

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Гоголюк Оксани Петрівни "Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на основі макромодельовання", подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Важливим напрямом досліджень теоретичної електротехніки є розвиток й удосконалення методів аналізу режимів і процесів нелінійних динамічних електромагнітних кіл електротехнічних систем (ЕТС), спрямованих на покращення їх властивостей і надійності функціонування.

Вирішення теоретичних і прикладних проблем покращення якості функціонуванням ЕТС потребує інтенсифікації наукових досліджень, спрямованих на розроблення методів і засобів аналізу статичних характеристик і динамічних режимів ЕТС, які за необхідності врахування параметричних властивостей і структури їх елементів описуються системами скінчено-диференціальних рівнянь високого порядку. Проблема забезпечення адекватності результатів комп'ютерного моделювання таких систем рівнянь потребує детального опису фізичних процесів, що істотно збільшує тривалість їх аналізу. Отже, існує протиріччя між точністю результатів математичного моделювання і швидкодією розроблених комп'ютерних програм. У зв'язку з цим, комп'ютерне моделювання режимів і процесів ЕТС, за умови детального опису процесів, не може забезпечити необхідну швидкодію моделі складних систем, яка необхідна для формування керуючих впливів у темпі перебігу процесів, що є необхідною умовою забезпечення ефективності оперативного керування режимами ЕТС.

Відсутність єдиного теоретичного підходу для аналізу динамічних режимів і процесів складних ЕТС ускладнює і сповільнює процес розвитку ефективних засобів їх математичного моделювання. Отже, тема дисертації, що присвячена вирішенню проблеми розвитку теорії та методів аналізу режимів і процесів нелінійних динамічних електричних кіл з урахуванням їхніх схемних, режимних і параметричних особливостей є актуальною.

2. Ступінь обґрунтованості і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

Наукові засади, висновки і рекомендації дисертації, їх достовірність і наукова новизна обґрунтовані з використанням сучасних методів теорії нелінійних динамічних електромагнітних кіл, дискретної математики, теорії оптимізації, методів і засобів математичного моделювання, ідентифікації та макромодельовання. Достовірність отриманих результатів досліджень підтверджена збіжністю з результатами розрахунків на тестових математичних моделях і макромоделях та результатами математичних експериментів на

створених моделях і вимірювань, виконаних на конкретних енергетичних об'єктах України (ПАТ ЕК "Вінницяобленерго" і РДЦ Західного регіону).

Висновки дисертації є науково обґрунтованими, логічно завершеними та впливають з її змісту.

3. Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

1. Отримала подальший розвиток теорія та методи побудови математичних моделей елементів електричних кіл і систем у цілому на основі макромодельовання й діакоптики, що дає змогу суттєво пришвидшити розрахунок складних електротехнічних систем;
2. Удосконалено метод побудови дискретних макромоделей у вигляді "чорної скриньки" з використанням змінних стану, що дало змогу вперше створити адекватні математичні моделі як окремих електричних кіл, так і елементів електротехнічних систем із збереженням обсягу інформації, необхідної для аналізу їх динамічних режимів.
3. Розроблено методи адаптації дискретних макромоделей у вигляді "чорної скриньки" до сучасних програмних середовищ, що забезпечує можливість аналізу динамічних режимів складних електротехнічних систем з використанням дискретних макромоделей у складі комп'ютерних середовищ MATLAB/Simulink і АТР/ЕМТР.
4. Уперше розроблено математичні методи дискретного макромодельовання для побудови моделей прогнозування енергоспоживання об'єктів без рутинного опрацювання апріорної інформації. Це дало змогу здійснити прогнозування як коротко-, так і довготривалого енергоспоживання енергооб'єктів України, що в цілому сприяє підвищенню ефективності енерговикористання.

4. Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

Методи макромодельовання доцільно використати для побудови математичних моделей і макромоделей ЕТС з використанням експертного аналізу й удосконаленої методики формування апріорної інформації, отриманої за допомогою сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів.

Розроблено способи формування дискретних макромоделей у середовищі Simulink доцільно використати для створення власних бібліотек макромоделей елементів у середовищах MATLAB/Simulink і АТР, з метою прогнозування динамічних режимів конкретних ЕТС на реальних енергетичних об'єктах України.

Створені макромоделі окремих елементів підстанції та додаткові модулі програмного забезпечення для дослідження перехідних процесів елементів ЕТС на підставі розроблених математичних моделей і макромоделей можуть бути використані в енергетичних компаніях для розрахунку динамічних режимів і перехідних процесів з метою перевірки умов функціонування основного електроустаткування, передбачення й аналізу аварійних ситуацій.

Запропоновані теоретичні засади побудови математичних моделей електротехнічних систем у цілому та їхніх елементів із використанням макромоделювання й експертного аналізу доцільно використовувати під час викладання дослідницьких дисциплін у вищих закладах освіти України. Отримані результати можна використовувати в науково-дослідних установах, відділах і конструкторських бюро промислових підприємств відповідного спрямування для аналізу режимів і процесів електротехнічних систем. Запропонований спосіб прогнозування споживання електроенергії може використовуватись для оцінювання обсягів споживання електроенергії в енергетичних компаніях України.

Розроблені моделі ЕТС з макромоделями у своїй структурі отримали практичне впровадження, а саме математична модель ЕТС у вигляді “джерело живлення-лінія електропередавання-навантаження” використана у дослідженнях режимів ПАТ ЕК “Вінницяобленерго”, а макромоделювання прогнозування енергоспоживання у практичній роботі РДЦ Західного регіону.

5. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях.

Основні результати дисертації опубліковано в 47 друкованих працях: одній монографії, 46 статтях, 14 з яких у наукових фахових виданнях України, в тому числі 2 статті у виданнях, що включені до науково-метричної бази (НМБ) даних Scopus; 7 у наукових періодичних виданнях, що входять до НМБ Scopus, 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави; 1 стаття в періодичному виданні України, 23 у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій, з яких 9 у виданнях, що включені до НМБ Scopus; 3 праці опубліковані одноосібно.

Зміст автореферату в повній мірі відображає зміст дисертації: викладено основні наукові засади, отримані результати, висновки та рекомендації.

6. Аналіз змісту дисертації.

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг дисертації становить 318 сторінок, з яких 274 сторінки основного тексту, 52 рисунки, 9 таблиць, 294 найменувань використаних джерел і 2 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, відображений зв'язок роботи з науковими програмами та напрямами НДР, сформульовано мету й задачі досліджень, наукову новизну результатів і їхнє практичне значення, відображена інформація про апробацію результатів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз неперервних й дискретних математичних моделей і макромоделей елементів електротехнічних систем з метою обґрунтування вибору адекватних і ефективних математичних методів у напрямі практичної реалізації поставлених у дисертаційній роботі задач.

Обґрунтовано переваги застосування дискретних макромоделей для оперативного аналізу динамічних режимів і процесів ЕТС, а саме:

- проста структура моделі в якій усунута необхідність детального розгляду внутрішньої будови модельованого об'єкту;
- придатність для моделювання об'єктів довільної фізичної природи моделі яких не можна замінити простими;
- можливість суттєвого зменшення вимірності моделі, що є суттєвим під час моделювання складних об'єктів у реальному часі;
- макромоделі окремих елементів ЕТС забезпечують можливість їх композиції в математичну макромодель системи в формі діакоптики чи у вигляді рівнянь зв'язку на основі законів Кірхгофа.

Сукупність перелічених задач є основою нового спрямування наукових і прикладних досліджень у сфері теоретичної електротехніки, на вирішення яких спрямована дисертаційна робота.

У другому розділі викладені методи побудови макромоделей динамічних систем, детально описано алгоритм побудови лінійних неперервних макромоделей на основі частотних і часових характеристик. Для побудови дискретних макромоделей ЕТС обґрунтовано доцільність використання алгоритму Хо-Калмана на основі часових характеристик.

Запропоновано використання оптимізаційного підходу до ідентифікації параметрів макромоделі. Основною проблемою, яка виникає під час побудови макромоделей елементів електричних кіл і ЕТС є значна розмірність оптимізаційної задачі, що зумовлює як труднощі вибору оптимізаційного алгоритму, так і збільшення часових витрат на його реалізацію. Удосконалено спосіб створення математичних моделей електричних кіл складних ЕТС шляхом побудови макромоделей їх елементів у вигляді “чорної скриньки” на основі експертного аналізу та розбиття побудови макромоделі на п'ять етапів. В якості ефективних підходів для розв'язання оптимізаційних задач під час створення макромоделей запропоновано використання стохастичних методів оптимізації, а саме: алгоритмів з парною пробою чи перерахунком, випадкового спуску, хаотичного пошуку зі змінним законом розподілу, напрямної сфери та напрямного конуса Растрігіна.

У третьому розділі розглянуто проблеми інтеграції математичних моделей і макромоделей елементів електричних кіл і ЕТС у сучасні програмні засоби розрахунку динамічних режимів. Здійснено аналіз властивостей моделей елементів електричних кіл і ЕТС (джерел живлення, ліній електропересилання, трансформаторів і вузлів навантаження). Показано складність побудови еквівалентних математичних моделей ЕТС і доцільність застосування макромодельовання з подальшою адаптацією до наявних програмних засобів.

На основі аналізу сучасних програмних засобів до яких доцільно адаптовувати математичні макромоделі в формі змінних стану, обґрунтовано вибір середовища MATLAB/Simulink – стандарту математичного моделювання і програму АТР як засобу інженерних розрахунків.

Четвертий розділ присвячений проблемі відбору й оброблення апріорної інформації, необхідної для побудови моделей у вигляді "білої" та "сірої" скриньок, а також математичних макромodelей у вигляді "чорної скриньки" в формі рівнянь стану. Сформульовано основні вимоги до інформації й обмеження, які накладаються на неї. Форма представлення інформації повинна враховувати порядок моделі; розмірність вектора змінних стану; кількість попередніх дискретних даних, які використовуються під час розрахунку наступної дискрети.

Розглянуто особливості застосування й основні властивості апаратно-програмних комплексів для отримання інформації з метою підготовки апріорних даних, що уможлиблює вибір масивів експериментальних даних з метою побудови макромodelей ЕТС і їхніх елементів. Описано методи експертного аналізу, види отримуваної інформації на його основі й аспекти їх застосування з погляду побудови макромodelей елементів ЕТС. Застосування експертного аналізу дає змогу на підставі якісного оцінювання наявної інформації сформулювати та вирішити задачу побудови адекватної математичної моделі.

Запропоновано застосовувати експертний аналіз як діагностичний засіб для визначення структури макромodelі на основі відомої про об'єкт апріорної інформації. Сформульовано пряму задачу експертного аналізу, суть якої полягає у визначенні форми та виду макромodelі. Показано можливість розв'язання оберненої задачі – визначення виду та структури досліджуваного об'єкту за формою макромodelі та числовими значеннями її коефіцієнтів.

Запропоновано рекомендації щодо аналізу даних, отриманих під час аварійних режимів і перехідних процесів для побудови дискретних нелінійних макромodelей у вигляді "чорної скриньки" в формі змінних стану.

У п'ятому розділі запропоновано процедуру та наведено результати практичної побудови дискретних макромodelей конкретних елементів і ЕТС як з розподіленими, так і зосередженими параметрами на основі розробленого алгоритму їхньої ідентифікації.

Як тестовий взірець вибрано елемент з розподіленими параметрами (лінія електропересилання) й об'єкт ЕТС (підстанція). Лінія електропересилання є складним об'єктом з погляду моделювання її процесів. Це зумовлено труднощами визначення параметрів лінії, необхідних для побудови її деталізованої моделі.

Побудова дискретної макромodelі лінії електропересилання здійснена на основі перехідних характеристик, отриманих шляхом комп'ютерного експерименту під час симулювання процесів за допомогою математичної моделі однофазної лінії електропересилання, створеної в методі біжучих хвиль. Практична побудова макромodelі виконана на основі оптимізаційного підходу за допомогою напрямного конуса Растрігіна з адаптацією параметрів пошуку. Верифікацію отриманих результатів здійснено шляхом порівняння результатів моделювання лінії електропересилання у методі біжучих хвиль і її макромodelі.

Наведено результати побудови макромоделі підстанції за принципом "чорної скриньки" для енергоострова "Бурштин-Альбертірша".

Шостий розділ присвячено аналізу динамічних режимів ЕТС на основі розроблених макромоделей шляхом їх адаптації в сучасні програмні засоби. Запропоновано способи адаптації дискретних макромоделей у формі змінних стану до двох програмних середовищ: MATLAB/Simulink, як стандарту академічних розрахунків, і програми ATP, як засобу інженерних розрахунків ЕТС.

У середовищі Simulink дискретну макромодель запропоновано створити шляхом програмування математичних виразів з використанням Simulink-функції (S-functions). Осцилограми перехідних процесів, отримані за допомогою дискретної макромоделі з використанням S-функцій, порівнювались з осцилограмами перехідних процесів, отриманих на моделі, реалізованої в методі біжучих хвиль. Порівняння осцилограм показало високу адекватність результатів моделювання.

Макромодельовання як спосіб дослідження динамічних режимів електричних кіл був реалізований також у програмі ATP, яка надає можливість самостійного створення бібліотеки моделей елементів ЕТС чи моделей таких підсистем шляхом вирішення задач, сформульованих користувачем з використанням технології User Specified Problem (USP) та мови програмування MODELS.

У **сьомому розділі** розглянуто задачу використання методів макромодельовання для прогнозування енергоспоживання з використанням дискретних автономних макромоделей у вигляді "чорної скриньки". Таке моделювання здійснено на основі аналізу зареєстрованих графіків споживання електроенергії та його взаємозв'язку зі структурою досліджуваного об'єкту шляхом розв'язання однорідних диференціальних чи різницевих рівнянь процесу енергоспоживання.

Виявлено перевагу побудови дискретних макромоделей прогнозування енергоспоживання для створення математичних моделей, призначених для прогнозів короткотермінового енергоспоживання, оскільки вони не потребують статистичного накопичування даних протягом тривалого періоду. Для перевірки запропонованого підходу побудовано макромодель добового енергоспоживання ПС-Яворів 330 кВ і довгострокового енергоспоживання ПАТ "Київенерго".

На основі дискретного макромодельовання запропоновано метод прогнозування часових характеристик об'єктів електроенергетичної системи, що дозволило вперше розробити макромоделі коротко- та довготермінового прогнозування енергоспоживання у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану.

У **висновках** узагальнено основні наукові та практичні результати.

У **додатках** наведено список наукових праць автора, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації й документи про їх впровадження.

Наукові результати кандидатської дисертації Гоголюк О.П. не винесені на захист докторської дисертації, а використано лише в її оглядовому розділі.

Отримані в дисертації результати можуть бути використані під час викладання спеціальних дисциплін у вищих навчальних закладах та науково-дослідних установах, відділах і конструкторських бюро промислових підприємств відповідного спрямування для аналізу режимів і процесів електротехнічних систем

7. Зауваження.

1. На стор. 37 рис. 1.1. кількість входів = n , та кількість виходів = n , а на стор. 42 n - кількість змінних стану. Це плутанина.
2. В розділах 1-3 зроблено досить великий огляд сучасних методів, моделей, програм. Там же надано пропозиції автора. Бажано чітко відділяти релевантну інформацію від нової, авторською.
3. На стор. 45 маємо $0 \leq m < n$, але далі маємо: $r = m = n > 1$. Протиріччя.
4. На стор. 45 говориться: "введемо в розгляд оператор диференціювання $s = d/dt$ прийемо, що $s^i = d^i/dt^i$. З урахуванням введених позначень за нульових початкових умов рівняння (1.5) перетворюються в операторну форму виду $a(s) y(t) = b(s) u(t)$ ". Не можна в одній формулі використовувати разом операторні та часові змінні. Теж у формулі (1.12).
5. На стор. 45 вхідні сигнали позначені $u(t)$, а на рис. 1.1. - $v(t)$.
6. На стор. 46 в (1.12) пропущено a_0 .
7. На стор. 178 в формулах (5.3, 5.4) Z_c, γ хвильовий опір і коефіцієнт поширення електромагнітних хвиль лінії, а повинні бути операторні зображення цих величин. Тоді не зрозуміло, як операторні зображення залишились в формулах (5.7, 5.8), в яких фігурують часові змінні.
8. На стор. 181 в розрахунку використано $Z_c = 282,8$ Ом, але хвильовий опір – є комплексна величина.
9. Що означає термін "незначна чутливість до вимірності задачі"? Яка її математична основа?
10. В роботі розглядаються різні моделі: лінійна, білінійна, нелінійна, однак не окреслено межі їх застосування та точність розрахунку.
11. Поділ характеристик на динамічні і нелінійні некоректний.
12. Не окреслено, за яких умов і для яких задач можна розглядати об'єкт у вигляді білої, сірої, та чорної скриньки?
13. В роботі використовуються алгоритми Хо-Калмана та ін., однак не визначено, які їх переваги перед іншими у разі застосування до вирішення поставленої задачі.

Зауваження до дисертації не стосуються її наукових результатів і не зменшують їхнього значення.

8. Висновок.

Дисертаційна робота Гоголюк О. П. на тему: "Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на основі макромоделювання" є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, які вирішують актуальну для теоретичної електротехніки науково-прикладну проблему розвитку теорії аналізу й синтезу математичних моделей електротехнічних систем і пристроїв на основі макромоделювання з метою створення математичних макромоделей складних електричних кіл і елементів електротехнічних систем, спрямованих на покращення якості аналізу динамічних режимів і процесів, що є суттєвим внеском у розвиток теоретичної електротехніки.

За змістом і одержаними результатами дисертаційна робота відповідає вимогам п. 10, 12 і 13 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р., а автор, Гоголюк Оксана Петрівна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка.

Завідувач кафедри теоретичної і загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету
доктор технічних наук, доцент



С.М. Тиховод

Підпис д.т.н. Тиховода С.М.
засвідчую: вчений секретар

12.11.2018



В.В. Кузьмін