та визначаються кількісні значення параметрів елементів;

2) на базі моделі магнітної системи трансформатора створюється модель трансформатора нульової послідовності для частот вільної складової внутрішніх перенапруг, та визначаються кількісні значення параметрів моделі;

3) на третьому етапі модель нульової послідовності розвивається в загальну через визначення параметрів міжфазних опорів.

Реалізація наведеного алгоритму забезпечує фізичну прозорість моделі та можливість за параметрами дії на

окремих елементах моделі прогнозувати реальні дії на відповідні елементи оригіналу. Як базовий метод отримання інтегральних характеристик об'єкту, на підставі яких можуть бути визначені значення параметрів окремих елементів математичної моделі, використовувався метод зняття частотних характеристик об'єкту за значенням напруг та струмів. Адекватність моделі повинна бути обґрунтована шляхом порівняння експериментальних частотних характеристик оригіналу та моделі.

Даний алгоритм дає можливість створення математичної моделі, що дозволить дослідити розподіл напруг на окремих елементах ізоляційних конструкцій у тих чи інших режимах роботи [6].

Виходячи з однієї із задач дослідження, а саме визначення можливих перенапруг на довільних точках обмотки трансформатора, необхідна розрахункова схема (модель), що адекватно відтворює процеси в обмотках трансформатора чи їх частинах за дії на нього напруг довільної частоти або сукупності напруг різних частот.

Магнітопровід у моделі трансформатора забезпечує магнітний зв'язок по шляхах замикання основного магнітного потоку. Для забезпечення адекватності відтворення магнітних зв'язків поза магнітопроводом необхідна розробка методів визначення опорів обмоток  $Z_1$  та  $Z_2$  трансформатора за умови, що відома їх векторна сума. Ця задача ускладнюється практичною необхідністю визначення не лише значення напруги, що прикладена в конкретному режимі роботи трансформатора до його обмотки, але й розподілу напруги вздовж обмотки. Такий чином, потрібно визначити не лише значення  $Z_1$  та  $Z_2$ , а також їх складові (наприклад, значення  $Z_{11}$  та  $Z_{12}$  двох різних частин обмотки), що в сумі дають значення  $Z_1$ . Важливо, що між різними частинами однієї обмотки існує взаємодукація, значення якої залежить від частоти прикладеної напруги, що також необхідно врахувати.

Оскільки частотний метод моделювання окремих двополосників лінійної частини об'єкту (трансформатора) гарантує адекватність моделювання виключно щодо вузлів схеми, між якими було знято частотну характеристику, наявність взаємодукації між згаданими вітками схеми не може бути відображена відомими методами.

Необхідне розроблення неявних методів урахування наявності взаємодукації між двома елементами об'єкту, що еквівалентуються окремими двополосниками (наприклад, між двома частинами однієї обмотки). Для цього необхідно вивчити фізику процесу та чітко розуміти наслідки, які спричиняє явище взаємодукації між частинами обмотки.

Методи визначення модулів опорів частин обмотки  $|Z_{11}|$  та  $|Z_{12}|$ , з урахуванням взаємодукації між ними для широкого спектру частот (0÷100кГц), обґрунтовані в [6]. Інформація щодо впливу частоти на значення модуля опору дозволяє однозначно визначити як реактивну складову опору (з урахуванням знаку складової), так і активну складову для довільної частоти. Отримана частотна характеристика частини обмотками моделюється послідовно з'єднаними

двopolосниками, що представляють собою паралельно з'єднанні елементи типу  $R_i, L_i, C_i$ , кількість яких дорівнює кількості частот, за яких дослідна характеристика має резонанс струмів.

Важливо зазначити, що комплексні опори були визначені за умови протікання крізь частини обмотки струмів, що знаходяться між собою у протифазі [6]. У реальному режимі роботи трансформатора маємо один наскрізний струм  $I$  в обмотці. Щоб оцінити наслідки, пов'язані з цією особливістю, розглянемо спрощену схему заміщення обмотки ВН з параметрами частин  $R_1, L_1, C_1$  та  $R_2, L_2, C_2$  (рисунок).

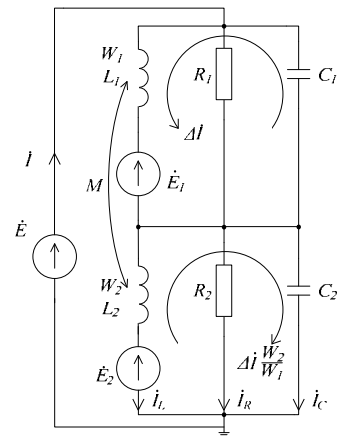


Рис. Схема заміщення обмотки високої напруги трансформатора:  $R_1, L_1, C_1$  та  $R_2, L_2, C_2$  – параметри частин обмотки;  $I_C, I_R, I_L$  – струми в  $R, L, C$  елементах;  $I$  – загальний струм;  $\Delta I$  та  $\Delta I/(W_2/W_1)$  – зрівнювальні складові струму;  $E_1, E_2$  – значення електрорушійних сил частин обмотки;  $W_1$  та  $W_2$  – кількість витків частин обмотки

У цій схемі складові струму  $I_C, I_R$  – сталі величини. Складова  $I_L$ , а, відповідно, і загальний струм  $I$ , а також значення електрорушійних сил  $E_1$  та  $E_2$ , залежать від режиму роботи обмотки низької напруги трансформатора.

Невідповідність розподілу напруги джерела  $E$ , що прикладена до обмотки, між повздовжніми ємностями  $C_1$  та  $C_2$  (з урахуванням  $R_1$  та  $R_2$  і без урахування індуктивних опорів обмоток з параметрами  $L_1, L_2, M$ ) та окремо між індуктивностями частин обмотки (без урахування  $C_1$  та  $C_2$ ), обумовлює в частинах обмотки появу зрівнювальних складових струму  $\Delta I$  та  $\Delta I/(W_2/W_1)$ , що знаходяться між собою у протифазі. Ці складові струму обумовлюють перерозподіл напруги вздовж обмотки ВН у широкому діапазоні частот.

У тих випадках, коли значення струму  $\Delta I$  перевищує значення струму  $I_C$  (або  $\Delta I/(W_2/W_1)$  – величину  $I_L$ ), фаза напруги, що прикладена до частини обмотки, змінюється на протилежну. Відбувається резонанс напруг за частот, більших частоти, що викликає резонанс напруги, напрям зрівноважувального струму  $\Delta I$  змінюється на протилежний. На частині обмотки, на котру до резонансу напруг була прикладена бі-

льша частина напруги, напруга зменшується. На іншій частині обмотки напруга починає зростати.

Наведена на рисунку розрахункова схема якісно добре ілюструє процеси в обмотках ВН. Для кількісного аналізу потрібно врахувати, що параметри  $L_1$ ,  $M$ ,  $L_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ , у свою чергу, залежать від частоти. Сталими ці параметри можна вважати у вузькому діапазоні частот поблизу частоти дослідної характеристики, що обумовлює резонанс струмів.

Таким чином, непропорційна зміна індуктивних і ємнісних складових опору вздовж обмотки ВН – головною причиною появи зрівнювальних струмів, а, відповідно, і потоків потужності всередині обмотки ВН. Роль взаємодії між окремими частинами обмотки полягає у примусовому забезпеченні співвідношення зрівнювальних струмів за величиною та фазою.

Єдиним ефективним способом урахувати взаємодію між частинами обмотки, у результаті впливу якої складова загального струму  $\Delta I$  у різних частинах обмотки знаходиться у протифазі, а, відповідно, і складові спадів напруг на частинах обмотки, зумовлені струмом  $\Delta I$ , також відрізняються за фазою, є моделювання реактивних і активних опорів однієї частини обмотки з протилежними знаками. Цей метод забезпечує моделювання зрівнювальних потоків потужності в частинах обмотки.

Враховуючи, що магнітні потоки розсіяння різних частин обмотки обумовлені наявністю зрівнювальних струмів, які знаходяться у протифазі, результуючі опори частин обмотки повинні визначатися з урахуванням векторної суми всіх складових потоку розсіяння. Врахування складових опорів, обумовленого наявністю потоку розсіяння від протікання струму  $I_L$ , буде виконано, якщо сума векторів опорів частин обмотки ВН, з урахуванням їх знаків, і вектора опору обмотки НН буде рівна вектору опору короткого замикання трансформатора для кожної з частот.

Реалізацією запропонованих вище методів стали синтезовані в [6] моделі трансформатора. Для підтвердження їх адекватності в [6] наведено порівняння отриманих результатів натурних (на фізичному об'єкті) та математичних (на моделі) експериментів.

З використанням синтезованих математичних моделей були проведені дослідження електромагнітних процесів за дії вільної складової внутрішніх перенапруг мережі. Були розглянуті електромагнітні процеси, що виникають у трифазному трансформаторі за різних режимів його роботи.

Уперше вдалось кількісно оцінити параметри електромагнітних процесів в обмотках трансформатора за його ввімкнення під напругу. Поява аперіодичної складової магнітного потоку під час увімкнення трансформатора під напругу провокує почергове виникнення феромагнітного резонансу між індуктивністю кожної з фазних обмоток ВН трансформатора та ємністю його ізоляції. Це призводить до появи небезпечних перенапруг на обмотках трансформатора [6].

Перерозподіл напруги, що прикладена до обмотки ВН під час короткого замикання, між її окремими частинами призводить до погіршення умов роботи ізоляції

цих частин. Математичними експериментами [6] доведено, що для схеми з'єднання трансформатора  $\Upsilon$  на 8%-ій частині обмотки ВН (від нейтралі) кратність перенапруг може досягти значення 1,52, що разом із підвищенням температури ізоляції, величина якої обмежена термічною стійкістю обмоток, може призвести до її руйнування. З'єднання трансформатора за схемою  $\Delta$  обмежує кратність перенапруг до значення 1,42.

Також були досліджені значення струмів виткових замикань і струмів пошкоджених фаз для різних схем з'єднання обмотки ВН [6].

Для трансформаторів зі схемою обмотки ВН  $\Upsilon$  струми виткових замикань зі збільшенням кількості замкнених витків зменшується, а зі схемою  $\Delta$  – збільшується. Справа в тому, що для варіанту  $\Upsilon$  значення напруги на неушкодженій частині обмотки зменшується зі збільшенням частини замкнених витків, а для варіанту  $\Delta$  – збільшується.

Уперше досліджений вплив роботи вакуумних вимикачів (ВВ) на електромагнітні процеси у трансформаторах розподільчої мережі [6]. Показано, що вимкнення трансформаторів зі схемою з'єднання  $\Upsilon/\Upsilon$  обумовлює значно більші кратності перенапруг, ніж вимкнення трансформаторів зі схемою з'єднання  $\Delta/\Upsilon$ . Виникнення повторних запалювань у вакуумному вимикачі під час вимкнення трансформаторів призводить до небезпечних перенапруг в обмотках НН трансформаторів.

Важливо також звернути увагу на той факт, що всі небезпечні перенапруги, пов'язані з особливостями роботи ВВ, припадають винятково на повздовжню ізоляцію незалежно від схеми з'єднання їх обмоток. Між тим рекомендації методичних вказівок щодо необхідності використання обмежувачів перенапруг (ОПН) у приєднаннях із силовими трансформаторами диференційовані в залежності від рівня виконання головної ізоляції. Виходить, що для одного й того ж рівня ізоляції обмоток ВН даються різні рекомендації.

#### Висновки.

1. Уперше обґрунтовані принципи та методи синтезу математичних моделей електроустаткування з обмотками високої напруги, що дозволяють відтворити електромагнітні процеси в обмотках і ізоляції за дії на устаткування перенапруг з боку мережі.

2. Уперше, на основі обґрунтованих принципів і методів, синтезовані математичні моделі трифазного трансформатора, що як якісно, так і кількісно, з достатньою для практики точністю, відтворюють електромагнітні процеси в обмотках і ізоляції за дії на трансформатор перенапруг.

3. Уперше вдалось кількісно дослідити параметри електромагнітних процесів в обмотках трансформаторів за дії на нього перенапруг мережі, що дозволяє розробити рекомендації з підвищення надійності роботи трансформаторів в електричних мережах.

4. Синтез математичних моделей трансформаторів, автотрансформаторів, трансформаторів напруги, генераторів, двигунів з використанням частотних характеристик як початкової інформації про властивос-

ті електроустаткування – один із пріоритетних напрямів електроенергетичної науки, що дозволить обґрунтувати рекомендації з проектування, виготовлення, високовольтних випробувань і експлуатації електроустаткування високої напруги.

### Список літератури / References

1. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции: ГОСТ 1516.2-97. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

Interstate standard, “AC electrical equipment and installations with rated voltage 3 kV and higher. Main test methods of electrical strength of insulation”, State Standard 1516.2-97, (1999), State standard of Ukraine, Kyiv.

2. Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750кВ. Требования к электрической прочности изоляции: ГОСТ 1516.3-96. – К.: Госстандарт Украины, 1999.

Interstate standard, “Alternative current electrical equipment with rated voltage from 1 to 750 kV. Insulation electrical strength requirements”, State Standard 1516.3-96, (1999), State standard of Ukraine, Kyiv.

3. Ахметшин Р.С. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4кВ на основе частотных характеристик / Р.С. Ахметшин, Л.М. Рыбаков // *Электричество*. – 2005. – № 5. – С. 20–26

Ahmetshin, R.S. and Rybakov, L.M. (2005), “Technical tools of 10/0,4 kV power transformers diagnostic which based on frequency characteristic”, “Electricity”, № 5, pp. 20–26.

4. Сегада М.С. Математичне моделювання вільних коливань напруги в обмотках трансформаторів з урахуванням взаємодукції між витками під час імпульсних перенапруг / М.С. Сегада, Є.В. Черемних, Т.А. Мазур // *Науковий вісник НГУ* – 2013. – № 1. С. 68–76.

Segeda, M.S., Cheremnyh, E.V., Mazur, T.A. (2013), “Mathematical modelling of voltage free oscillation in transformer windings taking into consideration mutual induction between turns under the influence of impulse overvoltage”, Dnepropetrovsk, *Scientific Bulletin of National Mining University*, no. 1, pp. 68–76.

5. Electrical environment of transformers. Impact of fast transients. Prepared by CIGRE JWG A2-A3-B3.21. (FORMER JWG 12-13-23.21), ELECTRA, (2005), Vol. 2, no. 218, pp. 28–37.

6. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения: монография / [Бучковський І.Р., Молнар М.М., Никонен А.Л. и др.] – Львов: Друк НВФ „Українські технології“, 2012. – 166 с.

Buchkovsky, I.R., Molnar, M.M., Nykonets, A.L., Nykonets, L.A. and Sabat, M.B. [Physical Phenomenon of Internal Resonance in Electrical Equipment with High Voltage Windings], Monography, “Ukrainian technologies”, Lviv, Ukraine.

**Цель.** Создание математической модели трансформатора, которая адекватно воспроизводит элект-

ромагнитные процессы в обмотках трансформатора при действии внутренних перенапряжений сети, и исследование электромагнитных процессов в обмотках трансформатора с помощью созданной модели.

**Методика.** Модель трансформатора получена на основе положений теоретической электротехники, не требующих экспериментального исследования реальных электромагнитных процессов в оборудовании для подтверждения адекватности математических моделей, с учетом конструктивных элементов трансформатора (обмотка, магнитопровод, изоляция), а также взаимодукции между частями обмотки.

**Результаты.** Разработаны методы создания математических моделей трансформатора, которые позволяют учитывать взаимодукцию между частями обмотки путем моделирования реактивных составляющих сопротивлений обмотки с противоположными знаками. С использованием созданных математических моделей силового трансформатора исследованы электромагнитные процессы в конкретных точках обмотки высокого напряжения трансформатора при разных режимах его работы.

**Научная новизна.** Разработанная методика позволяет создавать математические модели электрооборудования с обмотками высокого напряжения, которые учитывают распределение параметров и позволяют исследовать электромагнитные процессы внутри обмоток без экспериментального исследования реальных электромагнитных процессов в оборудовании для подтверждения адекватности модели.

**Практическая значимость.** Впервые энергетика получила инструмент для оценки количественных показателей электромагнитных процессов в произвольной точке обмотки высокого напряжения трансформатора с распределенными параметрами, между продольными элементами которого существует взаимодукция, при действии на него внутренних перенапряжений сети произвольной частоты. Модель может быть использована на всех стадиях проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации электрооборудования с обмотками высокого напряжения.

**Ключевые слова:** электрооборудование, математические модели, обмотки высокого напряжения, электромагнитные процессы

**Purpose.** Formation of the transformer mathematical model that adequately recreates electromagnetic processes in transformer windings under the influence of internal network overvoltage, and study of electromagnetic processes in transformer windings with using this model.

**Methodology.** The model of the transformer is obtained basing theoretical principles of electrical engineering, which don't require any experimental study of real electromagnetic processes inside equipment for adequacy confirmation of mathematical models, taking into consideration transformer construct elements (winding, magnetic core, insulation), and mutual inductance among winding parts.

**Findings.** Methods of transformer mathematical models synthesis, which take into consideration mutu-

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-