

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ШПАК ОЛЕКСАНДР ЛЕОНІДОВИЧ



УДК 621.316:621.314.2.001

**МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ
В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Хмельницькому національному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Білий Леонід Адамович,

Львівський інститут економіки і туризму, м. Львів,
професор кафедри природничо-математичних дисциплін та
інформаційних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Варецький Юрій Омелянович,

Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, професор кафедри електричних систем та мереж.

доктор технічних наук, професор

Гребченко Микола Васильович,

Національний університет біоресурсів і
природокористування України, м. Київ, завідувач кафедри
електропостачання ім. проф. В.М. Синькова.

Захист відбудеться «27» жовтня 2017 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «26» вересня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Силові трансформатори безпосередньо задіяні в процесах виробництва, транспортування, розподілу та споживання електричної енергії. В Об'єднаній електроенергетичній системі (ОЕС) України потужність трансформаторів в декілька разів більша за установлену потужність генераторів на електростанціях. Очевидно, що трансформатори суттєво впливають на якість функціонування електричних мереж (ЕМ) енергосистем. Зокрема, вони багато в чому не тільки впливають, а й визначають надійність і економічність їх режимів. З іншої сторони, оскільки трансформатори є елементом системи, то на їх функціонування впливають процеси, що протікають в ЕЕС. Причому цей вплив проявляється як в нормальних, так і в аварійних режимах ЕЕС.

Дослідження взаємовпливу трансформаторів і електричних мереж ускладнюється нелінійністю їх характеристик і параметрів. Найбільш ефективним і доступним методом вивчення процесів в ЕЕС та в трансформаторах, як її елементів, є математичне моделювання. Математичний апарат традиційних моделей не оптимально відтворює фізичні процеси й ускладнює їх комп'ютерну реалізацію. Тому проблема адекватності математичної та фізичної моделей за таких умов є актуальною. Для її розв'язання необхідно переглянути низку традиційних підходів до побудови моделей електромагнітних пристроїв, чому в даній роботі і приділяється значна увага.

Розроблення нових об'єктів і дослідження існуючих пов'язані з розв'язуванням задач, які відносяться до аналізу або синтезу. Задачі аналізу можна об'єднати в наступні дві групи: розрахунок ustalених або періодичних режимів і дослідження перехідних процесів. До задач синтезу, які націлені на створення нових пристроїв та їх нових варіантів, відноситься параметрична чутливість – вплив зміни параметрів об'єкту на його вихідні характеристики. З наведених вище задач аналізу в практиці найчастіше зустрічаються розрахунки перехідних і стаціонарних процесів.

Аналіз ustalених періодичних процесів у нелінійних об'єктах є однією з найважливіших задач через широке застосування в техніці пристроїв періодичного принципу дії, тому природно, що в роботі основна увага приділяється аналізу саме таких процесів. Значний внесок у розв'язання цієї проблеми зроблено вітчизняними вченими: Бондаренко В.М., Глухівським Л.Й., Власовим А.І., Пуховим Г.Є., Петренко А.І., Синицьким Л.А., Чабаном В.Й., Фільцом Р.В. та ін., а також зарубіжними: McLeod, Skelboe S., Aprille T., Trick T. та ін.

Існуючі математичні моделі електромагнітних пристроїв нелінійність зв'язків враховують коефіцієнтами само- і взаємоіндукції. Розв'язування таких моделей пов'язане з використанням процедури обертання матриці – найбільш трудомісткої операції чисельних методів, наслідком чого є накопичення помилок, втрата точності і великі затрати часу. Очевидно, що успіх досліджень електромагнітних періодичних процесів головним чином залежить від наявності математичних моделей, максимально пристосованих до комп'ютерної

реалізації і математичного апарату, спроможного одночасно розв'язувати у неперервному часі такі задачі аналізу, як розрахунок перехідних і усталених процесів. Вирішенню таких проблем присвячена дана робота, що і визначає її актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана в Хмельницькому національному університеті. Дослідження проводились у відповідності з держбюджетними темами: № 1Б-2014 «Розробка високоефективних систем електроопалення та методів їх проектування» (номер держреєстрації – 0114U000270); № 6Б-2016 «Розробка енергоефективної системи опалення та кондиціонування промислових приміщень на базі універсального теплоаккумулятора» (номер держреєстрації – 0116U001552); № 5Б-2016 «Науково-прикладні методи та комбіновані системи компенсації пікового навантаження електромереж на базі суперконденсаторів» (номер держреєстрації – 0116U001548).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення засобів моделювання періодичних електромагнітних процесів в силових трансформаторах електроенергетичних систем, які б дозволяли досліджувати і покращувати їх техніко-економічні показники.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі **основні завдання**:

- проаналізувати сучасний стан математичного моделювання періодичних процесів та методів побудови моделей електромагнітних пристроїв типу трансформаторів;
- проаналізувати існуючі підходи і методи розрахунку періодичних процесів в трансформаторах;
- удосконалити методи побудови математичних моделей трансформаторів на основі теорії електромагнітних кіл;
- розробити математичну модель двообмоткового трансформатора з покращеними характеристиками;
- розробити модель чутливості до початкових умов з метою використання її для аналізу періодичних електромагнітних процесів;
- розробити методичні положення щодо застосування на практиці запропонованих моделей та методу аналізу періодичних процесів.

Об'єкт дослідження – періодичні електромагнітні процеси в силових трансформаторів як елементів електроенергетичної системи.

Предмет дослідження – моделі і методи аналізу періодичних процесів в силових трансформаторах електроенергетичної системи.

Методи дослідження. Теоретичною і методологічною основою дисертаційної роботи стали положення теоретичної електротехніки, теорії електромагнітних перетворювачів енергії, на основі яких отримані математичні моделі одно- та трифазних силових трансформаторів, теорії нелінійних диференціальних рівнянь, методів чисельного інтегрування, що дозволило вдосконалити метод Ньютона для розв'язання отриманих систем диференціальних рівнянь і розширити можливості оцінювання параметричної чутливості в рамках теорії чутливості.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні математичних моделей силових трансформаторів як елементів електроенергетичних систем для дослідження в них періодичних електромагнітних процесів і покращення їх техніко-економічних характеристик. Зокрема:

– вдосконалено математичні моделі одно- і трифазного трансформаторів, що ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь, представлених у нормальній формі Коші, і дозволяють на єдиній методологічній основі аналізувати як перехідні, так і усталені періодичні електромагнітні процеси в силових трансформаторах;

– вперше розроблено метод оцінювання впливу силового трансформаторного обладнання на енергоефективність систем електропостачання, що ґрунтується на застосуванні розроблених математичних моделей для створення силових трансформаторів з просторовим магнітопроводом, використання яких створює умови для зменшення втрат електроенергії під час її транспортування та покращання якості напруги в електричних мережах;

– розвинуто метод оцінювання чутливості до початкових умов за рахунок представлення матриці чутливості добутком двох інших матриць, перша з яких є матрицею коефіцієнтів вихідної системи рівнянь стану, яка відтворює перехідну реакцію системи на періоді, а друга – матрицею, елементи якої обчислюються з варіаційних рівнянь і є експоненціальною вільною складовою, яка гасить вимушену перехідну реакцію. Це дає змогу на основі єдиного алгоритму досліджувати перехідні, періодичні (стаціонарні) процеси та статичну стійкість електричних мереж, елементами яких є трансформатори.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані в роботі моделі і методи доведені до рівня прикладних положень і рекомендацій та можуть бути використані в організаціях, які проводять дослідження і аналіз електромагнітних процесів, формують стратегію розвитку електроенергетичних систем, оптимізують плани інвестування в розвиток елементної бази енергетичних систем. В результаті впровадження розробок даної роботи як окремих модулів і стандартних підпрограм розширюються функціональні можливості проектних організацій.

Основні результати дослідження впроваджено в практичну діяльність ПАТ «Хмельницькобленерго», на основі яких у науковій лабораторії виготовлено трифазний трансформатор потужністю 100 кВА напругою 10/0,4 кВ з монолітною магнітною системою і груповий трансформатор потужністю 25 кВА напругою 10/0,4 кВ з просторовою магнітною системою. Методи і засоби аналізу електромагнітних процесів використовуються при розробці енергоефективної системи опалення та кондиціонування промислових приміщень з використанням трансформаторів нового типу, універсального тепло акумулятора та комбінованих систем компенсації пікового навантаження електромереж на базі суперконденсаторів.

Теоретичні положення, методи та моделі, що визначають наукову новизну дисертації, використовуються в навчальному процесі під час підготовки

фахівців за електротехнічними спеціальностями в Хмельницькому національному університеті.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є одноосібно виконаною науковою працею, в якій виконано авторський підхід до моделювання періодичних процесів електромагнітних пристроїв. З публікацій, що написані у співавторстві, використано лише ті результати, які отримані автором особисто. Зокрема: [4] – запропоновано застосування моделювання на основі стандарту BPMN (Businnes Process Modeling Notation); [5] – досліджено сучасні ринкові умови функціонування електроенергетичних підприємств, запропоновані підходи, які дозволять підвищити якість послуг при одночасному зниженні витрат в процесі передачі і розподілу електроенергії; [6] – проведено дослідження проблемних ділянок процесу реалізації електроенергії виробничої ділянки; [8] – розроблено метод для аналізу електромеханічних періодичних процесів на основі моделі чутливості до своїх початкових умов, який виключає перехідну реакцію і одразу приводить до періодичного процесу; [9] – вдосконалено метод аналізу впливу електротехнічних пристроїв на якість електропостачання; [10] – запропоновано метод аналізу перехідних та усталених режимів силових трансформаторів, які описуються диференціальними рівняннями стану в формі Коші; [12] – розроблено метод побудови моделі чутливості до початкових умов, що суттєво спрощує аналіз і знімає обмеження на складність системи; [13] – обґрунтовано переваги трансформаторів з просторовою магнітною системою над трансформаторами з плоскою магнітною системою в різних режимах роботи; [14] – розроблено модульну конструкцію трансформатора з просторовою магнітною системою, яка дозволяє утворити трифазний трансформатор трьома способами.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1 – 14], були отримані у Хмельницькому національному університеті.

Апробація результатів дисертації. Положення і результати дослідження доповідалися та обговорювалися на:

- VI міжнародній науково-практичній конференції «Маркетингові технології в умовах інноваційного розвитку економіки», (м. Хмельницький 8–10 грудня 2011 р.);
- науково-практичному семінарі «Международное научно-техническое сотрудничество – 2011» (Греція, о. Корфу, 28 травня – 4 червня 2011 р.);
- V науково-практичному семінарі «Сучасні технології та обладнання у виробництві та навчальному процесі», (Хмельницький, 9 жовтня 2015 р.);
- Міжнародній науковій конференції «VI Ukrainian-Polish Scientific Dialogues», (Хмельницький–Яремче, 21–24 жовтня 2015);
- Міжнародному науково-практичному семінарі «Supercapacitors and energy storage» (Італія, м. Фраскаті, 13 травня 2016 р.);
- I-му науково-практичному семінарі «Альтернативна енергетика. Стан та перспективи розвитку», (м. Хмельницький, 29 червня 2016 р.);
- науково-практичній конференції „Розподільчі мережі 0,4-35 кВ як складова частина локальних електроенергетичних систем майбутнього” (м. Хмельницький, 10-14 жовтня 2016 р.).

Публікації. Основні наукові положення, висновки і результати дисертаційного дослідження опубліковані в 14 наукових працях, з них 7 статей у наукових фахових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, 2 статті в іноземних періодичних виданнях; 3 статті в інших наукових журналах; 1 – матеріали конференцій. Отримано патент на винахід.

Структура й обсяг роботи Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Основний зміст роботи становить 154 сторінки. Дисертація містить 31 рисунок. Список використаних джерел містить 105 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження. Вказана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведені відомості щодо апробації роботи, особистий внесок здобувача і публікації. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У **першому розділі** на підставі аналізу праць з теми роботи охарактеризовано стан проблеми побудови математичних моделей електротехнічних пристроїв, простежено тенденції їх розвитку.

З впровадженням ринкових стосунків, а також з ростом вартості первинних енергоносіїв і, відповідно, вартості електроенергії збільшилася капіталізована вартість її втрат. Вартість енергії, а також капіталізована вартість втрат продовжують зростати. Це проявляється в тому, що поступово змінюється стратегія формування рішень щодо капіталовкладень в електроенергетику. Якщо раніше під час проектування віддавалася перевага умовно «дешевим» проектам і конструкціям електрообладнання, що проявлялося у збільшенні експлуатаційних витрат, в тому числі і втрат електроенергії, то тепер віддається перевага більш збалансованим рішенням. Наприклад, розробляються проекти модернізації електричних мереж з більш досконалим, а значить дорожчим, електрообладнання, яке забезпечує суттєве зменшення втрат електроенергії і покращання її якості.

Тому очевидно, що втрати в трансформаторах стали розглядати як одну з основних складових втрат електроенергії під час її транспортуванні. Відповідно, це привернуло увагу до необхідності ціленаправленого вдосконалення конструкції силових трансформаторів для зменшення в них втрат електроенергії і напруги.

На основі аналізу існуючих підходів до визначення електромагнітних процесів, які широко використовуються на практиці, можна зробити такі висновки. Методи розрахунку перехідних процесів полягають у чисельному інтегруванні диференціальних рівнянь стану в неперервному часі, тому обчислювальний експеримент є адекватним фізичному і може бути застосоване комп'ютерне моделювання. Методи аналізу усталених процесів

використовують дискретний час, що зумовлюється математичним апаратом, на якому вони базуються. Тому вони вимагають втручання в обчислювальний процес для того, щоб на основі досвіду здійснювати вибір кількості гармонік (метод гармонічного балансу), числа точок на періоді (точковий метод), регулярності сітки (сітковий метод) та ін. Такі методи громіздкі, складні у програмній реалізації і не завжди забезпечують потрібну точність.

Принципового значення з точки зору зменшення об'єму обчислень і підвищення точності розрахунків набуває спосіб описування електромагнітного стану електротехнічних пристроїв – їх математичні моделі. Основним недоліком традиційних моделей є наявність протиріч між просторово-часовим характером електромагнітних процесів і дискретно-часовим методами їх дослідження, з одного боку, і практично необмеженими можливостями сучасних комп'ютерів і не з орієнтованими на комп'ютерну реалізацію математичними моделями електротехнічних пристроїв, в яких ці процеси протікають – з другого.

Для усунення цих протиріч необхідно розробити сучасний метод розрахунку усталених електромагнітних процесів у неперервному часі з одночасним розв'язуванням задач на усіх його етапах, а також побудувати на нових принципах математичні моделі електротехнічних пристроїв – одно-, і трифазних трансформаторів, адекватні фізичним і структурно зорієнтованих на розроблений метод.

Другий розділ присвячено розробленню математичних моделей одно- і трифазних трансформаторів, що ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь, представлених у нормальній формі Коші.

Робочий процес трансформатора можна дослідити на основі рівнянь напруг його обмоток. Ці рівняння отримуються за деяких допущень, що не мають суттєвого впливу на точність аналізу. Ємнісні струми між елементами обмоток (витки і котушки) і між обмотками та осердям трансформатора малі і ними можна знехтувати. Значення індуктивностей первинної та вторинної обмоток, а також їх взаємоіндуктивність практично сталі для будь-якого режиму роботи трансформатора.

Розрахункові схеми електричних контурів трансформатора наведені на рис. 1, а розрахункова схема магнітного кола – на рис. 2. Враховуючи ту обставину, що на фізичні процеси, які протікають в активних частинах трансформатора, суттєвий вплив має характер навантаження, у вторинну його обмотку включено послідовно сполучені конденсатор, дросель та резистор з лінійними характеристиками, тобто з постійними ємністю C , індуктивністю L та активним опором R_H .



Рисунок 1 – Розрахункові схеми електричних кіл

Для розрахункових схем, наведених на рис. 1 згідно з другим законом Кірхгофа справедливі рівняння напруг:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = u_1 - r_1 i_1, \quad \frac{d\Psi_2}{dt} = -u_c - L \frac{di_2}{dt} - (r_2 + R_H) i_2. \quad (1)$$

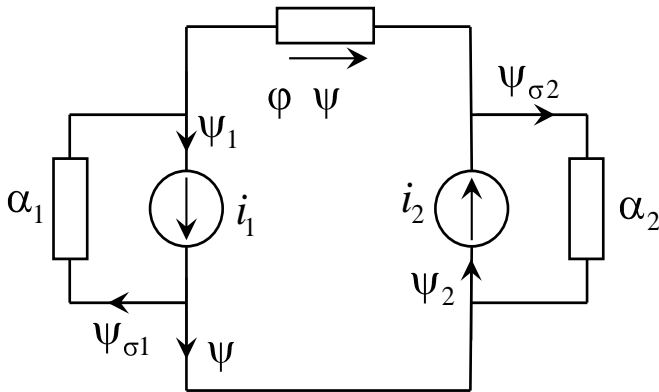


Рисунок 2 – Розрахункова схема магнітного кола

Тут $\Psi_1, \Psi_2, r_1, r_2, i_1, i_2$ – миттєві значення повних потокозчеплень, опори та струми обмоток трансформатора; u_1, u_c – напруги живлення та конденсатора. Індеси "1" і "2" вказують на причетність відповідно до первинної та вторинної обмоток трансформатора.

Рівняння (1) включають у себе параметри електричних контурів, якими є струми первинної та вторинної обмоток, а також параметри магнітних контурів,

якими є повні потокозчеплення тих самих обмоток. Невідповідність між кількістю невідомих і порядком системи робить її невизначеною. Для її визначеності звернемося до розрахункової схеми магнітного кола рис. 2. На основі першого закону Кірхгофа для кожного з вузлів схеми запишемо рівняння

$$\Psi_1 = \psi + \Psi_{\sigma 1}, \quad \Psi_2 = \psi + \Psi_{\sigma 2}, \quad (2)$$

де ψ – основне або робоче потокозчеплення; $\Psi_{\sigma 1}, \Psi_{\sigma 2}$ – потокозчеплення розсіяння обмоток.

Потокозчеплення розсіяння замикаються в основному повітрям, тобто лінійним середовищем, тому зв'язок між ними і струмами, що їх породжують, є лінійним

$$\Psi_{\sigma 1} = L_{\sigma 1} \cdot i_1, \quad \Psi_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \cdot i_2, \quad (3)$$

де $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ – індуктивності розсіяння.

У розрахунках зручніше користуватись величинами, оберненими індуктивностями розсіяння

$$\alpha_1 = 1/L_{\sigma 1}, \quad \alpha_2 = 1/L_{\sigma 2}. \quad (4)$$

Вирази (2) після підстановки в них (3) і (4) набудуть вигляду

$$\Psi_1 = i_1/\alpha_1 + \psi, \quad \Psi_2 = i_2/\alpha_2 + \psi. \quad (5)$$

Режими роботи трансформатора (холостий хід, коротке замикання, номінальне навантаження) визначаються значенням струмів, тому важливо мати формули для їх обчислень. Знайдемо їх, розв'язавши (5) відносно струмів. Отримаємо

$$i_1 = \alpha_1(\Psi_1 - \psi), \quad i_2 = \alpha_2(\Psi_2 - \psi). \quad (6)$$

Рівняння (6) відображають зв'язок між електричними і магнітними процесами, які протікають в активних частинах трансформатора. Аналітичною формою цього зв'язку є крива намагнічення осердя, яку отримаємо згідно з

другим законом Кірхгофа для магнітного кола (рис. 2)

$$\varphi(\psi) = i_1 + i_2, \quad (7)$$

де $\varphi(\psi)$ – крива намагнічення.

Для зручності перетворень у правій частині другого рівняння (1) введемо позначення

$$\frac{d\Psi'_2}{dt} = -u_c - (r_2 + R_H)i_2, \quad (8)$$

тоді друге рівняння (1) буде мати вигляд

$$\frac{d\Psi_2}{dt} = \frac{d\Psi'_2}{dt} - L \frac{di_2}{dt}. \quad (9)$$

Вище, під час побудови математичних моделей електротехнічних пристроїв, відзначалось, що диференціальна форма рівнянь моделі відкриває шлях до використання явних методів чисельного інтегрування, в яких відсутня ітераційна процедура, а представлення диференціальних рівнянь у нормальній формі Коші усуває процедуру обертання матриці коефіцієнтів на кожному кроці інтегрування. Усе це разом пришвидшує розрахунки і підвищує їх точність.

Продиференціюємо (6) за часом, при цьому у другий вираз підставимо (9). Отримаємо

$$\frac{di_1}{dt} = \alpha_1 \left(\frac{d\Psi_1}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \right), \quad (10)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \alpha_2 \left(\frac{d\Psi_2}{dt} - L \frac{di_2}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \right). \quad (11)$$

З (11) похідна струму i_2 буде дорівнювати

$$\frac{di_2}{dt} = \alpha'_2 \left(\frac{d\Psi'_2}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \right), \quad (12)$$

де

$$\alpha'_2 = \alpha_2 / (1 + \alpha_2 L). \quad (13)$$

Продиференціюємо (7) за часом. Отримаємо

$$\alpha''(\psi) \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt}. \quad (14)$$

Тут

$$\alpha''(\psi) = \frac{d\varphi(\psi)}{d\psi} \quad (15)$$

є оберненою диференціальною індуктивністю трансформатора, яка визначається за кривою намагнічення (7).

Підставимо в (14) вирази (10), (12) і (15), після чого він буде мати вигляд

$$\alpha_1 \left(\frac{d\Psi_1}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \right) + \alpha'_2 \left(\frac{d\Psi'_2}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \right) = \alpha'' \frac{d\psi}{dt}. \quad (16)$$

Звідси визначимо часову похідну основного поточкозчеплення

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''} \frac{d\Psi_1}{dt} + \frac{\alpha'_2}{\alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''} \frac{d\Psi'_2}{dt}. \quad (17)$$

З метою компактності запису введемо позначення

$$g_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''_2}, \quad g_2 = \frac{\alpha'_2}{\alpha_1 + \alpha'_2 + \alpha''_2}. \quad (18)$$

З врахуванням (18) вираз (17) набуває вигляду

$$\frac{d\Psi}{dt} = g_1 \frac{d\Psi_1}{dt} + g_2 \frac{d\Psi'_2}{dt}. \quad (19)$$

Маючи часову похідну (19), можна її виключити шляхом підстановки у вирази (10), (12). Після приведення подібних членів рівняння струмів приймуть вигляд:

$$\frac{di_1}{dt} = \alpha_{11} \frac{d\Psi_1}{dt} + \alpha_{12} \frac{d\Psi'_2}{dt}, \quad (20)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \alpha_{21} \frac{d\Psi_1}{dt} + \alpha_{22} \frac{d\Psi'_2}{dt}, \quad (21)$$

де

$$\alpha_{11} = \alpha_1(1 - g_1), \quad \alpha_{12} = -\alpha_1 g_2, \quad \alpha_{21} = -\alpha'_2 g_1, \quad \alpha_{22} = \alpha'_2(1 - g_2). \quad (22)$$

Праві частини рівнянь (20) і (21) містять похідні $d\Psi_1/dt$ і $d\Psi'_2/dt$. Першу похідну замінимо її значенням з першого рівняння (1). Другу похідну можна знайти з виразу (8), але для цього необхідно знати напругу конденсатора u_c . Тому рівняння (20), (21) доповнимо рівнянням

$$\frac{du_c}{dt} = i_2/C. \quad (23)$$

Електромагнітний стан трансформатора однозначно визначається системою диференціальних рівнянь (19), (20), (21), (23).

Для компактності запису і зручності математичних процедур подамо цю модель у матричній формі.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Psi \\ i_2 \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}^{-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{U} - \mathbf{R}\mathbf{I} \\ i_2 \end{pmatrix}. \quad (24)$$

де $\Psi = \Psi_1, \Psi'_2{}^T$ – вектор повних потокозчеплень обмоток; $\mathbf{I} = i_1, i_2{}^T$ – вектор струмів обмоток; $\mathbf{U} = u_1, -u_c{}^T$ – вектор напруг; $\mathbf{R} = \text{diag } r_1, r_2 + R_H$ – діагональна матриця опорів; $\mathbf{D} = g_1, g_2$; $\mathbf{A}_2 = a_{21}, a_{22}$.

Врешті, розгорнуте матричне рівняння (24) запишемо одним матричним рівнянням. Для цього введемо такі позначення: $\mathbf{X} = \Psi, i_2, u_c{}^T$ – вектор змінних

$$\text{стану; } \mathbf{Z}(t) = \mathbf{U} - \mathbf{R}\mathbf{I}, i_2{}^T; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}^{-1} \end{pmatrix}.$$

Тоді (24) перепишеться:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{B}(\Psi) \cdot \mathbf{Z}(t). \quad (25)$$

Математична модель трифазного трансформатора побудована з врахуванням того, що параметри фаз трансформатора можуть відрізнятися один від одного, а вторинні обмотки можуть працювати на несиметричне RLC-навантаження. Скориставшись результатами моделювання однофазного трансформатора, отримуємо рівняння, які описують електромагнітні процеси в трифазному трансформаторі:

$$\frac{dI_1}{dt} = \mathbf{A}_1 \mathbf{U} - \mathbf{R} \mathbf{I} , \mathbf{A}_1 = [\alpha_1 E - D_1 , -\alpha_1 D_2] , \quad (26)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \mathbf{A}_2 \mathbf{U} - \mathbf{R} \mathbf{I} , \mathbf{A}_2 = [-P_2 \mathbf{H} D_1, P_2 E - \mathbf{H} D_2] , \quad (27)$$

де $P_2 = (\mathbf{H}(\alpha_2^{-1} + L_H) \mathbf{H}^T)^{-1}$ – матриця коефіцієнтів; \mathbf{H} – структурна матриця.

Останні рівняння доповнимо рівнянням

$$\frac{dU_C}{dt} = \mathbf{C}^{-1} I_2 , \quad (28)$$

де $\mathbf{C}^{-1} = \text{diag}[C_A^{-1}, C_C^{-1}]$ – діагональна матриця обернених ємностей навантаження.

Рівняння (26), (27) та (28) запишемо єдиним виразом

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{B} \psi \mathbf{Z} t , \mathbf{Z} t = \mathbf{U} - \mathbf{R} \mathbf{I}, I_2^T , \quad (29)$$

де $\mathbf{X} = \psi, I_2, U_C^T$ – вектор змінних стану; $\mathbf{B} = \text{diag}[\mathbf{M}, \mathbf{C}^{-1}]$ – матриця коефіцієнтів $\mathbf{M} = D, A_2^T$.

Третій розділ. Показано, що задачі розрахунку перехідних і усталених процесів, а також визначення параметричної чутливості розв'язуються на основі єдиного алгоритму. Показано, що важливою задачею аналізу є математичне оцінювання правильності вибору параметрів об'єкту, а також визначення значень максимально можливих відхилень цих параметрів. Для цього досліджується чутливість вихідних характеристик до зміни тих чи інших постійних параметрів, застосовуючи методи теорії чутливості.

Покажемо можливість розв'язання задачі параметричної чутливості розробленим методом побудови моделі чутливості до початкових умов. При цьому замість моделі чутливості до початкових умов формується модель параметричної чутливості, після чого алгоритм розрахунку параметричної чутливості є простим додатком до алгоритму прискореного пошуку періодичних розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь на підставі ньютонівських ітерацій.

Запишемо вектор сталих параметрів у вигляді

$$\Lambda = \langle \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \rangle . \quad (30)$$

Тоді матриця параметричних чутливостей визначається як частинна похідна

$$\Xi = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \Lambda} , \quad (31)$$

де \mathbf{X} – вектор змінних.

Елементом матриці Ξ може бути будь-який сталий параметр трансформатора в електроенергетичній системі.

Аргумент \mathbf{X} знаходимо з рівняння, яке з врахуванням залежності $\mathbf{X} = \mathbf{X}(\underline{\Lambda})$ запишемо у вигляді

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = f_1(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\Lambda}, t), \quad (32)$$

де f_1 – T -періодична функція t .

Продиференціюємо (32) по Λ , враховуючи при цьому (31). Отримаємо лінійне параметричне рівняння

$$\frac{d\Xi}{dt} = \frac{\partial f_1(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\Lambda}, t)}{\partial \mathbf{X}} \cdot \Xi + \frac{\partial f_1(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\Lambda}, t)}{\partial \Lambda}. \quad (33)$$

Рівняння (33) також має $\Xi(\underline{\Lambda})$ періодичний розв'язок.

Продиференціювати праву частину рівняння (32) з метою отримання похідних, які знаходяться у правій частині (33), практично неможливо через складну залежність функцій f_1 від змінних. Тому введено матрицю допоміжних параметричних чутливостей χ по відношенню до деякого іншого вектора \mathbf{Y} – аргументу залежності

$$\chi = \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \Lambda}. \quad (34)$$

Допоміжне рівняння стосовно вектора \mathbf{Y} також буде параметричне, тобто залежне від вектора параметрів Λ , тобто

$$\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial t} = f_2(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\mathbf{Y}}, \underline{\Lambda}, t), \quad (35)$$

де f_2 – T -періодична функція по t .

Диференціюючи (35) по Λ та враховуючи (34), отримаємо

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{\partial f_2(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\mathbf{Y}}, \underline{\Lambda}, t)}{\partial \mathbf{X}} \cdot \mathbf{A} \cdot \chi + \frac{\partial f_2(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\mathbf{Y}}, \underline{\Lambda}, t)}{\partial \Lambda}. \quad (36)$$

Якщо врахувати, що в моделі параметричної чутливості вектору початкових умов відповідає вектор параметрів, тобто $\Lambda = \mathbf{X}(\underline{\Lambda})$, то рівняння (36) вироджується в однорідне рівняння

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{\partial f_2(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\mathbf{Y}}, \underline{\Lambda}, t)}{\partial \mathbf{X}} \cdot \mathbf{A} \cdot \chi. \quad (37)$$

За умови, що $\Lambda = \mathbf{X}(\underline{\Lambda})$, похідні (34) і (3.15) будуть рівні. У такому разі рівняння (37) набуває вигляду

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \frac{\partial f_2(\underline{\mathbf{K}}, \underline{\mathbf{Y}}, \underline{\Lambda}, t)}{\partial \mathbf{X}} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}. \quad (38)$$

Періодичний розв'язок рівняння моделі параметричної чутливості (37) знаходиться також методом прискореного пошуку. При цьому чисельній реалізації підлягає вираз (32), в результаті чого знаходиться періодичний розв'язок рівнянь стану трансформатора, а відтак – матриця параметричних чутливостей (31).

Отже, при знаходженні періодичних розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь можна попутно визначити чутливість цих розв'язків до зміни постійних параметрів рівнянь або параметричну чутливість. Це дає змогу на основі єдиного алгоритму дослідити перехідні, періодичні (стаціонарні) процеси та статичну стійкість електричних мереж, елементами яких є трансформатори.

Четвертий розділ. На основі теоретичних положень другого розділу і методологічних засад розроблених в третьому розділі виконано аналіз електромагнітних процесів в силових трансформаторах і вплив їх на режими електричних мереж.

Рівняння (25) та (29) мають високий ступінь універсальності, оскільки дозволяють моделювати будь-які режими трифазного трансформатора з урахуванням несиметрії параметрів окремих фаз та проводити аналіз як перехідних, так і усталених режимів роботи. Проведемо моделювання різних режимів, чим покажемо універсальність рівнянь (29).

Розрахунки виконані з використанням моделі чутливостей до початкових умов. Фаза А ввімкнена на активно-ємнісне навантаження з нульовим провідником. Напряга живлення задана виразами:

$$u_{1A} = U_m \sin(\omega t + \gamma), \quad u_{1B} = U_m \sin(\omega t + \gamma - \gamma_0), \quad u_{1C} = U_m \sin(\omega t + \gamma + \gamma_0),$$

де $U_m = 311\text{В}$, $\omega = 314.1593\text{ рад/с}$, $\gamma = 0.8\text{ рад}$, $\gamma_0 = 2\pi/3\text{ рад}$.

Розрахунки виконані за таких параметрів: $r_{1A} = 1.25\text{ Ом}$; $r_{1B} = 1.2\text{ Ом}$; $r_{1C} = 1.22\text{ Ом}$; $r_{2A} = 2.08\text{ Ом}$; $r_{HA} = 35\text{ Ом}$; $\alpha_{1A} = 178\text{ Гн}^{-1}$; $\alpha_{1B} = 131\text{ Гн}^{-1}$; $\alpha_{1C} = 230\text{ Гн}^{-1}$; $\alpha_{2A} = 178\text{ Гн}^{-1}$; $\alpha_0 = 5.3\text{ Гн}^{-1}$; $C = 0.12\text{ мкФ}$. Криві намагнічення апроксимовані виразом

$$\varphi_j(\psi_j) = a_{1j}\psi_j + a_{2j}\psi_j^3 + a_{3j}\psi_j^5 + a_{4j}\psi_j^7, \quad j = A, B, C,$$

де $a_{1A} = 0.17\text{ Гн}^{-1}$, $a_{2A} = 0.1524773\text{ Вб}^{-2}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{3A} = -0.2149544\text{ Вб}^{-4}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{4A} = 1.4924760\text{ Вб}^{-6}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{1B} = 0.3\text{ Гн}^{-1}$, $a_{2B} = 0.377756\text{ Вб}^{-2}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{3B} = -1.555512\text{ Вб}^{-4}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{4B} = 2.477756\text{ Вб}^{-6}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{1C} = 0.25\text{ Гн}^{-1}$, $a_{2C} = 0.159614\text{ Вб}^{-2}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{3C} = -0.269228\text{ Вб}^{-4}\text{ Гн}^{-1}$, $a_{4C} = 1.659614\text{ Вб}^{-6}\text{ Гн}^{-1}$.

На рис. 3,а наведено ферорезонансну характеристику однофазного трансформатора – функціональну залежність амплітудного значення струму вторинної обмотки від амплітудного значення напруги живлення трансформатора. Особливість алгоритму розрахунку ферорезонансних характеристик обумовлена наявністю декількох усталених режимів, серед яких є стійкі та нестійкі. Для отримання всієї сукупності усталених режимів, необхідно варіювати початковими умовами $\mathbf{X}(0)$, щоб потрапити в зону притягання одного з них. Якщо покласти $\mathbf{X}(0) = 0$, тобто почати інтегрування з нульовими початковими умовами, то отримаємо перший стійкий режим, позначений на рис. 3,а цифрою 1. Якщо у векторі змінних $\mathbf{X}(0)$ прийняти початкове значення струму вторинної обмотки $i_{2M} = 20\text{ А}$, а $\psi = 0$, $u_c = 0$, то при нарузі живлення (початкове значення) $u_{2M} = 10\text{ В}$ попадемо на другий стійкий режим, який на рис. 3,а позначено цифрою 3. Якщо ж у векторі $\mathbf{X}(0)$

змінимо початкове значення вторинного струму $i_{2M} = 10$ А, то при напрузі $u_{2M} = 30$ В отримаємо нестійкий режим, позначений цифрою 2.

На рис. 3,б наведені розрахункові криві вторинного струму i_{2M} , отримані в результаті моделювання в середовищі Simulink. З рис. 3,б видно, що ферорезонансна характеристика (рис. 3,а) підтверджується.

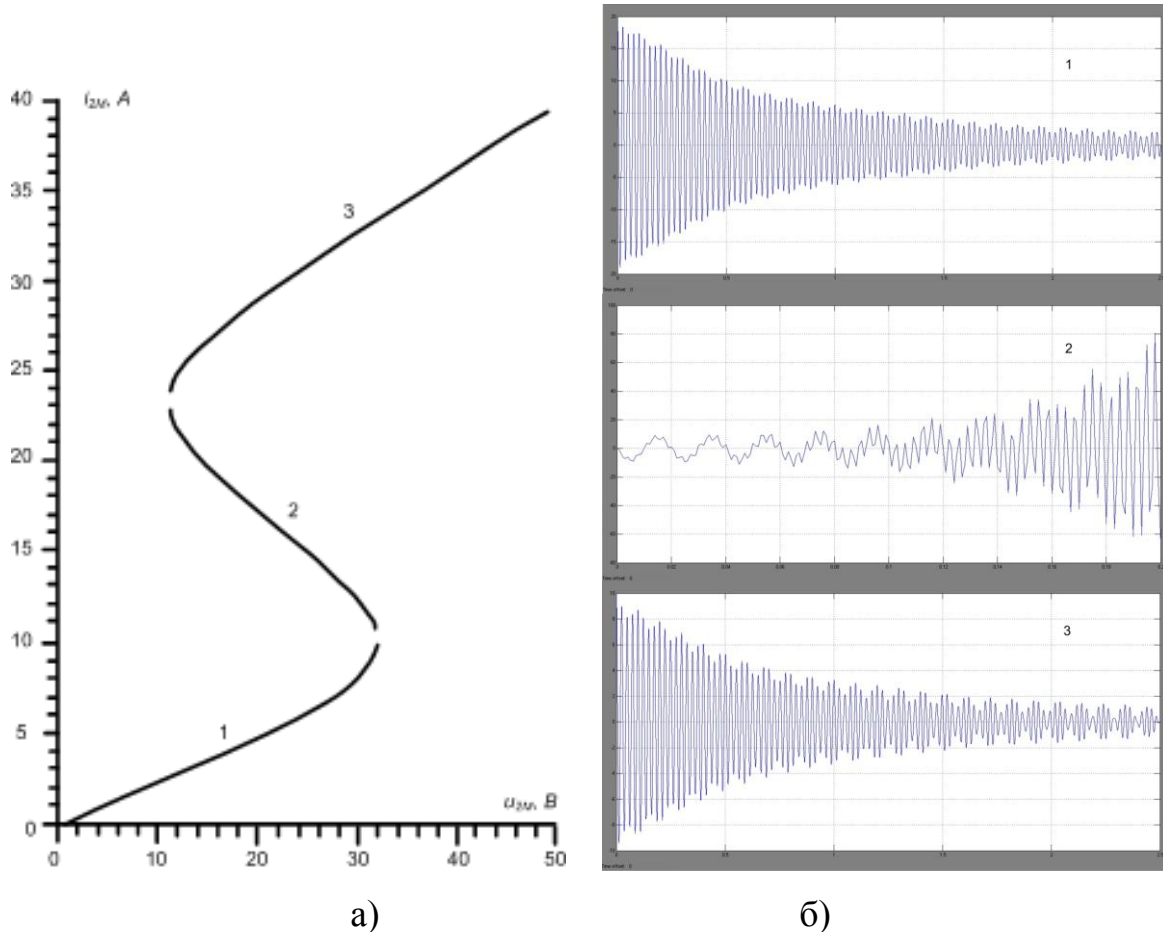


Рисунок 3 – Ферорезонансна характеристика (а) та розрахункові криві струму i_{2M} , отримані в результаті моделювання в середовищі Simulink (б)

На рис. 4 наведені усталені значення фазних струмів первинної обмотки трансформатора. Наявність вищих гармонік в цих струмах свідчить про те, що трансформатор працює в насиченому режимі. Саме це і є причиною нелінійних спотворень згідно кривих намагнічення окремих фаз. Лінійні струми первинної обмотки (рис. 5) обчислені як різниця суміжних фаз.

Проведено аналіз параметричної чутливості зміни робочого потокозчеплення до зміни індуктивності розсіювання L_{σ} . Оскільки індуктивність розсіювання залежить від конструкцій обмотки та магнітної частини силового трансформатора, то в результаті аналізу можна дати характеристику і його масо-габаритним параметрам.

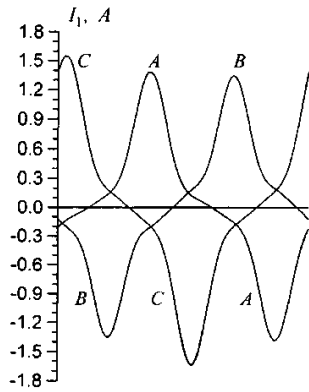


Рисунок 4 – Усталені значення фазних струмів первинної обмотки трансформатора в режимі обриву фаз *B* і *C* з нульовим провідником на виході

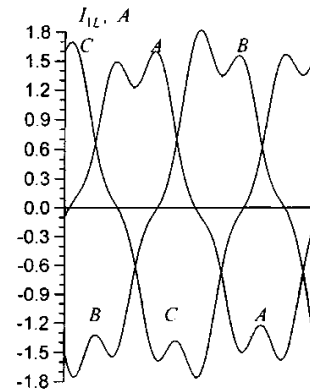


Рисунок 5 – Усталені значення лінійних струмів первинної обмотки трансформатора в режимі, що відповідає рис. 4

Залежність між індуктивністю розсіювання і габаритними розмірами має вид:

$$L_{\sigma} = \mu_0 w^2 \beta s_{\sigma} \int h_{\text{кат}} = k_{L\sigma} \beta w^2 s^{1/2}, \quad (39)$$

де $k_{L\sigma} = \mu_0 s_{\sigma} \int h_{\text{кат}}$; w – кількість витків; β – коефіцієнт використання ширини вікна осердя; s_{σ} – ефективна площа розсіювання котушки; s – площа перерізу магнітопроводу; $h_{\text{кат}}$ – висота котушки; μ_0 – магнітна проникність.

Провівши аналіз на чутливість, отримано дані, які дозволили визначити залежність площі поперечного перерізу магнітопроводу і втрат активної потужності, викликані індуктивністю розсіювання (див. рис. 6). Очевидним є необхідність збільшення площі поперечного перерізу магнітопроводу.

В науково-дослідній лабораторії ПАТ «Хмельницькобленерго» виготовлено одно- трифазні трансформатори з просторовою магнітною системою. Порівняння характеристик таких трансформаторів з традиційними наведено в таблиці 1. На них отримано патент на винахід. На рис. 7 наведено фотографію такого трансформатора.

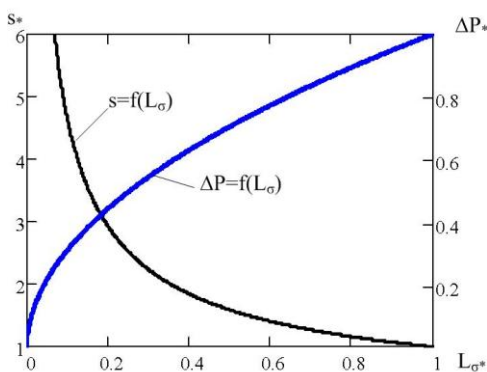


Рисунок 6 – Графік зміни площі поперечного перерізу магнітопроводу s_* та втрат ΔP_* від індуктивності розсіювання L_{σ^*} (у відносних одиницях)



Рисунок 7 – Трифазний трансформатор з просторовою магнітною системою з горизонтальним розташуванням фаз

В Україні процес переходу на електроопалення, стимульований державними органами, набуває обертів. Однак зростання електроспоживання тягне за собою і зростання втрат, в тому числі і втрат в силових трансформаторах.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики трансформаторів з традиційними (плоскими) та з просторовими магнітопроводами

| Виробник | Тип тр-ра | Потужність S (кВА) | Група з'єднання | Втрати (Вт) | | Ук (%) | Маса (кг) |
|--|--|--------------------|-----------------|------------------|------------------|--------|-----------|
| | | | | $\Delta P_{x.x}$ | $\Delta P_{к.з}$ | | |
| Мінський електротехнічний завод ім. В.І. Козлова | ТС 25 – 10У3 | 25 | Y/Y0 | 175 | 600 | 4,5 | 250 |
| | ТС3 25 – 10У3 | 25 | $\Delta/Y0$ | 255 | 880 | 4,5 | 350 |
| | ТС 100 – 10У3 | 100 | $\Delta/Y0$ | 400 | 1720 | 4,5 | 580 |
| | ТС(3) 100 – 10У3 | 100 | $\Delta/Y0$ | 390 | 1720 | 4,0 | 565 |
| ПАТ «Укрелектроапарат» м.Хмельницький | ТС – 25 (груповий) 10/0,4 кВ (дослідний) | 25 | Y/Y0 | 108 | 600* | 3,8* | 3×120 |
| | ТС – 100 10/0,4 кВ (дослідний) | 100 | Y/Y0 | 290 | 1716* | 3,82* | 680 |

*) $\Delta P_{кз}$ і Ук дослідних трансформаторів приведені до температури обмоток $t = 75^\circ\text{C}$.

В роботі проведено розрахунок режимів ряду районних електричних мереж Хмельницької області, населені пункти в яких переведені на електричне опалення і які знаходяться в безпосередній близькості до Хмельницької АЕС. Метою розрахунку було оцінити значення додаткових втрат активної потужності протягом доби для варіанту з силовими трансформаторами з плоскою магнітною системою та просторовою. Розрахунки проводились засобами DigSILENT PowerFactory 15.1.

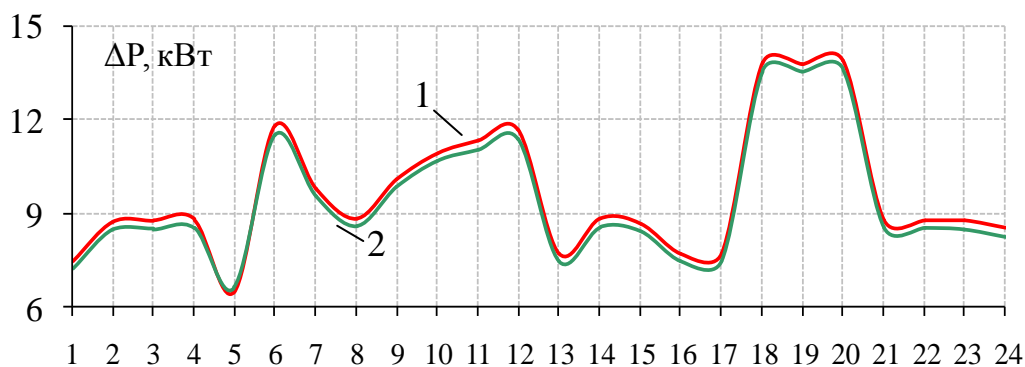


Рисунок 8 – Результати розрахунку втрат активної потужності протягом доби

На рис. 8 показано зміну втрат активної потужності протягом доби. Крива

1 відповідає мережі з силовими трансформаторами з плоскою магнітною системою, крива 2 – мережі з силовими трансформаторами з просторовою магнітною системою. Економія електроенергії складає 9,8%.

ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі, що полягає у створенні моделей силових трансформаторів як елементів електроенергетичних систем для дослідження в них періодичних електромагнітних процесів і покращення їх техніко-економічних характеристик.

Проведені дослідження дозволили отримати такі результати:

1. Проаналізовано сучасний стан математичного моделювання періодичних електромагнітних процесів та методи побудови математичних моделей електромагнітних пристроїв типу трансформаторів, узагальнено існуючі підходи і методи розрахунку періодичних процесів в трансформаторах. Показано, що на основі теорії електромагнітних кіл можливо і доцільно створити метод і математичні моделі для дослідження взаємовпливу процесів в трансформаторах і електричних мережах енергосистем.

2. Розвинені методи побудови математичних моделей електротехнічних пристроїв як елементів складних енергетичних систем. Отримані на основі теорії електромагнітних кіл нелінійні диференціальні рівняння одно- і трифазних трансформаторів аналітично розв'язані відносно похідних струмів і потокозчеплень, які представлені у нормальній формі Коші. Незмінність структурної форми моделей у випадку аналізу складних систем забезпечує точність результатів, скорочення часу і спрощення аналізу, чого неможливо досягти з використанням традиційних моделей, що базуються на коефіцієнтах само- і взаємоіндуктивностей.

3. Розроблено математичні моделі одно- і трифазних трансформаторів, що ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь, представлених у нормальній формі Коші. Ці моделі покладені в основу методу, що дозволяє на єдиній методологічній базі аналізувати як перехідні, так і усталені електромагнітні процеси силових трансформаторів як елементів електроенергетичної системи.

4. Розвинуто метод оцінювання чутливості математичної моделі трансформатора до вихідних даних за рахунок визначення елементів матриці чутливості з системи варіаційних рівнянь, аналітичні розв'язки яких представлено добутком двох множників: перший з яких є матрицею коефіцієнтів перехідної реакції системи рівнянь стану, а другий – експонента, яка гасить перехідну реакцію, що дозволяє усі етапи аналізу електромагнітних пристроїв – розрахунок перехідних і усталених процесів, визначення їх статичної стійкості – об'єднати в єдиний алгоритм.

5. Використання розроблених методів і засобів моделювання періодичних електромагнітних процесів в силових трансформаторах електроенергетичних систем дозволяє виявити можливі шляхи їх вдосконалення. За результатами дослідження розроблено двообмотковий трансформатор з покращеними

характеристиками. Зокрема, такий трансформатор завдяки зменшеним потокам розсіювання має опір, який значно менший в порівнянні з традиційними конструкціями трансформаторів. В такому трансформаторі менші втрати напруги, потужності та електроенергії.

6. Основні результати дослідження впроваджено в практичну діяльність ПАТ «Хмельницькобленерго». Виготовлено трифазний трансформатор потужністю 100 кВА напругою 10/0,4 кВ з монолітною магнітною системою і груповий трансформатор потужністю 25 кВА напругою 10/0,4 кВ з просторовою магнітною системою. Такі трансформатори можуть використовуватися для реконструкції мереж 0,4 кВ на основі розукрупнення трансформаторних підстанцій і використання глибоких уводів, що дозволить суттєво зменшити втрати електроенергії під час її передачі. Теоретичні положення, методи та моделі, що визначають наукову новизну дисертації, використовуються в навчальному процесі під час підготовки фахівців за електротехнічними спеціальностями в Хмельницькому національному університеті.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шпак О.Л. Математична модель однофазного трансформатора як групового елемента в електроенергетичній системі / О.Л. Шпак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 4. – С. 34–36.
2. Шпак О.Л. Математична модель трифазного трансформатора як елемента електроенергетичної системи / О.Л. Шпак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 3. – С. 73–77.
3. Шпак О. Л. Аналіз впливу силового трансформатора на усталений режим електричної мережі на основі рівнянь стану в формі Коші [Електронний ресурс] / О. Л. Шпак // Наукові праці ВНТУ. – №4. – 2016 Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/download/541/541>.
4. Ущатовський К.В. Моделювання економічних процесів в електроенергетиці / К. В. Ущатовський, О. Л. Шпак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 3. – С. 39–43.
5. Шпак О.Л. Стратегічне завдання електроенергетики / О.Л. Шпак, К.В. Ущатовський // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 4. – С. 26–31.
6. Шпак О.Л. Ефективність стратегічних напрямків в енергетиці / О.Л. Шпак, К.В. Ущатовський // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 5. – С. 30–37.
7. Shpak O.L. Speeded Search of the Periodic Processes of Dynamical Systems / O.L. Shpak // Праці Одеського політехнічного університету. – 2016. – № 1(48). – С. 54–57. – ISSN 2076-2429.
8. Bilyi L. The Analysis of Electric Machines Electro-Mechanic Processes. / L. Bilyi, O. Shpak // The Advanced Science Journal. – 2014. – №12. – P. 27–40. – DOI: 10.15550/ASJ

9. Bilyi L. Universal Metod of Analysis Models Of Electrical Devices / L. Bilyi, O. Shpak // Study of problems in modern science: new technologies in engineering, advanced management, efficiency of social institutions: monograph ; edited by Shalapko Y. – Bydgoszcz, 2015. – P. 485–506.

10. Білий Л. Універсальний метод аналізу режимів роботи електротехнічних пристроїв / Л. Білий, О. Шпак // Тези доп. Міжнародної наукової конференції «VI Ukrainian-Polish Scientific Dialogues», 21–24 жовтня 2015, Хмельницький–Яремче. – Хмельницький: Хмельницький національний університет, 2015. – С. 111–113.

11. Шпак О. Л. Окремі проблеми та пропозиції по підвищенню енергоефективності та надійності розподільчих електромереж України / О. Л. Шпак // Электрические сети и системы. – 2016. – № 4–5. – С. 12–24.

12. Білий Л.А. Моделювання періодичних процесів динамічних систем / Л.А. Білий, О.Л. Шпак // Технічні вісті. – 2009. – № 1–2. – С. 66–67.

13. Білий Л. Порівняльна характеристика трансформаторів з розгалуженою плоскою і просторовою магнітними системами / Л. Білий, О. Шпак // Новини енергетики. – 2016. – № 6. – С. 16–20.

14. Білий Л.А., Ковівчак Я.В., Шпак О.Л. Патент на винахід №104527. Трифазний трансформатор. – Зареєстровано в державному реєстрі патентів України на винаходи 10.02.2014, бюл. №3, 2014.

АНОТАЦІЯ

Шпак О. Л. Моделювання періодичних електромагнітних процесів в силових трансформаторах електроенергетичних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено розробленню засобів моделювання періодичних електромагнітних процесів в силових трансформаторах як елементах електричних мереж енергосистем. Проаналізовано вплив трансформаторів на техніко-економічні показники електричних мереж та обґрунтована необхідність і можливість його оптимізації шляхом покращання характеристик трансформаторів. Для цього розроблено математичні моделі одно- і трифазного трансформаторів, що ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь, представлених у нормальній формі Коші, і дозволяють на єдиній методологічній базі аналізувати як перехідні, так і усталені процеси. За результатами теоретичних досліджень розроблено алгоритми та програмні засоби, які дозволяють досліджувати шляхи вдосконалення конструкції силових трансформаторів. Запропоновано трансформатор з просторовою магнітною системою, використання якого в електричних мережах дозволяє зменшити в них втрати електроенергії і покращити рівні напруги.

Ключові слова: електроенергетичні системи, силові трансформатори,

просторова магнітна система, системи диференціальних рівнянь в формі Коші, параметрична чутливість, аналіз нормальних та перехідних режимів.

THE ABSTRACT

Shpak O. L. Modelling of periodic electromagnetic processes in power transformer of power systems. – A manuscript.

Dissertation for obtaining Scientific Degree of Candidate of Science (Engineering) on speciality 05.14.02 – Electric power stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2017.

Dissertation research is devoted to the solution of complex problem of enhancing energy efficiency of electric supply systems by means of improvement of power transformers application in electric grids in order to reduce electric energy losses and ameliorate its quality, as well as further develop performance characteristics.

The following scientific results are obtained in the research:

It is shown, that application the theory of electromagnetic circuits in the process of mathematical models of electric engineering devices construction enables to reduce them to normal Cauchy form and this will allow to analyze both transient and steady-state periodic electromagnetic processes in power transformers on a common methodological base.

Analytical presentation of power transformers models in normal Cauchy form makes them universal, that enables to develop the method of assessment of power transformer equipment impact on energy efficiency of electric energy supply and substantiate the construction of power transformers with space magnetic core, their application creates the conditions for energy losses reduction in the process of its transmission and improvement of voltage quality in electric grids.

Development of new objects and study of the existing ones, are connected with the solution of problems, related to the sphere of analysis or synthesis. Efficiency of their solution depends on the methods of sensitivity assessment.

The research further develops the method of assessment of mathematical model of the transformer sensitivity to output data as a result of determination of sensitivity matrix elements from the system of variation equations, analytical solutions of which are presented by the product of two multipliers: first of them is the matrix of transient reaction coefficients of state equation system and the second – exponential curve, that suppresses transient reaction, that enables to unite in a single algorithm all the stages of analysis of electromagnetic devices – calculation of transient and steady-state processes, determination of their static stability.

Practical value of the research is that models, methods and recommendations, suggested in the research, can be applied in organizations, that carry out the research and analysis of electromagnetic processes while formation of electric energy systems development strategy, optimization of the plans of investments in the development of element base of energy systems. In particular, the developments of the given research enable to widen functional possibilities of design offices by means of using separate modules and standard subprograms. Main results of the research are introduced in

practical activity of Public Joint-Stock Company “Khmelnitskoblenergo”, on the base of these results three-phase 100 kVA transformer of 10/0.4 kV with monolithic magnetic system and 25 kVA group transformer of 10/0.4 kV were manufactured.

Theoretical principles, methods and models, determining scientific novelty of the dissertation, are used in educational process for training specialists of electric engineering specialties at Khmelnytsky National University.

Key words: power systems, power transformers, space magnetic system, systems of differential equations in Cauchy form, parametric sensitivity, analysis of normal and transient modes.

АННОТАЦИЯ

Шпак А. Л. Моделирование периодических электромагнитных процессов в силовых трансформаторах электроэнергетических систем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2017.

Диссертационная работа посвящена разработке средств моделирования периодических электромагнитных процессов в силовых трансформаторах как элементах электрических сетей энергосистем. Проанализировано влияние трансформаторов на технико-экономические показатели электрических сетей и обоснована необходимость и возможность его оптимизации путем улучшения характеристик трансформаторов. Для этого разработаны математические модели одно- и трехфазного трансформаторов, основанные на системе дифференциальных уравнений, представленных в нормальной форме Коши, и позволяют на единой методологической базе анализировать как переходные, так и устоявшиеся процессы. По результатам теоретических исследований разработаны алгоритмы и программные средства, которые позволяют исследовать пути совершенствования конструкции силовых трансформаторов. Предложено трансформатор с пространственной магнитной системой, использование которого в электрических сетях позволяет уменьшить в них потери электроэнергии и улучшить уровне напряжения.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, силовые трансформаторы, пространственная магнитная система, системы дифференциальных уравнений в форме Коши, параметрическая чувствительность, анализ нормальных и переходных режимов.

Підписано до друку 25. 09. 2017 р. Формат 29.7×42¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2017 – ____.
Віддруковано в інформаційному редакційно – видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.:59-87-38
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р