

Хмельницький національний університет
Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шпак Олександр Леонідович

УДК 621.316:621.314.2.001

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання чужих
ідей, результатів і текстів мають посилання на відповідне джерело


(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник
Білий Леонід Адамович
доктор технічних наук, професор

Хмельницький – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	21
1.1 Силіві трансформатори як елементи електричних мереж енергосистеми	21
1.2 Аналіз методів моделювання і розрахунку періодичних процесів електромагнітних пристроїв	28
1.3 Постановка задач на дослідження	40
1.4 Висновки до розділу 1	45
РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЯК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	48
2.1 Рівняння електромагнітних кіл	49
2.2 Побудова математичних моделей трансформаторів.....	59
2.2.1 Представлення моделі трансформатора змішаною системою алгебро- диференціальних рівнянь.....	59
2.2.2 Модель трансформатора, змінні диференціальних рівнянь якої – це потокозчеплення.....	62
2.2.3 Модель трансформатора, змінні диференціальних рівнянь якої – це струми	64
2.2.4 Модель трансформатора з коефіцієнтами диференціальних рівнянь – само- і взаємоіндуктивностями.....	66
2.3 Моделювання одно- і трифазних трансформаторів	69
2.3.1 Однофазні трансформатори та їх параметри	69
2.3.2 Математична модель однофазного трансформатора.....	73
2.3.3 Математична модель трифазного трансформатора.....	81
2.4 Висновки до розділу 2	93
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ.....	94

3.1 Двоточкова крайова задача для систем звичайних диференціальних рівнянь	94
3.2. Модель чутливості до початкових умов	96
3.3. Модель чутливості до початкових умов однофазного трансформатора	99
3.4 Алгоритм обчислень перехідних та усталених процесів на основі моделі чутливості до початкових умов	106
3.5 Розрахунок параметричної чутливості методом побудови моделі чутливості	108
3.6 Розрахунок статичної стійкості періодичних розв'язків	112
3.7 Висновки до розділу 3	115
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИЛОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	
4.1 Аналіз результатів математичного моделювання електромагнітних процесів в однофазних трансформаторах	117
4.2 Аналіз результатів математичного моделювання електромагнітних процесів трифазних трансформаторів	121
4.3 Оцінювання параметричної чутливості та обґрунтування просторової магнітної системи силового трансформатора	130
4.4 Аналіз впливу силового трансформатора з просторовою магнітною системою на параметри усталеного режиму електричної мережі в умовах переходу до електроопалення	142
4.5 Висновки до розділу 4	144
ВИСНОВКИ	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147
ДОДАТКИ	
Додаток А – Довідки про впровадження результатів	157
Додаток Б – Фотографії трансформатора з просторовою магнітною системою	159
Додаток В – Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	166

ВСТУП

Актуальність теми. Силові трансформатори є одними з найбільш важливих і складних елементів електроенергетичної системи (ЕЕС). Вони 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 елементами 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. Важливою задачею аналізу є дослідження статичної стійкості електромагнітних пристроїв. 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. Перехід від одного усталеного режиму до іншого відбувається через перехідний процес. Номінальні режими роботи більшості електромагнітних пристроїв, до яких відносяться трансформатори, є періодичними або стаціонарними, тобто їх координати (струми, напруги, потокозчеплення тощо) є періодичними функціями часу.

Аналіз усталених 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 коефіцієнтів – 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 та визначення статичної стійкості.

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 кондиціювання 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 та завдання 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.

Відповідно до мети були поставлені такі 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 трансформаторах 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.

– 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 (див. Додаток А). 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 (див. Додаток А).

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: [1] – запропоновано застосування моделювання на основі стандарту BPMN (Businnes Process Modeling Notation); [2] – досліджено сучасні ринкові умови функціонування електроенергетичних підприємств, запропоновані підходи, які дозволять підвищити якість послуг при одночасному зниженні витрат в процесі передачі і розподілу електроенергії; [3] – проведено дослідження проблемних ділянок процесу реалізації електроенергії виробничої дільниці; [4] – 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; [5] – вдосконалено метод аналізу впливу електротехнічних пристроїв на якість електропостачання; [6] – запропоновано метод аналізу перехідних та усталених режимів силових трансформаторів, які описуються диференціальними рівняннями стану в формі Коші; [7] – розроблено метод побудови моделі чутливості до початкових умов, що суттєво спрощує аналіз і знімає обмеження на складність системи; [8] – обґрунтовано переваги трансформаторів з просторовою магнітною системою над трансформаторами з плоскою магнітною системою в різних режимах роботи; [9] – розроблено модульну конструкцію трансформатора з просторовою магнітною системою, яка дозволяє утворити трифазний трансформатор трьома способами.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1] – [9], [84], [85],

[94], [103], 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. Фраскати, 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 та обсяг дисертації. 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] К. В. Ущাপовський, та О. Л. Шпак, "Моделювання економічних процесів в електроенергетиці", *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, № 3, с. 39-43, 2013.
- [2] О. Л. Шпак, та К. В. Ущাপовський, "Стратегічне завдання електроенергетики", *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, № 4, с. 26-31, 2013.
- [3] О. Л. Шпак, та К. В. Ущাপовський, "Ефективність стратегічних напрямків в енергетиці", *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, № 5, с. 30-37, 2013.
- [4] L. Bilyi, and O. Shpak, "The Analysis of Electric Machines Electro-Mechanic Processes", *The Advanced Science Journal*, №12, pp. 27-40, 2014.
DOI: 10.15550/ASJ
- [5] L. Bilyi, and O. Shpak, "Universal Metod of Analysis Models Of Electrical Devices", in *Study of problems in modern science: new technologies in engineering, advanced management, efficiency of social institutions*, Y. Shalapko, Bydgoszcz, 2015, pp. 485-506.
- [6] Л. Білий, та О. Шпак, "Універсальний метод аналізу режимів роботи електротехнічних пристроїв", на *Міжн. наук. конф. «VI Ukrainian-Polish Scientific Dialogues»*, Хмельницький–Яремче, 2015, с. 111-113.
- [7] Л. А. Білий, та О. Л. Шпак, "Моделювання періодичних процесів динамічних систем", *Технічні вісті*, № 1-2 (29-30), с. 66-67, 2009.
- [8] Л. Білий, та О. Шпак, "Порівняльна характеристика трансформаторів з розгалуженою плоскою і просторовою магнітними системами", *Новини енергетики*, № 6, с. 16-20, 2016.
- [9] Л. А. Білий, Я. В. Ковівчак, та О. Л. Шпак, "Трифазний трансформатор", МПК6 Н 01 F 27/06, Н 01F 30/12, №104527, № а201213993, Лют. 10, 2014.

- [10] Ю.С. Железко, *Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов*. Москва: Энергоатомиздат, 1989.
- [11] Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, и О. В. Савченко, *Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях*. Москва: ЭНАС, 2008.
- [12] ГНД 34.09.204-2004: Зат. Міністерством палива та енергетики України 09.06.2004: Термін дії встановлений з 09.06.2004 до 09.06.2009. *Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження*, Київ, 2004.
- [13] С.Д. Лизунов, и А.К. Лоханин, *Силовые трансформаторы. Справочная книга*. Москва: Энергоиздат, 2004.
- [14] R. Baehr *Transformer technology state-of-the art and trends of future development*. Electra, №198, 2001.
- [15] А. С. Шмелев, И. А. Пайков, и Л. Н. Булатов, "Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечноэлементного моделирования магнитного поля", *Вестник ИГЭУ*, Вып. 1, с. 55-61, 2014.
- [16] В. Ф. Иванков, "Расчет магнитного поля, потерь в баках трансформаторов и электрических реакторов", *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць*, № 1 (10), с. 91-104, 2005.
- [17] Ya. I. Furman, V.L. Bereza, V.F. Ivankov, and L.P. Nizhnik, "Losses in tanks of large power transformers, caused by magnetic field and method of their reduction", *International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE)*, Report 12 – 07. – 1988 Session (Paris, 28 th August – 3 rd September). – 1988.
- [18] B. Ionescu, "Multiphysics-based simulation reduces transformer size, cost and noise", *ANSYS Advantage*, Vol. Y, Issue 3, pp. 30-33, 2011.

- [19] В. Ф. Иванков, А. В. Басова, и Н. В. Шульга, "Электротепловые расчетные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования", *Електротехніка та електроенергетика*, № 2, с. 41-53. 2014.
- [20] ГОСТ 11920-85. *Трансформаторы силовые масляные общего назначения напряжением до 35 кВ включительно. Технические условия*, Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985.
- [21] О. В. Кириленко, *Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими*, Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016.
- [22] Б. С. Стогний, и др., *Интегрированные экспертные системы диагностирования в электроэнергетике*, Киев: Наук. думка, 1992. ISBN 5-1200-2012-7.
- [23] П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, та І. А. Жук, "Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин", *Вісник ВПІ*, № 1, с. 43-51, 2005.
- [24] Б. С. Стогний, М. Ф. Сопель, и Ю. В. Пилипенко, "Мониторинг электроэнергетических объектов и режимов работы электроэнергетических систем", *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць*, Вип. 26, с. 53-56, 2010.
- [25] С. П. Денисюк, М.Ф. Сопель, Ю. В. Пилипенко, та І. В. Притискач, "Розробка системи онлайн моніторингу стану силових трансформаторів", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, №24, с. 102-113, 2014.
- [26] О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, та Т. А. Мазур, *Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник*, Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2010.
- [27] В. С. Перхач, Т. М. Шелепетень, В. І. Горячко, "Квазіеталонна математична та цифрова модель автотрансформатора як елемента електропересильні надвисокої напруги", *Вісн. держ. ун-ту "Львівська політехніка" Електроенергетичні та електромеханічні системи*, Вип.

372, с. 154-158, 1999.

- [28] М. С. Сегеда, Є. В. Черемних, Т. А. Мазур, та О. М. Курилишин, *Математичне моделювання електромагнетних процесів у трансформаторах з урахуванням розподіленості параметрів: монографія*, Львів: Видавництво НУ «Львівської політехніка, 2016.
- [29] Th.Aschwanden, et al., *Development and application of new condition assessment methods for powerr transformers*, Сессия CIGRE-98, доклад № 12-07.
- [30] А. А. Дробышевский, А. Н. Панибратец, "Диагностика механического состояния обмоток трансформаторов в эксплуатации" на IX Симпозиуме "Электротехника 2030", доклад 4.20, 2007.
- [31] М. П. Костенко, и Л. М. Пиотровский *Электрические машины : ч. 1*, Ленинград: Энергия, 1973.
- [32] Б. Адкинс, *Общая теория электрических машин*, Москва: Госэнергоиздат, 1960.
- [33] Г. Кенг, и В. Блекуэлл, *Теория электромеханических систем*, Ленинград: Энергия, 1965.
- [34] И. П. Копылов, *Электромеханические преобразователи энергии*, Москва: Энергия, 1973.
- [35] И. М. Постников, *Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин*, Москва: Высшая школа, 1975.
- [36] В. И. Мишин, Е. И. Забудский, и И. В. Собор, *Трехфазные управляемые реакторы*, Кишинев: Штиинца, 1977.
- [37] И. И. Пеккер, А. Г. Никитенко, *Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах*, Ленинград: Энергия, 1967.
- [38] Л. И. Глухивский, "Расчет на ЭЦВМ режимов работы насыщенных синхронных машин", *Изв. вузов. Электромеханика*, № 4, с. 14-18, 1970.
- [39] А. В. Иванов-Смоленский, *Электрические машины*, Москва: Энергия, 1980.

- [40] Є. О. Онишко, Р. В. Фільц, та Л. А. Білий, "Визначення диференційних індуктивностей статичних нелінійних електромагнітних пристроїв", *Вісник Львівського політехн. ін-ту*, № 61, с. 95-104, 1972.
- [41] Р. В. Фільц, *Математические основы теории электромеханических преобразователей*, Київ: Наукова думка, 1979.
- [42] П. М. Тихомиров, *Расчет трансформаторов*, Москва: Энергия, 1968.
- [43] А. И. Долгинов, А. И. Ступель, и Л. С. Левина, "Алгоритм и программа расчета на ЦВМ электромагнитных переходных процессов в электрических системах", *Электричество*, № 8, с. 23-29, 1966.
- [44] А. Г. Крайз, "Некоторые эксплуатационные характеристики силовых трансформаторов с расщепленными обмотками", *Электрические станции*, № 6, с. 48-52, 1966.
- [45] В. А. Бошняга, и О. В. Гримальский, "Несимметричные режимы работы фазорегулирующего трансформатора", *Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт*, № 2, с. 66-72, 1989.
- [46] К. М. Фаттахов, "Об уравнениях трансформатора и асинхронной машины", *Электричество*, № 2, с. 32-36, 1995.
- [47] Л. И. Глухивский, Р. В. Фільц, О. Д. Ратыч, и Б. И. Козий, "Расчет на ЦВМ установившихся режимов работы насыщенных неявнополюсных машин переменного тока итерационным методом Ньютона", *Изв. вузов. Электромеханика*, № 1, с. 21-27, 1974.
- [48] В. С. Перхач, и др., "Уравнения электромагнитного состояния трансформатора с насыщенным магнитопроводом и их решение", *Теоретическая электроника : республ. межвед. науч.-теор. сб.*, Львов: Вища школа, Вып. 17, с. 60–67, 1974.
- [49] Р. В. Фільц, О. В. Семчишин, "Сеточная модель периодических процессов обобщенного статического", *Изв. вузов. Электромеханика*, № 1, с. 33–39, 1987.
- [50] В. И. Чабан, "К анализу электрических цепей с разветвленными

магнітопроводами", *Изв. вузов. Энергетика*, № 1, с. 129-132, 1976.

- [51] Л. А. Бессонов, *Теоретические основы электротехники*, Москва: Высшая школа, 1970.
- [52] Л. Р. Нейман, и К. С. Демирчян, *Теоретические основы электротехники: в 2 т. Т. 1*, Ленинград: Энергоиздат, 1981.
- [53] Б. К. Буль, Г. В. Буткевич, и А. Г. Годжелло, *Основы теории электрических аппаратов*, Москва: Высшая школа, 1970.
- [54] Е. В. Кононенко, Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков, *Электрические машины: спецвыпуск*, Москва: Высшая школа, 1975.
- [55] Ю. А. Митропольский, *Метод усреднения в нелинейной механике*, Киев: Наукова думка, 1971.
- [56] Л. И. Глухивский, "Основные положения дифференциального гармонического метода расчета периодических процессов в нелинейных цепях", *Электричество*, № 11, с. 17-22, 1978.
- [57] Л. И. Глухивский, "Расчет периодических процессов в нелинейных симметричных многофазных цепях", *Электричество*, № 2, с. 52-55, 1984.
- [58] Л. И. Глухивский, *Расчет периодических процессов электротехнических устройств*, Москва: Высшая школа, 1984.
- [59] Е. Л. Львов, "Гармонический баланс с учетом произвольного числа высших нечетных гармоник", *Электричество*, № 2, с. 32-37, 1982.
- [60] Е. П. Попов, *Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления*, Москва: Наука, 1979.
- [61] R. Lehmann, and H. Peitzch, "Grund lagen zur harmonischen linearisierung bei der berechnung stationärer schwingungszuständen", *Elektrik*, Vol. 35, № 11, pp. 576-579, 1981.
- [62] Г. Е. Пухов, *Методы анализа и синтеза квазианалоговых электронных цепей*, Киев: Наукова думка, 1967.
- [63] Л. А. Билый, и Р. В. Фильц, "Применение сеточного метода для расчета

- феррорезонансных характеристик", *Теоретическая электротехника*, Вып. 22, с. 141-146, 1977.
- [64] А. И. Петренко, и Н. М. Гумен, "Метод расчета периодических процессов в нелинейных системах, основанный на ε -алгоритме", *Электронное моделирование*, № 2, с. 40-42, 1980.
- [65] S. Skelboe, "Computing of the Periodic Steady – State Response of Non Linear Networks by Extrapolation Methods", *IEEE Trans. Circuits Syst*, Vol. CAS-27, pp. 161-175, 1980.
- [66] Т. Ейприлл, и Т. Трик, "Анализ стационарного режима нелинейных цепей с периодическими входными сигналами", *Автоматизация в проектировании*, Москва: Мир, с. 148-155, 1972.
- [67] В. М. Бондаренко, *Методы и алгоритмы анализа статических и динамических режимов нелинейных цепей*, Киев: Препринт / АН УССР и Институт электродинамики, № 66, 1974.
- [68] В. М. Бондаренко, И. И. Нерасымив, и Б. А. Мандзий, *Анализ точности и качественного соответствия дискретных моделей электрических цепей*, Киев: Препринт / НАН Украины. Ин-т электродинамики, № 307, 1983.
- [69] В. М. Бондаренко, С. Т. Абидов, и В. К. Калиев, *Дискретные модели нелинейных трансформаторов и их программная реализация на ЭВМ*, Киев: Препринт / АН УССР и Институт электродинамики, № 518, 1987.
- [70] Л. А. Білий, "Алгоритм прискореного пошуку електромеханічних режимів, побудований на поєднанні методів теорії кіл і електромагнітного поля", *Технічні вісті*, № 2 (9), с. 87-88, 1999.
- [71] Л. А. Білий, "Аналіз стаціонарних режимів нелінійних кіл при невідомому періоді реакцій", *Технічні вісті*, № 1 (12), с. 52-53, 2001.
- [72] Л. А. Білий, "Матричний аспект аналізу періодичних процесів методом прискореного пошуку", *Технічні вісті*, № 2 (13), с. 60-62, 2001.
- [73] Л. А. Білий, "Методи розрахунку феррорезонансних характеристик",

Технічні вісті, № 1 (6), с. 66-67, 1998.

- [74] В. И. Чабан, "К расчету несимметричных периодических режимов трансформаторов с насыщенными магнітопроводами", *Изв. вузов. Энергетика*, № 2, с. 40-42, 1983.
- [75] В. И. Чабан, *Методы анализа электромеханических систем*, Львов: Вища школа, 1985.
- [76] В. И. Чабан, *Основы теории переходных процессов электромашиных систем*, Львов: Вища школа, 1980.
- [77] В. И. Чабан, и Л. А. Билый "Ускоренный поиск вынужденных периодических режимов глубокопазных асинхронных двигателей", *Техническая электродинамика*, № 6, с. 73-78, 1990.
- [78] Б. В. Циганенко, "Впровадження електричних мереж напругою 20 кВ в енергосистемі України", *Енергетика і електрифікація*, №8, с. 3-5, 2015.
- [79] С. Я. Меженний, "План розвитку розподільних електричних мереж на 2016–2025 роки", *Електрические сети и системы*, №4–5, с. 4-8 2016.
- [80] О. Л. Шпак, "Окремі проблеми та пропозиції по підвищенню енергоефективності та надійності розподільчих електромереж України", *Електрические сети и системы*, №4–5, с. 12-24, 2016.
- [81] А. И. Вольдек, *Электрические машины*, Москва: Энергия, 1974.
- [82] А. И. Важнов, *Электрические машины*, Москва: Энергия, 1969.
- [83] А. В. Иванов-Смоленский, *Электрические машины*, Москва: Энергия, 1980.
- [84] О. Л. Шпак, "Математична модель однофазного трансформатора як групового елемента в електроенергетичній системі", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 4, с. 34-36, 2015.
- [85] О. Л. Шпак, "Математична модель трифазного трансформатора як елемента електроенергетичної системи", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 73-77, 2016.

ISSN 1997-9266.

- [86] И. Бабушка, и С. Л. Соболев, "Оптимизация численных методов", *Aplikace Matematiky*, Vol. 10. No. 2, с. 96-130, 1965. [Электронный ресурс]. Доступно: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/102941/AplMat_10-1965-2_4.pdf
- [87] И. Бабушка, Э. Витасек, и М. Прагер, *Численные процессы решения дифференциальных уравнений*, Москва: Мир, 1969.
- [88] Н. С. Бахвалов, "Об оптимальных методах решения задач", *Aplikace Matematiky*, Vol. 13. No. 1, с. 27-38, 1968. [Электронный ресурс] Доступно : http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/103136/AplMat_13-1968-1_3.pdf
- [89] Л. Коллатц, *Функциональный анализ и вычислительная математика*, Москва: Мир, 1969.
- [90] С. Г. Михлин, и Х. Л. Смолицкий, *Приближенные методы решения дифференциальных уравнений*, Москва: Наука, 1966.
- [91] Дж. Холл, и Дж. Уатт, *Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений*, Москва: Мир, 1979.
- [92] R. Bellman, "Stability Theory of Differential Equations", *New York: McGraw-Hill*, pp. 65-68, 1953.
- [93] D. Young, "Iterative Methods of Solving Partial Differential Equations of Elliptic Type", *Trans. Amer. Math.*, 76, – pp. 92-111, 1964.
- [94] O. L. Shpak, "Speeded Search of the Periodic Processes of Dynamical Systems", *Праці Одеського політехнічного університету*, № 1(48), с. 54-57, 2016. ISSN 2076-2429.
- [95] M. N. Abdel-Hamid, and M. O. Khalil, "Improved Generalized Method for Simulation of Deep-bars of Cage Rotors", *ETZ-A*, B.96, H8, pp.128-134, 1975.
- [96] Л. А. Білий, "Моделювання і дослідження нелінійних систем на основі загальної теорії диференціальних рівнянь", *Технічні вісті*, № 1-2 (31-32),

с. 83-85, 2010.

- [97] С. Директор, и Р. Рорер, *Введение в теорию систем*, Москва: Мир, 1984.
- [98] А. А. Чунихин, *Электрические аппараты*, Москва: Энергия, 1967.
- [99] В. И. Чабан, и Л. А. Билый, "К расчету периодических режимов электроэнергетических устройств", *Техническая электродинамика*, № 1, с. 73-77, 1982.
- [100] В. И. Чабан, и В. В. Самогий, "Ускоренный поиск периодических режимов трехфазных трансформаторов", *Электрические сети и системы*, Вып. 22, с. 110-115. 1986.
- [101] В. В. Самогий, У. Ю. Дзелендзяк, та А. Г. Павельчак, *Моделювання процесів та елементів систем керування: конспект лекцій*, Львів, 2008.
- [102] С. В. Васютинский, *Вопросы теории и расчета трансформаторов*, Ленинград: «Энергия», 1970.
- [103] О. Л. Шпак, "Аналіз впливу силового трансформатора на усталений режим електричної мережі на основі рівнянь стану в формі Коші", *Наукові праці ВНТУ*, №4, 2016. [Електронний ресурс].
Доступно:
<http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/download/541/541>.
- [104] Ю. С. Черкашин, "Расчет трансформаторов при произвольных законах изменения напряжения и тока", *Силовая электроника*, № 2, с. 26-30, 2009.
- [105] Л. А. Білий, Я. В. Ковівчак, В. П. Чернишук, та В. В. Арсенюк, "Трифазний трансформатор", МПК7 Н 01 F 27/00, Н 01 F 33/00, № 87310, № а200612633, Лип. 10, 2009.