УДК 621.313 doi: 10.20998/2413-4295.2017.53.03

ПРО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА І НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

***І. В. ХОМЕНКО*[1*]**

[1] кафедра «Передача електричної енергії», НТУ "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, УКРАЇНА
[*]email: igor.v.khomenko@gmail.com

АННОТАЦІЯ *Наведена математична модель нормальних режимів електричної мережі у вигляді вузлових рівнянь. За допомогою технології векторних вимірювань такі моделі дозволяють контролювати режими в реальному часі і оцінювати реальний стан електричної мережі. Встановлено взаємозв'язок між електромагнітними процесами силового трансформатора і режимами розподільчої електричної мережі. За допомогою системи синхроних вимірювань отримані добові графіки навантаження силового трансформатора. Проведено узагальнений аналіз експериментальних досліджень, встановлено регулюючий і керуючий ефект роботи трансформатора. При використанні теорії векторного і скалярного потенціалів та умови Лоренца отримана нелінійна математична модель електромагнітних процесів силового трансформатора. Встановлена залежність цієї системи рівнянь від зміни магнітної проникності середовища. Встановлено, що необоротні магнітні втрати обумовлені рухом зв'язаних магнітних доменів, тобто зміною магнітної проникності середовища. Проведено узагальнений аналіз теоретичних і експериментальних досліджень.*
Ключові слова: *електричні мережі; нормальний режим; силовий трансформатор; векторні вимірювання; електромагнітні перетворення; нелінійна математична модель.*

ON THE INTERCONNECTION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF A POWER TRANSFORMER AND NORMAL MODES OF OPERATION OF ELECTRIC NETWORKS

***I. KHOMENKO*[1]**

[1] Department "electricity transmission", NTU "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT *A mathematical model of normal modes of an electrical network in the form of nodal equations is given. With the help of vector measurement technology, such models allow you to monitor the modes in real time and evaluate the real state of the electrical network. The relationship between the electromagnetic processes of the power transformer and the modes of the distribution network is established. With the help of a synchronous measurement system, the daily load graphs of a power transformer are obtained. The generalized analysis of experimental studies is carried out, the regulating and control effect of the transformer is established. Using the theory of vector and scalar potentials and the Lorentz condition, a nonlinear mathematical model of the electromagnetic processes of a power transformer is obtained. The dependence of this system of equations on the change in the magnetic permeability of the medium is established. It is established that irreversible magnetic losses are caused by the motion of bound magnetic domains, that is, by a change in the magnetic permeability of the medium. A generalized analysis of theoretical and experimental studies.*
Keywords*: electrical networks; normal mode; power transformer; vector measurements; electromagnetic transformations; nonlinear mathematical model.*

Вступ

Енергетика вже давно стала системоутворюючою галуззю народного господарства. В останні роки ці тенденції посилюються. В той же час сучасна електроенергетика проходить непростий етап свого розвитку. Широке впровадження енергоефективних та енергозберігаючих технологій, неоднозначне ставлення до теплової і атомної генерації, стабільний розвиток нетрадиційних джерел енергії все це обумовлює широкий наступ smart grid технологій починаючи з виробництва і завершуючи споживанням електричної енергії [1-3]. Цілком очевидно, що в найближче десятиліття в наше життя широко увійдуть такі поняття як розумний будинок, розумний електротранспорт, розумне виробництво, розумна підстанція, розумні мережі та розумні електричні станції. Це непростий шлях розвитку, який вимагає широкої інтелектуалізації всіх процесів в електроенергетиці та супутніх галузях. Метою такого розвитку є підвищення надійності та якості електропостачання при його високій ефективності. Основою ж такого розвитку є: 1) використання реального математичного та фізичного моделювання електромагнітних процесів в електроенергетичних системах та її елементах в режимі реального часу; 2) широке впровадження сучасних комп'ютерних технологій, засобів вимірювання, передачі і обробки інформаційних потоків в електроенергетиці [4-6].

© ХОМЕНКО І. В., 2017

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Тільки комплексне вирішення поставлених завдань може забезпечити якісну оцінку і ефективне управління технічним станом електроенергетичних систем, що в свою чергу є одним з пріоритетних напрямків розвитку електроенергетичної галузі на найближчу перспективу [7].

В даний час вченими і фахівцями в галузі електроенергетики накопичений великий досвід в області проектування, експлуатації та управління електричними мережами. На думку більшості фахівців найбільш ефективним засобом управління режимом електричної мережі сьогодні є комплексне управління режимом по U, Q і n [8,9]. Надзвичайно важливе значення в цьому сенсі має надійна і ефективна робота трансформаторного обладнання, зокрема робота його засобів регулювання напруги. Такі системи повинні забезпечувати необхідні параметри якості електроенергії та мінімальні втрати активної потужності в електричних мережах, правда при цьому дещо змінюються не тільки параметри режимів, а й параметри самої мережі [10]. Досвід експлуатації показує, що найбільш вдало зарекомендували себе пристрої РПН (регулювання під навантаженням), що працюють в автоматичному режимі. Однак, ряд серйозних аварій трансформаторів через вихід з ладу пристроїв РПН, змусили фахівців обмежити їх використання та активізувати роботи, щодо вдосконалення методів регулювання напруги [11-13].

Таким чином, цілком очевидним є той факт, що подальший розвиток інтелектуалізації електричних мереж в цілому і конкретного енергетичного обладнання зокрема, нерозривно пов'язане з детальним вивченням їх фізичних процесів і математичних моделей, які їх зв'язують і взаємовпливають один на одного. Нагадаємо, що під інтелектуалізацією ми будемо розуміти підвищення надійності і ефективності їх експлуатації при мінімальних витратах.

Аналіз публікацій

Сучасні математичні моделі електричних систем і мереж представлено в [14,15], основні принципи ефективного управління режимами в [16,17]. В цих працях закладено науково-практичні засади розрахунків, аналізу і управління електроенергетичних систем і мереж. Режими роботи основного енергетичного обладнання представлено в узагальненому вигляді. Аналіз режимів роботи основного енергетичного обладнання в [18,19], фізичні основи функціонування ЛЕП і силових трансформаторів в [20,21]. Цей аналіз проведено для основного енергетичного обладнання без урахування реальних умов експлуатації електричних систем і мереж.

Метою статті є дослідження електромагнітних процесів і математичних моделей функціонування розподільчих електричних мереж і силового трансформаторного обладнання з урахуванням їх взаємного впливу в режимі реального часу.

Основна частина

Сучасний аналіз процесів в електроенергетичних системах та мережах базується на теоретичних і експериментальних дослідженнях. Незважаючи на бурний розвиток і широке впровадження передових наукових технологій і теоретичні і експериментальні методи мають свої проблеми та недоліки. Так, наприклад, для теоретичних досліджень актуальною задачею є розробка динамічних математичних моделей електроенергетичних систем [8], а для експериментальних – підвищення достовірності отриманих результатів [16]. Враховуюче це можна припустити доцільність доповнення і поєднання теоретичних і експериментальних досліджень між собою з метою отримання якісно нових результатів.

Найбільш поширеною математичною моделлю режимів розподільчої мережі є вузлові рівняння [22]:

$$U_i^2 Y_{ii} - U_i^* \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{k} \dot{U}_j Y_{ij} + S_i^* = 0 \qquad (1)$$

де $\dot{U}_i$, $\dot{U}_j$ – комплексні напруги в вузлах і та j, Y_{ii} – власна провідність *i*-го вузла, Y_{ij} – взаємна провідність *i*-го і *j*-го вузлів, S_i^* – спряжений комплекс потужності споживаємої в *i*-му вузлі; U_i^* – спряжений комплекс напруги *i*-го вузла.

Ефективним засобом для вирішення систем нелінійних рівнянь є різноманітні модифікації методу Ньютона. В загальному вигляді можна представити:

$$\mathbf{W} + \frac{\mathbf{dW}}{\mathbf{dX}} \cdot \mathbf{\Delta X} = \mathbf{0} \cdot \qquad (2)$$

де **W** – вектор-стовбець розрахункових значень ; **ΔX** – вектор-стовбець нев'язок змінних; **0** – вектор-стовбець, елементи якого дорівнюють нулю; $\frac{\mathbf{dW}}{\mathbf{dX}}$ – матриця похідних (*матриця Якобі)*.

Використовуючи технологію векторних вимірювань можливо моделювати режими електричної мережі в режимі реального часу та оцінювати технічний стан електричної мережі та її окремих елементів. Вузлові рівняння є результатом синтезування моделей вузлів і гілок. У той же час основними елементами розподільчої електричної мережі є силові трансформатори, лінії електропередач і навантаження. У розрахунках вони представляються своїми схемами заміщення. Для розробки ефективних засобів діагностики і управління режимами електричної мережі необхідне чітке розуміння фізичних процесів, що відбуваються в її окремих елементах, так і в цілому в усій мережі. Розглянемо більш докладно процеси, що відбуваються в

трансформаторі з точки зору можливості діагностики технічного стану і ефективного управління режимами розподільчих електричних мереж. Для аналізу і розрахунку режимів реальні розрахункові схеми як правило представляють в більш компактному вигляді (рис. 1) [8].

Для чіткого розуміння функціонального призначення силового трансформатора фахівці, як правило, виділяють чотири основні елементи: обмотку, магнітопровід, систему охолодження і систему регулювання напруги. Це визначає дві основні функції, які виконує силовий трансформатор, як елемент електричної мережі:

- силовий трансформатор здійснює перетворення одного класу напруги в інший, здійснюючи передачу електроенергії на великі відстані від джерела до кінцевого споживача;
- силовий трансформатор пов'язує мережі різного класу напруги, здійснюючи автоматичне управління їх режимами (за рахунок автоматичного управління потокорозподілом в електричних мережах).

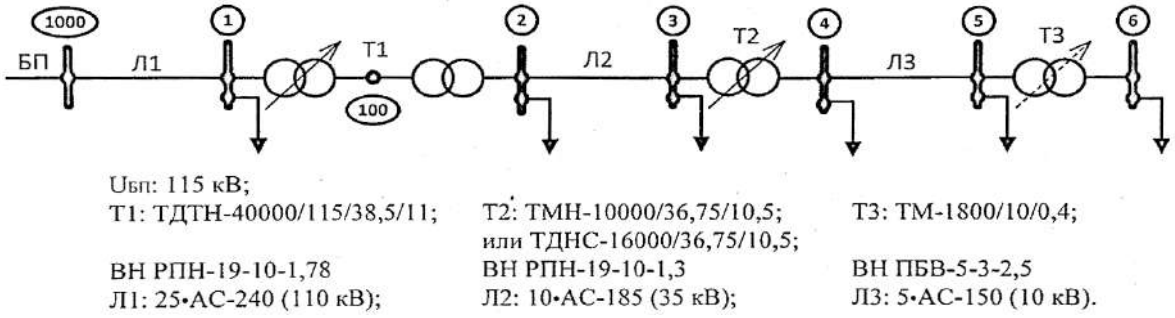

Рис.1 - Розрахункова схема електричної мережі

Крім того, фахівці часом не звертають уваги на ще одну унікальну функцію (або можливість) силового трансформатора: силовий трансформатор є унікальною експериментальною установкою для дослідження процесів взаємодії електромагнітного поля і речовини. Заради справедливості слід зазначити, що це відноситься до будь-якого елементу електроенергетичної системи окремо, так і в цілому до всієї електроенергетичної системи. В останні роки в зв'язку з широким впровадженням сучасних вимірювальних та інформаційних технологій у фахівців з'явилися хороші можливості по широкому використанню статистичного матеріалу для аналізу процесів, що відбуваються в елементах ЕЕС і ефективного управління режимами електричних мереж [15]. Це сприяло тому, що останнім часом з'явилося ряд цікавих публікацій про дослідження нормальних, перехідних і аварійних режимів в силових трансформаторах [23,24].

Розглянемо спрощено процес включення трансформатора під навантаження. Для простоти розглянемо випадок приведеного двох обмоткового трансформатора (рис.2).

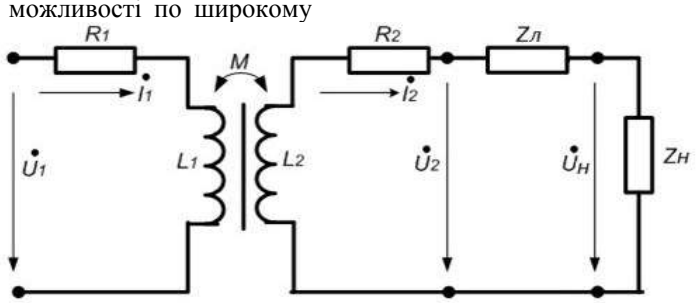

Рис.2 - Схема роботи трансформатора під навантаженням:
$Z_л$ – сумарний комплексний опір ЛЕП, $Z_н$ – сумарний комплексний опір навантаження, U_1– напруга на вході трансформатора, U_2 – напруга на виході трансформатора, $U_н$ – напруга у споживачів

Під впливом прикладеної напруги U_1, по первинній обмотці трансформатора починає протікати струм $\dot{I}_1$, рівний току холостого ходу: $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 = \dot{I}_{Xx}$. Цей струм створює основний магнітний потік в сердечнику трансформатора Φ_1. Величина струму $\dot{I}_1$ при цьому незначна (близько 1% від $\dot{I}_{ном}$), що обумовлено великою величиною магнітної проникності магнітопроводу μ_1 (близько 10000) і отже великою величиною індуктивності L_1.Під впливом основного магнітного потоку Φ_1, в первинній обмотці наводиться ЕРС самоіндукції $\dot{E}_{11}$, а у вторинній ЕРС взаємоіндукції $\dot{E}_{12}$. Під впливом $\dot{E}_{12}$ у вторинній обмотці (при включенні її під навантаження) починає протікати струм $\dot{I}_2$. Цей струм створює свій магнітний потік Φ_2, спрямований

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

зустрічно Φ_1, і отже він розмагнічує магнітопровід. При цьому $\mu_2 \ll \mu_1$, а отже і власна індуктивність L_{22} має незначну величину $L_{22} \ll L_{11}$. Взаємодія потоків Φ_1 и Φ_2 призводить до того, що магнітна проникність μ_1 зменшується, L_1 також зменшується, а струм $\dot{I}_1$ збільшується і приймає нове значення, що відповідає значенню струму навантаження $\dot{I}_2$. Це і визначає фізичну основу регулюючого і керуючого ефекту роботи силового трансформатора.

Таким чином, керуючий (або регулюючий) принцип дії трансформатора заснований на зміні магнітної проникності магнітопроводу трансформатора, що є результатом взаємодії магнітних потоків обмоток трансформатора. Магнітна проникність силового трансформатора μ_1 (а отже і індуктивність L_1) змінюється відповідно до закону зміни навантаження, який можна отримати експериментальним або розрахунковим шляхом [25]. Синусоїдальний закон зміни струмів в обмотках трансформатора призводить до появи петлі гістерезису сталевих магнітопроводів. Закон зміни навантаження трансформатора модулює величину цих струмів, що призводить до зміни площі петлі гістерезису. При збільшені навантаження вона зменшується, а при зменшені – збільшується. А це в свою чергу визначає закономірності зміни втрат на намагнічування в магнітопроводах трансформаторів.

Експериментальні дослідження, проведені за допомогою інформаційно-керуючого комплексу «Спектр», повністю підтверджують теоретичні положення. На рис.3 приведена принципова схема експериментальної установки, а на рис.4 – результати добових вимірювань струмів і напруг в первинних і вторинних обмотках силового трансформатора ТМ-10000/35. Проведені вимірювання можуть бути проведені з використанням технології векторних вимірювань.

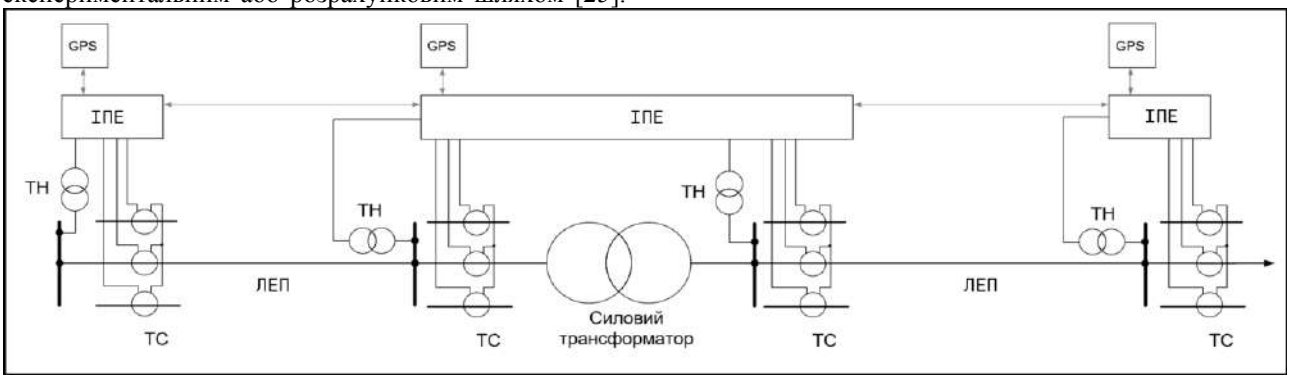

Рис.3 - Схема експериментальної установки:
ТН – трансформатор напруги, ТС–трансформатор струму, ЛЕП – лінія електропередачі, GPS – канали зв'язку, ІПЕ – індикатор параметрів енергоспоживання

Практичний аналіз експериментальних даних показує:

- потік енергії надходить з обмотки високої напруги в обмотку низької за відніманням втрат ХХ і навантажувальних втрат трансформатора. Інформація про характер споживання передається з обмотки низької напруги в обмотку високої. При цьому в первинних обмотках спостерігається більш рівномірний характер зміни струмових навантажень, ніж у вторинних (ефект вирівнювання навантаження);
- добові коливання струмових навантажень і на стороні високої і на стороні низької напруги складають 50-100%, при цьому коливання рівнів напруги складають до 10%. Коливання рівнів напруги обумовлені падіннями напруги на трансформаторі і ЛЕП розподільної мережі в зв'язку зі змінами навантаження;
- струмові навантаження на стороні високої напруги більш симетричні, ніж на стороні низької напруги, в той же час рівні напруги на стороні низької напруги більш симетричні, ніж на стороні високої напруги (ефект симетрування навантаження);
- зміна навантаження, як на ділянках зростання, так і на ділянках її зниження, супроводжуються симетруючим ефектом навантаження. На ділянках рівномірного споживання воно більш несиметричне;
- зростання навантаження призводить до зниження рівнів напруги, як з боку високої, так і з боку низької напруги;
- характер зміни струмових навантажень і рівнів напруги ідентичний, як на стороні високої, так і на стороні низької напруги і пов'язані коефіцієнтами трансформації;
- рівні споживання активної потужності, як правило, в декілька разів перевищують споживання реактивної потужності;
- характер споживання активної потужності ідентичний характеру зміни струмових навантажень, характер споживання реактивної потужності неоднозначний - на деяких ділянках він ідентичний характеру зміни активної потужності, на інших збігається з характером зміни рівнів напруги.

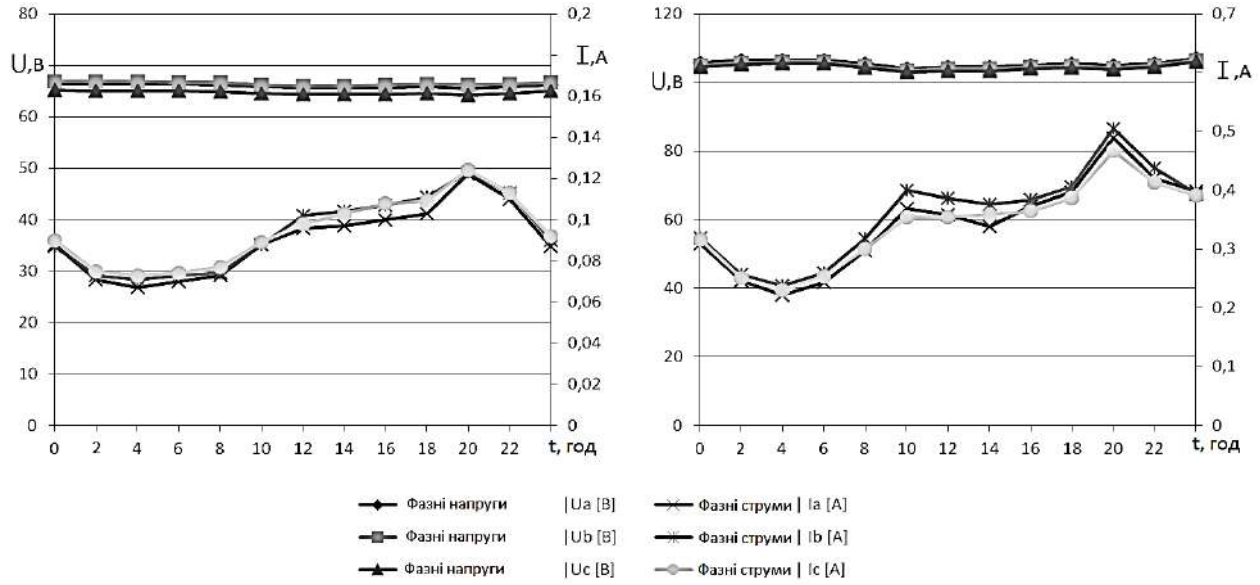

Рис.4 - Добові графіки навантажень трансформатора на стороні 35 і 6 кВ

Таким чином, узагальнений аналіз експериментальних результатів показує, що силовий трансформатор є ефективним керуючим пристроєм електричної мережі. Він автоматично керує споживанням і потокорозподілом електроенергетичних потоків електричних мереж. Крім того, він перешкоджає поширенню вищих гармонік в електричних мережах [26], а також надає симетруючий і зглажуючий вплив на фазні струми і напруги, що безумовно є важливим фактором у забезпеченні параметрів якості електроенергії. Причиною симетруючого ефекту є створення загального магнітного потоку всередині трансформатора. Режим роботи первинної обмотки трансформатора узагальнює електромагнітні процеси, що характеризують режими роботи навантажень, ЛЕП і силових трансформаторів електричної мережі. Режими роботи вторинної обмотки трансформатора характеризують можливості енергосистеми забезпечувати електроенергією кінцевих споживачів. Синтезовану математичну і фізичну модель нормальних режимів роботи трансформатора можна представити на базі матеріалів розроблених у [27, 23].

Нелінійна математична модель, що відображає фізичні процеси нормальних режимів роботи трансформатора може бути отримана при використанні теорії векторного і скалярного потенціалів і умови Лоренца [28]. При розповсюдженні електромагнітного поля в матеріальному середовищі, що характеризується параметрами абсолютних діелектричної та магнітної проникності $\varepsilon_a = \varepsilon_r \varepsilon_0$ і $\mu_a = \mu_r \mu_0$, умові Лоренца відповідає вираз:

$$\nabla \mathbf{A} + \frac{\partial(\mu_a \varepsilon_a \varphi)}{\partial t} = 0 \qquad (3)$$

де – А, φ – векторний і скалярні потенціали, t – час. тобто:

$$\nabla \mathbf{A} + \frac{\partial(\mu_r \varepsilon_r \mu_0 \varepsilon_0 \varphi)}{\partial t} = 0$$

і:

$$\nabla \mathbf{A} + \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\mu_r \varepsilon_r \varphi}{c^2}\right) = 0$$

де – с– швидкість світла.

В тому разі якщо проникності ε_a і μ_a не постійні величини, наприклад μ_a, є функція часу, то відповідно до виразу (3) умова Лоренца набуває інший вигляд:

$$\nabla \mathbf{A} + \varepsilon_a \mu_a \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varepsilon_a \varphi \frac{\partial \mu_a}{\partial t} = 0$$

звідси:

$$\nabla \mathbf{A} = -\varepsilon_a \mu_a \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \varepsilon_a \varphi \frac{\partial \mu_a}{\partial t} \qquad (4)$$

Перше рівняння Максвела при цьому описується співвідношенням:

$$[\nabla \mathbf{B}] = \varepsilon_a \mu_a \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_a \frac{\partial \mu_a}{\partial t} \mathbf{E} + \frac{\partial \mu_a}{\partial t} \boldsymbol{\delta}. \qquad (5)$$

де В – вектор індукції магнітного поля, Е – вектор напруженості електричного поля, δ –вектор щільності струму.

Оскільки $\mathbf{B} = [\nabla \mathbf{A}]$, $\mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$, тому:

$$[\nabla [\nabla \mathbf{A}]] = \varepsilon_a \mu_a \frac{\partial}{\partial t}\left(-\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right) +$$
$$+ \varepsilon_a \frac{\partial \mu_a}{\partial t}\left(-\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right) + \frac{\partial \mu_a}{\partial t} \delta$$

Але $[\nabla [\nabla \mathbf{A}]] = \nabla(\nabla \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$, таким чином:

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

$$\nabla(\nabla\mathbf{A}) - \nabla^2\mathbf{A} = -\mathbf{\nabla}\varepsilon_a\mu_a\frac{\partial\varphi}{\partial t} - \varepsilon_a\mu_a\frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2} - -\mathbf{\nabla}\varepsilon_a\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\varphi - \varepsilon_a\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial\mu_a}{\partial t}\delta,$$

або:

$$\nabla(\nabla\mathbf{A}) - \nabla^2\mathbf{A} = -\mathbf{\nabla}\left(\varepsilon_a\mu_a\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \varepsilon_a\varphi\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\right) - -\varepsilon_a\mu_a\frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2} - \varepsilon_a\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial\mu_a}{\partial t}\delta.$$

Враховуючи співвідношення (4):

$$\nabla(\nabla\mathbf{A}) - \nabla^2\mathbf{A} = \nabla(\nabla\mathbf{A}) - \varepsilon_a\mu_a\frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2} - -\varepsilon_a\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\partial\mu_a}{\partial t}\delta,$$

отже:

$$\nabla^2\mathbf{A} - \varepsilon_a\mu_a\frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2} - \varepsilon_a\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} = -\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\boldsymbol{\delta} \quad (6)$$

Четверте рівняння Максвела $\nabla\mathbf{E} = \rho/\varepsilon_a$, тобто диференціальна форма теореми Гауса, в тому разі якщо μ_a є функція часу, записується за допомогою потенціалів таким чином:

$$\nabla\left(-\nabla\varphi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}\right) = \frac{\rho}{\varepsilon_a},$$

точніше:

$$-\nabla^2\varphi - \frac{\partial}{\partial t}\nabla\mathbf{A} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

В останньому рівнянні слід використовувати значення величини, визначене у виразі (4), тоді:

$$-\nabla^2\varphi - \frac{\partial}{\partial t}\left(-\varepsilon_a\mu_a\frac{\partial\varphi}{\partial t} - \varepsilon_a\varphi\frac{\partial\mu_a}{\partial t}\right) = \frac{\rho}{\varepsilon_a},$$

або:

$$\nabla^2\varphi - \varepsilon_a\mu_a\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} - \varepsilon_a\varphi\frac{\partial^2\mu_a}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_a} \quad (7)$$

Таким чином, рівняння (6) і (7) в сукупності з рівнянням (4) утворюють систему рівнянь, повністю еквівалентну рівнянням Максвела. Ці рівняння враховують зміни в часі магнітної проникності, тобто складової активних втрат в магнітному середовищі. Ці необоротні магнітні втрати обумовлені рухом зв'язаних магнітних доменів. Отримані результати повинні забезпечити підвищення точності розрахунку електромагнітного поля і ефективності функціонування електротехнічних систем з феромагнітними елементами. У нашому випадку приведені математичні моделі описують електромагнітні перетворення силових трансформаторів в різноманітних режимах роботи розподільчих електричних мереж.

Висновки

Таким чином, наведена математична модель нормальних режимів електричної мережі у вигляді вузлових рівнянь. За допомогою технології векторних вимірювань такі моделі дозволяють контролювати режими в реальному часі і оцінювати реальний стан електричної мережі. Теоретично і експериментально досліджений зв'язок між нормальними режимами електричної мережі і електромагнітними процесами силового трансформатора. Встановлений керуючий і регулюючий ефект роботи силового трансформатора. Розроблена математична модель нелінійних процесів трансформатора у вигляді системи рівнянь електромагнітних потенціалів, що еквівалентна рівнянням Максвела. Встановлена залежність цієї системи від зміни магнітної проникності середовища. Показано, що необоротні магнітні втрати обумовлені рухом зв'язаних магнітних доменів, тобто зміною магнітної проникності середовища. Отримані результати доповнюють картину електромагнітних перетворень в трансформаторі та електричних мережах і можуть бути використані при розробці нових smart grid технологій для підвищення надійності, ефективності і керованості нормальних режимів в системі оперативно-технологічного керування.

Список літератури

1 **Кириленко, О. В.** Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах / **О. В. Кириленко, І. В. Блінов, С. Є. Танкевич** // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 47–49.

2 **Chakrabortty, A.** Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids / **A. Chakrabortty, M. D. Ilic.** – Springer, N.Y., 2012. – 363. – 13. – doi: 10.1007/978-1-4614-1605-0.

3 **Varela, J.** Покажи мне / **J. Varela, L. Puglisi et al.** // *IEEE Power & Energy*. – 2015. – № 1. – P. 84-91.

4 **Caldeira, E.** Characterizing and evaluating fraud in electronic transactions / **E. Caldeira, G. Brandão, H. Campos** // *Proceedings of the 2012 Eighth Latin American Web Congress*. – 2012. – P. 115-122. – doi: 10.1109/LA-WEB.2012.16.

5 **Ghansah, I.** Smart grid cyber security potential threats, vulnerabilities and risks / **I. Ghansah** // *Public Interest Energy Research, Prepared for: California Energy Commission*. – 2012. – P. 8.

6 **Rylatt, R. M.** Exploring Smart Grid Possibilities: A Complex Systems Modelling Approach / **R. M. Rylatt** // *Smart Grid*. – 2015. – Vol. 1, No. 1. – P. 1-15. – doi: 1515/sgrid-2015-0001.

7 **Кириленко, О. В.** Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / **О. В. Кириленко, Д. В. Праховник** // *Збірник наукових праць Інституту електродинаміки НАН України : спеціальний випуск*. - 2010. - С 10-16.

8 **Банин, Д. Б.** Практические вопросы комплексной системной компенсации реактивной мощности / **Банин Д. Б., Банин М. Д. и др.** // *Электрические сети и системы*. – 2013. – №3. – с.20-36.

9 **Philip, D.** Развитие сети поднимает их технический уровень / **D. Philip** // *Modern Power Systems*. – 2012. – №11. – p.30-31.
10 **Федоров, Г. П.** Определение сопротивлений КЗ трансформаторов, автотрансформаторов 110-220 кВ при различных положениях РПН / **Г. П. Федоров** // *Электрические станции*. – 1999. – № 2. – С. 52-55.
11 **Bengtsson, T.** Непрерывный контроль работы устройств РПН. Monitoring tap-changer operations / **T. Bengtsson, H. Kois, M. Foata, F. Leonard** // *Доклад СИГРЭ* 12-209, 1998.
12 **Kramer, A.** On-Load Top-Changers for Transformers / **A. Kramer** // *Operations Principels, Applications and Selection. MR-Publication*. – 2000. – P.172-230.
13 **Хоменко, І. В.** Підвищення надійності пристроїв рпн силових трансформаторів // **І. В. Хоменко, О. М. Федосеєнко, І. В**. **Стасюк** // *Збірка наукових праць Українського державного університет залізничного транспорту*. – 2017. – Вип.170. – С.60-71.
14 **Авраменко, А. В.** Методики і програмні засоби для забезпечення автоматичного та диспетчерського керування електроенергетичними системами / **В. А. Авраменко, В. О. Крилов, В. Л. Прихно** // *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*. - 2010. - Вип. 26. - С. 31-37.
15 **Тарасов, В. И.** Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем / **В. И. Тарасов.** - Новосибирск: Наука, 2002, 344 с.
16 **Кириленко, О. В.** Ієрархічний оперативно-керуючий комплекс автоматизованої системи диспетчерського керування / **О. В. Кириленко, Б. С. Стогній, В. Л. Прихно** // *Збірник наукових праць Інституту електродинаміки НАН України*. - 2008. - Вип. 20. - № 2.
17 **Кононов, Ю. Г.** Разработка методов моделирования режимов распределительных электрических сетей на базе современных информационных технологий: автореф. дис. на соискание ученой степени д–ра. техн. наук : спец. 05.14.02– Электрические станции и электроэнергетические системы / **Ю. Г. Кононов**.– Ставрополь, 2001.– 36 с.
18 **Лежнюк, П. Д.** Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами: моногр. / **П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Буриkін** – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 123 с.
19 **Лежнюк, П. Д.** Натурно-імітаційне моделювання з використанням критеріального методу в оптимальному керуванні електроенергетичними системами / **П. Д. Лежнюк, В. М. Гайдамака** // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. — 2003. — № 1. — 37—41.
20 **Веприк, Ю. Н.** Математическое моделирование и диагностика режимов электрических систем / **Ю. Н. Веприк, В. Е. Бондаренко, Е. М. Олейник.** – Харьков: 1997.-194с
21 **Китаев, А. В.** Математическое описание электромагнитных процессов трансформаторов на основе теории четырехполюсников / **А. В. Китаев** // *Электричество*. – 2000. - №4. - С. 64.
22 **Веников, В. А.** Электрические системы. Электрические сети / **В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др.** Под ред. В.А. Веникова и В.А. Строева. М. : Высш. шк., 1998. 511 с.
23 **Хоменко, И. В.** Анализ электромагнитных процессов различных режимов работы силовых трансформаторов / **И. В. Хоменко** // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2014. – №5.
24 **Александров, Г. Н.** Особенности магнитного поля трансформатора под нагрузкой / **Г. Н. Александров** // *Электричество*. – 2003. – № 5. – С. 19–26.
25 **Вороновский, Г. К.** Синтез эталонных суточных профилей потребления электрической энергии крупным жилым массивом города / **Г. К. Вороновский, А. М. Ольшевский, С. А. Сергеев** // *Новини енергетики*. –К., 2000. –№10. – С.28–38.
26 Гармоники в электрических системах: Пер.с англ./ Дж.Аррилага, Д. Бредли, П. Боджер. М.:Энергоатомиздат,1990.-320 с.
27 **Веприк, Ю. Н.** Представление силовых трансформаторов в математических моделях установившихся несимметричных режимов электрических систем / **Ю. Н. Веприк** // *Вісник НТУ«ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. – Х.: НТУ«ХПІ», 2012. – №28. – С. 3-11.
28 **Тамм, И. Е.** Основы теории электричества / **И. Е. Тамм**. – М.: Издательство Физико-Математической литературы. – 2003. - 616 с.

Bibliography (transliterated)

1 **Kirilenko, O. V., Blinov, I. V., Tankevich, S. Є.** Smart Grid is the organisation of the information exchange in power systems. *Tehnichna elektrodinamika*, 2012, **3**, P. 47-49.
2 **Chakrabortty, A., Ilic, M. D.** Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids. Springer, N.Y., 2012, **363** p. 13. – doi: 10.1007/978-1-4614-1605-0.
3 **Varela, J., Puglisi, L.** Show me. *IEEE Power & Energy*, 2015, **1**, p. 84-91.
4 **Caldeira, E., Brandão, G., Campos, H.** Characterizing and evaluating fraud in electronic transactions. *Proceedings of the 2012 Eighth Latin American Web Congress*, 2012, P. 115-122. – doi: 10.1109/LA-WEB.2012.16.
5 **Ghansah, I.** Smart grid cyber security potential threats, vulnerabilities and risks. *Public Interest Energy Research, Prepared for: California Energy Commission*, 2012, P. 8.
6 **Rylatt, R. M.** Exploring Smart Grid Possibilities: A Complex Systems Modeling Approach. *Smart Grid*, 2015, Vol. **1**, No. 1, P. 1-15. – doi: 1515/sgrid-2015-0001.
7 **Kirilenko, O. V., Prahovnik, D. V.** Energetics of the steel rozvitku: wiklikta ta shahi pochvodvi. *Zbirnik nauko ¬ prih Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine: special issue*, 2010, 10-16.
8 **Banin, D. B., Banin, M. D.** Practical issues of complex system compensation of reactive power. *Electrical networks and systems*. 2013, **3**, p.20-36.
9 **Philip, D.** The development of the network raises their technical level. *Modern Power Systems*, 2012, No. **11**, p.30-31.
10 **Fedorov, G. P.** Determination of the resistance of short-circuit transformers, autotransformers 110-220 kV at different RPN positions. *Power plants,* 1999, **№ 2,** P. 52-55.
11 **Bengtsson, T., Kois, H., Foata, M., Leonard, F.** Continuous monitoring of the operation of on-load tap-changers. Monitoring tap-changer operations. *Report of CIGRE* 12-209, 1998.
12 **Kramer, A.** On-Load Top-Changers for Transformers / *Operations Principals, Applications and Selection.. MR-Publication, Regensburg*, 2000, 172-230.
13 **Khomenko, I. V., Fedoseenko, O. M., Stasyuk, I. V.** Increase of reliability of devices of rop of power

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

transformers. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport,* 2017, **170**, 60-71.
14 **Avramenko, V. A., Krylov, V. O., Prihno, V. L.** Methods and software for providing automatic and dispatcher control of electric power systems. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010, **26**, P. 31-37.
15 **Tarasov, V. I.** Theoretical bases of the analysis of the established regimes of electric power systems.. Novosibirsk: Nauka, 2002.-344 p.
16 **Kirilenko, O. V., Stogniy, B. S., Prihno, V.,L.** Hierarchical Operative-Control Complex of Automated System of Dispatcher Control. *Collection of scientific works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2008, **20**, No. 2.
17 **Kononov, Yu. G.** Development of methods for modeling the modes of distributive electrical networks on the basis of modern information technologies: author's abstract. dis for obtaining a doctoral degree. tech Sciences: special 05.14.02- Electric power stations and power systems. Stavropol, 2001.- 36 p.
18 **Lezhnyuk, P. D., Kulik, V. V., Burikin, O. B.** Mutual influence of electric networks and systems in the process optimal control of their modes: monogr. Vinnytsya: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008, 123 p.
19 **Lezhniuk, P. D.** Natural-simulation modeling using the criterion method in optimal control of electric power systems. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2003, No. **1**, 37-41.
20 **Veprik, Yu. N., Bondarenko, V. E., Oleinik, E. M.** Mathematical modeling and diagnostics of modes of electric systems.. Kharkiv: 1997.-194s
21 **Kitaev, A. V.** Mathematical description of electromagnetic processes of transformers on the basis of the theory of four poles. *Electricity,* 2000, **4**, P. 64.
22 **Venikov, V. A., Glazunov, A. A., Zhukov, L. A. and others** Electrical systems. Electric Networks. ed. VA Venikova and VA Stroyeva M.: Ext. Shk., 1998. 511 p.
23 **Khomenko, I. V.** Analysis of electromagnetic processes of various modes of operation of power transformers. *Energy saving. Power engineering. Energy audit,* 2014.- **№5**.
24 **Alexandrov, G. N.** Features of the magnetic field of a transformer under load. *Electricity,* 2003, No. **5,** P. 19-26.
25 **Voronovsky, G. K., Olshevsky, A. M., Sergeev, S. A.** Synthesis of reference daily profiles of consumption of electric energy by a large residential area of the city. *Energy News*, 2000, No. **10**, p. 28-38.
26 **Arrilag, J., Bradley, D., Bohder, P. M.** Harmonics in electrical systems: Per.sEng.// Energoatomizdat,1990.-320p.
27 **Vepric, Yu. N.** Representation of power transformers in mathematical models of established asymmetric regimes of electric systems.. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus. Theory and practice*, – NTU "KhPI", 2012, **№28**, P. 3-11.
28 **Tamm, I. E.** The basics of the theory of electricity. Moscow: The Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 2003, 616 p.

Сведения об авторах (About authors)

Хоменко Ігор Васильович – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Передача електричної енергії», НТУ "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Igor Khomenko – candidate of technical sciences, associate professor, Department "electricity transmission", NTU "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хоменко, І. В. Про взаємозв'язок електромагнітних процесів силового трансформатора і нормальних режимів роботи електричних мереж / **І. В. Хоменко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 19-26. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.53.03.

Please cite this article as:

Khomenko, I. On the interconnection of electromagnetic processes of a power transformer and normal modes of operation of electric networks. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 19–26, doi: 10.20998/2413-4295.2017.53.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом

Хоменко, И. В. О взаимосвязи электромагнитных процессов силового трансформатора и нормальных режимов работы электрических сетей / **И. В. Хоменко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 19-26. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.53.03.

АНОТАЦИЯ *Приведена математическая модель нормальных режимов электрической сети в виде узловых уравнений. С помощью технологии векторных измерений такие модели позволяют контролировать режимы в реальном времени и оценивать реальное состояние электрической сети. Установлена взаимосвязь между электромагнитными процессами силового трансформатора и режимами распределительной электрической сети. С помощью системы синхронных измерений получены суточные графики нагрузки силового трансформатора. Проведен обобщенный анализ экспериментальных исследований, установлен регулирующий и управляющий эффект работы трансформатора. При использовании теории векторного и скалярного потенциалов и условия Лоренца получена нелинейная математическая модель электромагнитных процессов силового трансформатора. Установлена зависимость этой системы уравнений от изменения магнитной проницаемости среды. Установлено, что необратимые магнитные потери обусловлены движением связанных магнитных доменов, то есть изменением магнитной проницаемости среды. Проведен обобщенный анализ теоретических и экспериментальных исследований.*

Ключевые слова: *электрические сети; нормальный режим; силовой трансформатор; векторные измерения; электромагнитные преобразования; нелинейная математическая модель.*

Поступила (received) 07.12.2017