

ВІДГУК

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

1. Актуальність теми та її зв'язок з державними науковими програмами.

Сучасні електроенергетичні об'єкти належать до класу складних динамічних систем, які містять велику кількість елементів із жорсткими взаємозв'язками. Розвиток сучасних комп'ютерних прикладних програм створює сприятливі умови для розробки нових ефективних методів і моделей аналізу різних електродинамічних процесів, але ускладнення електроенергетичних систем вимагає урахування збільшених кількості чинників та тривалості аналізу виникаючих динамічних процесів.

Цілком обґрунтованим в указаних випадках є використання в дисертації підходів макромоделювання, які дозволяють на певних етапах вилучити із математичних моделей проміжні та несуттєві змінні, спрощуючи аналіз найбільш важливих динамічних режимів складних електричних кіл. Відсутність обґрунтованої наукової концепції удосконалення методів моделювання динамічних процесів у розгалужених взаємозв'язаних електричних колах не дозволяє суттєво прискорювати аналіз їхніх режимів. Тому тема дисертації, що спрямована на вирішення науково-прикладної проблеми розвитку теорії і методів аналізу динамічних режимів складних електротехнічних систем з використанням математичних методів макромоделювання та комп'ютерних засобів для прогнозування їхніх режимних і параметричних особливостей, є актуальною.

Важливість теми дисертації підтверджено її узгодженням з напрямом досліджень п'яти держбюджетних науково-дослідних робіт, в яких здобувачка була виконавцем окремих етапів.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації, їхня достовірність і наукова новизна базуються на коректному формулюванні наукових задач з використанням сучасних методів теорії нелінійних динамічних електричних кіл, дискретної математики, теорії оптимізації та методів математичного моделювання, зокрема методів ідентифікації і макромоделювання. Достовірність отриманих результатів підтверджено їхньою збіжністю з розрахунками тестових математичних моделей і макромоделей, узгодженістю з публікаціями відомих учених і результатами математичних експериментів на створених моделях і натурних вимірювань, виконаних в електроенергетичних системах ПАТ ЕК "Вінницяобленерго" і РДЦ Західного регіону України.

Результати опубліковано у фахових виданнях та доповідались і схваленні на МНТК: International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" СРЕЕ (2004, 2006, 2008–2012, 2015–2017), International Conference TCSET "Mod-

ern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (2006, 2010, 2014, 2018), International Scientific&Technical Conference "Problems of Present-Day Electrotechnics" PPE (2014, 2016), Проблеми сучасної електротехніки ПСЕ (2014, 2018) та інших.

Висновки дисертації є повними, логічними і відображають її сутність.

3. Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

Дисертанткою отримано наступні основні наукові результати:

1. Розвинуто теорію та методи побудови математичних моделей складних електричних кіл і систем та їх елементів, зокрема на основі експертного аналізу і відбору апріорної інформації, макромодельовання та діакоптики, що забезпечує врахування складності таких систем і спрощує їх розрахунок.

2. Удосконалено метод побудови дискретних макромоделей складних електротехнічних систем у вигляді "чорної скриньки" на основі використання змінних стану та створення низки адекватних математичних моделей електричних кіл і елементів таких систем зі збереженням інформації, достатньої для аналізу їхніх динамічних режимів.

3. Розроблено методи адаптації дискретних макромоделей складних електротехнічних систем у вигляді "чорної скриньки" до сучасних програмних середовищ MATLAB/Simulink та ATP/EMTP, що забезпечило можливість аналізу динамічних режимів таких систем.

4. Уперше розроблено математичні методи дискретного макромодельовання для побудови моделей прогнозування режимів енергоспоживання різними об'єктами без постадійної обробки апріорної інформації, що дало змогу здійснити прогнозування режимів енергоспоживання реальними енергооб'єктами України.

4. Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці способів формування дискретних макромоделей об'єктів електротехнічних систем у середовищі Simulink шляхом програмування математичних виразів для структур їхніх лінійної і нелінійної частин та адаптації отриманих макромоделей до середовища ATP. Зокрема створено власні бібліотеки макромоделей різних елементів складних систем у середовищах MATLAB/Simulink і ATP для їхнього використання при вирішенні задач прогнозування динамічних режимів реальних систем енергетичних об'єктів України.

Створено макромоделі та додаткові модулі програмного забезпечення для дослідження перехідних процесів в електротехнічних системах і розрахунку їхніх динамічних режимів з метою перевірки умов функціонування основного електроустаткування енергокомпаній і передбачення можливих аварійних ситуацій. Отримані результати рекомендовано до використання при аналізі режимів і процесів електротехнічних систем науково-дослідних установ, відділів і конструкторських бюро промислових підприємств, а спосіб прогнозування режимів споживання електроенергії – при оцінці обсягів споживання електроенергетичних компаній України.

Результати роботи використано для прогнозування режимів енергоспоживання енергорайону, який живиться від ПС 330 кВ м. Яворів, та перехідних процесів в елементах електричних мереж ПАТ "Вінницяобленерго". Таким чином,

здійснювались перевірка режимів експлуатації основного електроустаткування та захисту елементів ліній електропередачі. Результати роботи теж використано в навчальному процесі кафедри теоретичної і загальної електротехніки Національного університету "Львівська політехніка".

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

Основні результати дисертації опубліковано в: 1 монографії; 46 друківаних працях, із них 14 у наукових фахових виданнях України, з яких 2 статті у виданнях, що входять до міжнародної науково-метричної бази (МНМБ) Scopus; 7 – у наукових періодичних виданнях, що входять до МНМБ Scopus; 1 – в науковому періодичному виданні іншої держави; 1 – в періодичному виданні України, 23 публікації зроблено в матеріалах МНТК, з яких 9 включено до МНМБ Scopus, а 3 написано без співавторів. Здобувачка в МНМБ Scopus має індекс посилань $h_i = 3$, а в МНМБ Google Scholar – $h_s = 4$.

Зміст автореферату повністю відображає зміст дисертаційної роботи: принципові результати, основні наукові положення, 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 найменування використаних джерел і 2 додатки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, показано зв'язок роботи з державними науковими програмами, сформульовано мету й задачі наукових досліджень, наукову новизну результатів і їхню практичну значимість, наведено дані про апробацію та публікацію отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано математичні неперервні й дискретні динамічні моделі і макромоделі елементів електротехнічних систем. З метою створення моделей для аналізу динамічних режимів складних електротехнічних систем, які містять елементи із зосередженими та розподіленими параметрами запропоновано використовувати метод побудови макромоделей типу "чорної скриньки" у формі дискретних рівнянь стану.

Обґрунтовано переваги застосування дискретних динамічних макромоделей для оперативного аналізу динамічних режимів і процесів електротехнічних систем. Такими перевагами є проста структура моделі без детального розгляду внутрішніх процесів об'єкту, розділення динамічних і нелінійних характеристик, придатність описання об'єктів невідомої фізичної природи, незначна чутливість до вимірності задачі (що важливо під час моделювання складних об'єктів у темпі процесу), можливість об'єднання макромоделей окремих елементів в математичну макромодель цілої системи як за допомогою діакоптичного підходу, так і шляхом формування рівнянь зв'язку з використанням законів Кірхгофа.

У другому розділі викладено методи побудови макромоделей динамічних систем та алгоритми побудови лінійних неперервних макромоделей на основі частотних і часових характеристик.

Розглянуто особливості застосування діакоптичних процедур на схемному рівні та у вигляді математичних співвідношень для покращення процедури макромоделювання складових електротехнічних систем. Запропоновано оптимізаційний підхід до ідентифікації параметрів макромоделі. Удосконалено спосіб створення математичних моделей електричних кіл складних електротехнічних систем шляхом побудови макромоделей їх елементів у вигляді "чорної скриньки" на основі експертного аналізу та розбиття побудови макромоделі на п'ять етапів.

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 прямого конуса Растрігіна.

У третьому розділі розглянуто особливості побудови математичних моделей і макромоделей елементів електротехнічних систем для визначення оптимальних способів їх побудови. Визначено проблеми інтеграції моделей і макромоделей елементів електротехнічних систем із сучасними програмними засобами розрахунку їхніх динамічних режимів. Обґрунтовано доцільність застосування методів макромоделювання (зокрема в формі змінних стану) та їхню адаптацію до сучасних програмних середовищ типу MATLAB/Simulink (як стандарту математичного моделювання) і та програми АТР (як засобу інженерних розрахунків).

Четвертий розділ присвячено обробці інформації про елементи електротехнічних систем, методики їх представлення та коректної систематизації. Сформульовано основні вимоги до інформації та обмеження, які на неї накладаються. Визначено основні властивості й особливості застосування апаратно-програмних комплексів для отримання з інформації масивів експериментальних даних для побудови макромоделей електротехнічних систем і їхніх елементів. Розглянуто методи експертного аналізу (методи експертних оцінок) для оцінювання інформації та вирішення задачі побудови адекватної математичної моделі.

Запропоновано застосовувати експертний аналіз як діагностичний засіб для визначення структури та форми макромоделі на основі оцінювання апріорної інформації (якісного характеру перехідних характеристик і їх числових значень), яка може бути несистематизованою, або неповною. Сформульовано пряму задачу експертного аналізу – визначення форми та виду макромоделі. Доведено можливість розв'язання оберненої задачі – визначення виду та структури досліджуваного об'єкту за формою макромоделі та числовими значеннями її коефіцієнтів.

Здійснено узагальнення методів ідентифікації критичних режимів за перехідними характеристиками і створення узагальненого алгоритму їх розпізнавання для визначення ефективної структури макромоделі на основі експертного аналізу.

У п'ятому розділі створено дискретну макромоделю довгої лінії електропередавання у вигляді "чорної скриньки" в формі змінних стану з високим ступенем адекватності на підставі результатів комп'ютерного експерименту. Такий підхід дозволяє урахувати характеристики елементів із розподіленими параметрами та особливості процесів, які не завжди піддаються аналітичним розрахункам чи експериментальному визначенню їхніх числових значень.

На основі розробленого алгоритму ідентифікації представлено побудову дискретних макромоделей для ліній електропередачі з розподіленими параметрами і електростанцій з розподіленими і зосередженими параметрами. Побудову дискретної макромоделі лінії електропередачі здійснено на основі перехідних характеристик, отриманих шляхом комп'ютерного експерименту на математичній моделі однофазної лінії електропередачі, створеної в методі біжучих хвиль. Практичну побудову макромоделі виконано на основі оптимізаційного підходу за допомогою напрямного конуса Растрігіна з адаптацією параметрів пошуку. Верифікацію отриманих результатів здійснено шляхом порівняння результатів моделювання лінії електропередачі у методі біжучих хвиль та її макромоделі.

Розроблено також дискретну макромодель складної електротехнічної системи за принципом "чорної скриньки" на підставі результатів моніторингу стану реального енергоострова "Бурштин-Альбертірша".

Шостий розділ присвячено адаптації створених дискретних макромоделей електротехнологічних систем до комп'ютерних середовищ моделювання перехідних процесів. Розроблено рекомендації та способи їх реалізації в програмних середовищах MATLAB/Simulink і ATP та описано особливості адаптації макромоделей систем до програм MATLAB/Simulink і ATP/EMTP. У середовищі Simulink дискретну макромодель запропоновано створювати шляхом програмування математичних виразів з використанням Simulink-функції (S-functions).

Для прикладу інтеграції в середовище Simulink дискретних макромоделей у вигляді "чорної скриньки" і тестування складного електричного кола, у математичній моделі якого є макромодель, здійснено адаптацію з цим середовищем дискретної макромоделі лінії електропередачі. Порівняння осцилограм перехідних процесів у дискретній макромоделі з використанням S-функцій і моделі, реалізованої в методі біжучих хвиль, показало високу адекватність результатів моделювання.

Як приклад адаптації макромоделей до середовища ATP здійснено інтеграцію в це середовище дискретної макромоделі трансформатора, що дозволило виконати дослідження динамічних режимів електричного кола у вигляді "джерело живлення-трансформатор-навантаження" на її основі. Такий приклад підтвердив ефективність застосування діакоптичних методів і макромодельовання для аналізу динамічних режимів і перехідних процесів у електротехнічних системах.

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.

Показано доцільність використання дискретних макромоделей прогнозування енергоспоживання при створенні математичних моделей прогнозу короткочасного енергоспоживання, оскільки вони не потребують тривалого статистичного накопичування даних. Було побудовано макромодель добового енергоспоживання ПС-Яворів 330 кВ і довгострокового енергоспоживання ПАТ "Київенерго".

Вперше для моделювання режимів і прогнозування характеристик коротко- та довготермінового прогнозування енергоспоживання об'єктів електроенергетичної системи було запропоновано використовувати макромоделі, розроблені у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану.

У висновках узагальнено основні наукові та практичні результати.

У додатках наведено наукові праці автора, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації й акти їхнього практичного використання.

Наукові результати кандидатської дисертації Гоголюк О.П. на захист докторської дисертації не винесено, а використано лише в її оглядовій частині.

Отримані в дисертації результати щодо створених макромоделей окремих елементів підстанції та додаткових модулів програмного забезпечення для дослідження перехідних процесів елементів електротехнічних систем можуть бути використані в енергетичних компаніях для розрахунку динамічних режимів і перехідних процесів з метою перевірки умов функціонування основного електроустаткування і передбачення та аналізу аварійних ситуацій.

Запропонований спосіб прогнозування споживання електроенергії може використовуватись для оцінювання обсягів споживання електроенергії в енергетичних компаніях України. Теоретичні засади побудови математичних моделей електротехнічних систем у цілому та їхніх елементів на основі макромоделювання та експертного аналізу доцільно використовувати в науково-дослідних установах, відділах і конструкторських бюро промислових підприємств відповідного спрямування для аналізу режимів і процесів електротехнічних систем та в електротехнічних дисциплінах навчання технічних вузів України.

7. Зауваження до дисертаційної роботи.

1. На с. 60 у висновках до розділу 1 запропоновано використовувати метод побудови макромоделей у вигляді "чорної скриньки" у формі дискретних рівнянь стану. Бажано додатково пояснити переваги і обмеження такого підходу.

2. На мою думку надлишковим є детальний опис основних характеристик і можливостей програми ATP (альтернативної програми дослідження перехідних процесів) та мови програмування MODELS, оскільки цей матеріал не є авторським і не стосується наукової новизни результатів дисертації.

3. Не у всіх випадках для побудованих макромоделей здійснювалась оцінка похибок для можливих тестових наборів вхідних збурень.

4. Було б доцільним модернізувати спосіб побудови дискретної макромоделі лінії електропередавання з метою адаптації створюваних макромоделей до змінення довжини лінії.

5. У роботі не наведено порівняння ефективності побудови макромоделей прогнозування енергоспоживання з використанням методу, запропонованого дисертанткою, і класичними моделями, які використовуються з цією ж метою.

6. Також є деякі зауваження до тексту дисертації, зокрема всі надписи на блок-схемі рис. 3.1 приведено на англійській мові; на с. 46 після формули (1.9) оператор $a(s)$ позначено як $a(p)$; на с. 78 (6 рядок) замість "елементів" надруковано "парламентів"; на рис. 5а автореферату одна і та ж східчаста лінія позначена як

струм i_1 і як напруга u_2 ; в підписах до не кольорового рис. 5а,б дисертації на с. 182 є посилання на жовті та рожеві лінії; на с. 183 дисертації є посилання на напруги початку і кінця лінії u_1 та u_2 , тоді як у формулах (5.3)–(5.14) і на рис. 5.1 ці напруги позначені як u_p та u_k ; невірно відображено позначки вектору в формулах (5.18)–(5.24), (6.1), (6.5), (6.6), (6.9)–(6.11), (6.46)–(6.48), (7.6)–(7.12).

Зроблені зауваження до дисертації не стосуються її принципових положень і наукових результатів та не знижують їхньої цінності.

8. Висновок.

Дисертація О.П. Гоголюк 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 макромодельовання з метою створення математичних макромоделей складних електричних кіл і елементів електротехнічних систем для покращення якості аналізу їхніх динамічних режимів і процесів.

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 здобувачка, Гоголюк Оксана Петрівна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки НАН України

Супруновська Н.І.

05.11.2018

