

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет "Львівська політехніка"

**ГОГОЛЮК ОКСАНА ПЕТРІВНА**

УДК 621.372.061: 519.87(043)

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ НА ОСНОВІ МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ**

05.09.05 – теоретична електротехніка

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів–2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Стахів Петро Григорович,**  
завідувач кафедри теоретичної та загальної  
електротехніки Національного університету "Львівська  
політехніка"

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Тиховод Сергій Михайлович,**  
завідувач кафедри теоретичної та загальної  
електротехніки, Запорізький національний технічний  
університет

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

доктор технічних наук, професор  
**Ямненко Юлія Сергіївна,**  
завідувач кафедри промислової електроніки  
Національного технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут" ім. І. Сікорського

Захист відбудеться "30" 11 2018 р. о 10 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів–13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "24" 10 2018 р.

*Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.02*

*В.І. Коруд*

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми вдосконалення методів аналізу й синтезу математичних моделей електротехнічних систем і пристроїв на основі макромоделювання з метою створення математичних макромоделей складних електричних кіл і елементів електротехнічних систем (ЕТС) для покращення якості аналізу їхніх динамічних режимів і процесів.

**Актуальність теми.** Важливою проблемою сучасної електротехніки є розвиток й удосконалення методів аналізу динамічних режимів і процесів електромагнітних кіл як елементів електротехнічних систем з метою покращання їхніх техніко-економічних показників і надійності функціонування.

Для покращання якості функціонуванням ЕТС доцільно здійснювати неперервний аналіз перебігу динамічних режимів і процесів у реальному часі. Проте динамічні режими ЕТС за умови врахування властивостей і структури всіх їхніх складових описуються системами лінійних і нелінійних алгебричних і диференційних рівнянь високого порядку. Для забезпечення адекватності результатів комп'ютерного моделювання необхідно враховувати якомога більше чинників, що істотно збільшує тривалість їхнього аналізу. Отже виникає протиріччя між адекватністю результатів і швидкодією засобів комп'ютерного моделювання. Звідси випливає, що комп'ютерне моделювання процесів ЕТС на основі повної системи рівень стану не може забезпечити необхідну швидкодію моделі складної системи, яка необхідна для формування керівних впливів в реальному часі, що є умовою ефективності оперативного керування ЕТС.

Проблеми моделювання динамічних режимів ЕТС і прогнозування їхніх характеристик, як на основі класичних моделей, так і з використанням макромоделювання, висвітлені в працях вітчизняних і закордонних вчених, а саме: В. А. Венікова, А. Ф. Верланя, С. А. Букашкіна, Л. В. Данилова, О. В. Кириленка, А. А. Ланне, В. С. Перхача, Г. Є. Пухова, Л. А. Синицького, П. Г. Стахіва, Б. С. Стогнія, М. А. Шакірова, А. К. Шидловського, J. Arrillaga, S. Bernas, Z. Ciok, L. Chua, H. Dommel, A. Semlyen, які сформуливали теоретичні засади створення та розвитку математичного моделювання й макромоделювання динамічних електромагнітних кіл.

Одним із можливих підходів вирішення задач моделювання динамічних режимів є макромоделювання, яке в разі його використання для побудови математичних моделей досліджуваних систем надає змогу зв'язати між собою тільки вхідні та вихідні змінні (решта змінних вилучаються з описання) та відобразити лише основні, найважливіші характеристики модельованих об'єктів. Завдяки одержаним шляхом макромоделювання перехідним характеристикам ЕТС і їхніх елементів, а також застосуванню експертного аналізу, можна виявити їх характерні особливості, що надасть можливість прогнозувати їх динаміку.

Використання дискретних макромоделей елементів ЕТС як складової

сучасного апарату математичного моделювання з метою прогнозування поведінки ЕТС є актуальним науковим підходом до вирішення складної задачі покращення функціонування та підвищення надійності електроенергетичних об'єктів України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку досліджень, передбачених Державною науково-технічною програмою "Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології генерування, перетворення та використання енергії", а також напрямку наукових досліджень кафедри теоретичної та загальної електротехніки Національного університету "Львівська політехніка" "Математичне моделювання динамічних процесів в електротехнічних та електронних колах і системах".

Дисертаційна робота виконувалась у межах держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри теоретичної та загальної електротехніки Національного університету "Львівська політехніка", а саме: "Розроблення діакоптичних методів розрахунку динамічних режимів електроенергетичних систем на паралельних обчислювальних засобах" 2004–2006 р., (номер державної реєстрації 0104U002307); "Математичне моделювання електроенергетичних систем з метою прогнозування їх часових характеристик", 2007–2008 р., (номер державної реєстрації 0107U001123); "Швидкий розрахунок часових характеристик електроенергетичних систем на основі діакоптичного підходу та макромоделювання", 2009–2010 р., (номер державної реєстрації 0109U001148); "Побудова макромоделей компонент електроенергетичних систем на основі експлуатаційних характеристик" 2011–2012р. (номер державної реєстрації 0111U001224); "Дискретні макромоделі та їх застосування до прогнозування характеристик електроенергетичних систем", 2013 – 2015 р., ( номер державної реєстрації 0113U003194).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розвиток і удосконалення теорії та методів дослідження динамічних режимів електротехнічних систем з використанням математичних методів макромоделювання та комп'ютерних засобів для прогнозування динамічних характеристик ЕТС, як швидкоплинних, так і тривалих.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- здійснено аналіз наявних математичних і комп'ютерних моделей та макромоделей як елементів електричних кіл і електротехнічних систем, так і окремих їх складових (генераторів, трансформаторів, підстанцій тощо) з урахуванням властивостей елементів як із зосередженими так і розподіленими параметрами;
- розглянуто проблему прогнозування перебігу перехідних процесів ЕТС і їхніх елементів на підставі реальних часових характеристик, отриманих під час реєстрації за допомогою сучасних систем моніторингу параметрів режимів і стану устаткування електротехнічних систем;
- адаптовано теорію експертного аналізу для побудови математичних моделей і макромоделей електротехнічних систем й удосконалено застосування

критеріїв оцінювання перехідних процесів з метою вибору оптимальних наборів перехідних характеристик, придатних для побудови макромоделей досліджуваних об'єктів;

- удосконалено універсальний алгоритм побудови дискретних математичних макромоделей у вигляді “чорної скриньки” в формі змінних стану на основі апріорної інформації, отриманої під час експлуатації реальних об'єктів з урахуванням необхідності їх подальшої адаптації до комп'ютерних середовищ;
- удосконалено й розроблено нові математичні та комп'ютерні моделі й макромоделі елементів електричних кіл і ЕТС у цілому;
- адаптовано розроблені математичні моделі та макромоделі до сучасних комп'ютерних засобів моделювання режимів і процесів електротехнічних систем;
- створено необхідні компоненти програмного забезпечення для дослідження динамічних режимів і перехідних процесів елементів електротехнічних систем на підставі розроблених їхніх математичних моделей і макромоделей;
- перевірено адекватність і проведено апробацію розроблених математичних моделей і макромоделей для дослідження перехідних процесів конкретних електротехнічних систем.

**Об'єктом досліджень** є динамічні режими та процеси в електричних колах і електротехнічних системах на основі макромоделювання.

**Предметом досліджень** є розроблення нових макромоделей електричних кіл і елементів ЕТС, а також їх інтеграція до наявних комп'ютерних комплексів дослідження динамічних режимів і процесів.

**Методи досліджень.** Виконані в дисертації дослідження ґрунтуються на методах аналізу перехідних процесів лінійних і нелінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами, теорії динамічних систем у межах задачі побудови математичних макромоделей у вигляді “чорної скриньки”, методах експертного аналізу для вибору форми макромоделі й оброблення апріорних даних, методах оптимізації для пошуку форм макромоделей.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Отримала подальший розвиток теорія та методи побудови математичних моделей електричних кіл і систем у цілому, а також їх елементів зокрема, на основі експертного аналізу та відбору апріорної інформації, макромоделювання й діакоптики, що дає змогу враховувати складність досліджуваної системи та пришвидшити її розрахунок;
2. Удосконалено метод побудови дискретних макромоделей у вигляді "чорної скриньки" з використанням змінних стану, що дало змогу вперше створити низку адекватних математичних моделей 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 постадійного оброблення апріорної інформації. Це дало змогу здійснити прогнозування як коротко-, так і довготривалого енергоспоживання енергооб'єктів України, що в цілому сприяє підвищенню ефективності енерговикористання.

**Практичне значення одержаних результатів.** Удосконалені методи макромодельовання можуть бути використані для побудови математичних моделей і макромоделей електротехнічних систем з використанням експертного аналізу й удосконаленої методики формування апріорної інформації з використанням сучасних вимірювальних комплексів.

Розроблено способи безпосереднього формування дискретних макромоделей у середовищі Simulink за допомогою S-функцій шляхом програмування математичних виразів, відповідних до структури лінійної та нелінійної частин макромоделі. Розроблено спосіб адаптації дискретних макромоделей об'єктів електротехнічних систем до середовища АТР. Завдяки цьому можна створити власні бібліотеки макромоделей елементів у середовищах MATLAB/Simulink і АТР, які можуть бути використані для 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 макромодельовання 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.

Результати досліджень, отримані під час виконання дисертаційної роботи, використано та впроваджено в:

- навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” під час викладання дисциплін “Методи оптимізації та їх застосування в задачах електротехніки” та “Макромодельовання компонентів електромеханічних систем”, які викладаються для магістрів і аспірантів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в Національному університеті “Львівська політехніка”;
- науково-дослідній роботі кафедри теоретичної та загальної електротехніки Інституту енергетики та систем керування Національного університету “Львівська політехніка”;
- математичній моделі елементів електропересилання та прогнозування, що впроваджені в ПАТ ЕК "Вінницяобленерго" і РДЦ Західного регіону відповідно, та використовуються для аналізу режимів і процесів під час експлуатації електричних мереж.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, викладені в дисертації, отримані здобувачем особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати (зі списку праць здобувача): аналіз властивостей динамічних систем і аспектів їх макромодельовання, аналіз класичних методів побудови макромоделей і побудова макромоделей окремих процесів електричних кіл і електротехнічних систем у цілому (розділи 2, 3, 9 монографії); описання особливостей застосування методів дослідження електричних кіл у сучасних програмних засобах [1]; вибір структури макромоделі та вибір алгоритму побудови з погляду його ефективності [2]; побудова математичної моделі електропересильні з неявнополюсними синхронними генераторами [3]; спосіб пришвидшення розрахунку перехідних процесів з використанням дискретних макромоделей елементів на прикладі електроенергетичної системи [4]; спосіб розрахунку перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області на основі макромодельовання [7]; засади застосування ієрархічного моделювання для побудови макромоделей електроенергетичних систем [8]; процедура адаптації макромоделей електротехнічних систем і їхніх складових до програмних засобів моделювання перехідних процесів [9]; алгоритм підвищення ефективності побудови макромоделей [10]; дискретна макромодель підстанції [11]; макромодель довготермінового прогнозування енергоспоживання [12]; макромодель короткотермінового прогнозування енергоспоживання [13]; математична модель трифазної лінії електропересилання для збирання експериментальної інформації з метою побудови її макромоделі [15]; спосіб побудови дискретних макромоделей трансформаторів і автотрансформаторів [16, 31]; аналіз особливостей моделювання складних електричних систем діакоптичними методами [17]; аналіз переваг макромоделей трансформаторів у порівнянні з їх детальними моделями [18, 35]; застосування експертного аналізу для практичної побудови макромоделі нелінійних динамічних систем на прикладі електромеханічного перетворювача [19]; вперше запропоновано спосіб побудови дискретної макромоделі однофазної лінії

електропересилання [20]; описання апробації результатів наукових досліджень [21]; удосконалено процедуру побудови макромоделей нелінійних динамічних систем з використанням оптимізації [22]; запропоновано використовувати методику макромодельовання для прогнозування енергоспоживання житлового мкрорайону [23]; побудовано математичну модель для дослідження системи електропересилання [24]; описання способів моделювання великовимірних електричних систем паралельними методами [25]; комп'ютерна модель для дослідження системи електропересилання [26]; спосіб аналізу електричних компонентів під час їх описання дискретними макромоделями [27]; запропоновано способи аналізу електричних кіл з елементами з розподіленими параметрами [28]; розроблення способів адаптації детальних моделей елементів електроенергетичних систем до середовища MATLAB/Simulink для побудови моделі складної системи [29]; побудова математичної моделі для дослідження системи електропересилання в середовищі MATLAB/Simulink [30]; розроблення процедури дослідження ЕЕС на основі діакоптичного підходу та макромодельовання в сучасних комп'ютерних середовищах [32]; аналіз проблем застосування макромодельовання та діакоптичного підходу для дослідження ЕЕС і запропоновані способи їх вирішення [33]; розроблення методики розрахунку перехідних процесів систем керування в електроенергетиці з використанням сучасних комп'ютерних середовищ [34]; розроблення способу застосування діакоптичних методів для розрахунку перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області [36]; застосування експертного аналізу апріорних даних для побудови макромоделі асинхронного двигуна [37]; дискретна макромодель однофазної лінії електропересилання [38]; розроблення засад застосування експертного аналізу для практичної побудови макромоделей електротехнічних систем і їх елементів [39]; розроблення способів усунення труднощів під час моделювання перехідних процесів із використанням макромодельовання та діакоптичного підходу [40]; розроблення методики отримання даних для побудови макромоделі складного електричного кола, досліджуваного в режимі короткого замикання [41]; спосіб адаптації макромоделей до середовища ATP [42]; дискретні макромоделі трансформатора в середовищі ATP за допомогою мови програмування MODELS [43]; спосіб реалізації дискретної макромоделі в середовищі MATLAB/Simulink [44]; розроблення способів порівняння ефективності моделювання на основі фізичної моделі об'єкту та його математичної макромоделі [45]; розроблення способів вирішення проблеми числової стійкості під час моделювання електричних кіл із макромоделями в їхній структурі [46].

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи апробовані на: V Konferencja Naukowo-Techniczna SIECI'2004, Wroclaw, Polska, 15-17 września, 2004; V-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", Zakopane, Poland, September 1-4, 2004; Ювілейній науковій конференції, присвяченій 40-річчю кафедри радіофізики, Львів, Україна, 7-8 жовтня 2004 р.; VII - th



International Conference in Advanced Methods in The Theory of Electrical Engineering Applied to Power Systems AMTEE'05, September 12-14, 2005, Pilsen, Czech Republic; International Conference TCSET'2006 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science", Feb. 28 – March 4, 2006, Lviv–Slavske, Ukraine, 2006; VII International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering, Odessa, Ukraine, August 27-30, 2006; III International Symposium "Modern Electric Power Systems" MEPS'2006, Wroclaw, Poland, 6-8 September, 2006; 5-й Міжнар. наук.– техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці" Львів, жовтень 2007; 9<sup>th</sup> International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", Alushta (Crimea), Ukraine, September 16–20, 2008 р.; I-й міжнародній конференції молодих вчених EPECS'2009 "Енергетика та системи керування", Львів, 14-16 травня 2009 р.; X-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", Waplewo, Poland, September 16-19, 2009 р.; X-th International Conference TCSET'2010 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science", Lviv–Slavske, Feb. 23– 26, 2010 р., Ukraine; II науково-практичній конференції "Проблеми електроніки та інформаційні технології", смт. Чинадієво, Закарпатська обл., Україна, 2 – 5 вересня, 2010 р.; XI-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" CPEE'2010, Lazne Kynzvalt, Czech Republic, September 13-16, 2010 р.; II –й Міжнародній конференції "Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11)", 7 –10 червня 2011 р., Мукачево, Свалявський р–н., Закарпатська обл., Україна; II – й міжнародній конференції молодих вчених EPECS'2010 "Енергетика та системи керування", Львів, 25-27 листопада 2010 р.; XII- th International Workshop CPEE'2011 "Computational Problems of Electrical Engineering", Kostryna, Trans-Carpathian region, Ukraine, September 5-7, 2011 р.; XIII- th International Workshop CPEE'2012 "Computational Problems of Electrical Engineering", Grzybow, Poland, September 5-8, 2012 р.; XII-th International Conference TCSET'2014 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science", Feb. 25 – March 1, 2014, Lviv–Slavske, Ukraine, 2014 р.; XIII International Scientific&Technical Conference "Problems of Present-Day Electrotechnics" PPE-2014, Kyiv, Ukraine 02-06, June 2014 р.; науковому семінарі НАН України "Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем", лютий 2015 р.; XIV International Scientific&Technical Conference "Problems of Present-Day Electrotechnics" PPE-2016, Kyiv, Ukraine 02-06, June 2014 р.; XV міжнародній конференції Проблеми сучасної електротехніки, Київ, 6-10 червня 2016 року; 17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), September 14-17, 2016, Sandomierz, Poland; International Conference EPNET'2016 (Electric Power Networks), Szklarska Poręba, Poland, September 19-21, 2016; Міжнародній науковій конференції «Витоки та становлення Львівської електротехнічної школи», Львів, 25–26 травня 2017 року; 18th International Conference on Computational Problems of Electrical

Engineering (CPEE), September 11-13, 2017, Kutna Hora, Czech Republic; XIV-th International Conference TCSET'2018, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 20 – 24, 2018.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в одній монографії, 46 друкованих працях, із них 14 у наукових фахових виданнях України, в тому числі 2 статті у виданнях, що включені до наукометричної бази Scopus; 7 у наукових періодичних виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз (Scopus), 1 стаття в науковому періодичному виданні іншої держави; 1 стаття в періодичному виданні України, 23 матеріалах конференцій, з яких 9 у виданнях, що включені до наукометричної бази даних Scopus; 3 праці написано без співавторів.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаної літератури, переліку використаних позначень і додатків. Повний обсяг становить 318 стор. Робота містить 52 ілюстрації до тексту, перелік умовних позначень на 1 стор., список використаних джерел із 294 найменувань, додатки на 13 сторінках. Обсяг основного тексту становить 274 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, визначено об'єкт і предмет досліджень, представлено наукову новизну й практичне значення результатів і надано відомості про апробацію дисертаційної роботи.

У **першому розділі** здійснено аналіз математичних неперервних й дискретних динамічних моделей і макромоделей елементів електротехнічних систем з метою вибору адекватних та ефективних математичних методів для практичної реалізації поставлених у роботі задач.

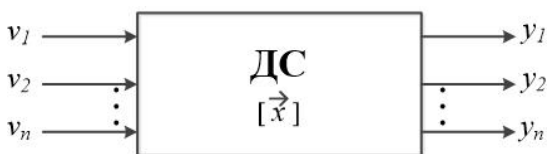


Рис. 1. Схематичне представлення динамічної системи

Динамічну систему можна відобразити у вигляді багатополосника, наведеного на рис. 1, де множина вхідних сигналів подається у вигляді вектора  $\vec{v}$ . Вихідними сигналами є вектор  $\vec{y}$ , а її стан визначається  $n$ -вимірним вектором змінних стану  $\vec{x}$ .

Модель електротехнічної системи (макромодель) повинна відображати математичні залежності між трьома множинами змінних: вхідними (зовнішніми факторами, що впливають на систему та задаються множиною функцій чи множиною послідовностей вхідних значень), вихідними, які відображають поведінку системи та внутрішніми, що визначаються множиною значень змінних стану системи. Математичні моделі неперервних динамічних систем із зосередженими параметрами у вигляді диференціального рівняння в формі Коші такого виду (рівнянь стану):

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{v}), \quad (1) \quad \vec{y} = \vec{y}(\vec{x}, \vec{v}), \quad (2) \quad \vec{x} = [x_1, \dots, x_n]^T \quad (3)$$

де  $\vec{x}$  – вектор змінних стану системи,  $\vec{v}, \vec{y}$  – вектори вхідних збурень і вихідних змінних відповідно. Функції  $\vec{f}(\vec{x}, \vec{v}), \vec{y}(\vec{x}, \vec{v})$  є нелінійними вектор-функціями, елементи яких є нелінійними скалярними функціями змінних  $\vec{x}$  і  $\vec{v}$ .

Якщо в рівняннях (1) і (2) розкласти нелінійні функції в ряд Тейлора й обмежитись першими членами ряду, то отримаємо лінійну модель у формі рівнянь стану:

$$\vec{\dot{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{v}, \quad (4) \quad \vec{y} = \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{v}, \quad (5)$$

де  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  – матриці коефіцієнтів.

Розв'язком рівнянь (4) і (5), що описують стан динамічних систем у часі, є вектор-функція  $\vec{x}(t) = \vec{x}(t, x_0)$ ,  $\vec{x}_0 = \vec{x}(t)|_{t=0}$ , де  $\vec{x}_0$  – вектор початкових умов,  $t = 0$  – початок відліку часу.

Лінійну модель "вхід–вихід" одноканальної динамічної системи можна подати звичайним диференціальним рівнянням виду:

$$a_0 y^{[n]} + a_1 y^{[n-1]} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 u^{[m]} + b_1 u^{[m-1]} + \dots + b_m u \quad (6)$$

де  $a_i, b_i$  – коефіцієнти (параметри моделі),  $a_0 \neq 0, b_0 \neq 0$ ,  $n$  – порядок моделі,  $0 \leq m < n$ . Рівняння (6) пов'язує вхідні сигнали  $u(t)$  і їхні похідні  $u^{[l]}(t)$  з вихідними сигналами  $y(t)$  та їх похідними  $y^{[l]}(t)$  на деякому часовому інтервалі, тобто при  $t \in [t_0, t_f)$ . Параметри моделі  $a_i, b_i$  можна отримати з матриць  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  і  $\mathbf{D}$ .

Числові методи, застосовані для розв'язування диференціальних рівнянь, дають змогу отримати їхній розв'язок для часових значень змінної. Тобто час стає дискретною змінною, що зумовлює дискретні значення розв'язку диференціального рівняння:

$$x(t) \Rightarrow \{x^{(k)}\}; t \Rightarrow \{t^{(k)}\}, k = \overline{0, \infty}, \quad (7)$$

де  $k$  – номер дискрети,  $t^{(k)}$  –  $k$ -те значення дискретного часу,  $x^{(k)}$  – дискретне значення змінної в  $k$  часовій дискреті, а  $t^{(k)} = k \cdot h$ , де  $h$  – крок дискретизації.

У зв'язку з необхідністю застосування дискретних відліків для моделювання динамічних режимів ЕТС запропоновано застосовувати макромоделі у вигляді універсальної форми, придатної для побудови моделей динамічних систем:

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(k)} + \mathbf{G}\vec{v}^{(k)} + \vec{\Phi}(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}) \\ \vec{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(k+1)} + \mathbf{D}\vec{v}^{(k+1)} \end{cases}, \quad (8)$$

де  $\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}, \vec{y}^{(k)}$  – вектори змінних стану, вхідних та вихідних змінних відповідно,  $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  – деякі матриці,  $\vec{\Phi}$  – нелінійна вектор-функція,  $k$  – номер дискрети.

Лінійний варіант цієї моделі записується так:

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\bar{x}^{(k)} + \mathbf{G}\bar{v}^{(k)} \\ \bar{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\bar{x}^{(k+1)} + \mathbf{D}\bar{v}^{(k+1)} \end{cases} \quad (9)$$

Структура ж моделі визначається вимірністю вектора  $\bar{x}$  (порядком моделі), а також видом нелінійної функції  $\bar{\Phi}(\bar{x}^{(k)}, \bar{v}^{(k)})$ . Метою параметричної ідентифікації є визначення коефіцієнтів матриць  $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  і нелінійної вектор-функції. Під час структурної ідентифікації порядок рівняння (8) можна визначити з лінеаризованої моделі на основі алгоритму Хо-Калмана, а форму нелінійного доданка  $\bar{\Phi}(\bar{x}^{(k)}, \bar{v}^{(k)})$  вибирають на основі наявної інформації про модельований об'єкт. Іншим шляхом для побудови дискретних макромodelей є застосування оптимізаційних методів із забезпеченням мінімального значення функції мети, записаної у вигляді середньоквадратичного відхилення поведінки моделі та модельованого об'єкта:

$$Q_i(\bar{\lambda}) = \frac{1}{N} \sum_k^N |\bar{y} - \bar{y}'|^2, \quad (10)$$

де  $\bar{y}$  – вектор даних, використаних для побудови макромodelей,  $\bar{y}'$  – реакція макромodelі на вхідне збурення.

Пропонується здійснювати процес розрахунку часових характеристик динамічної системи у вигляді схеми, наведеної на рис. 2.

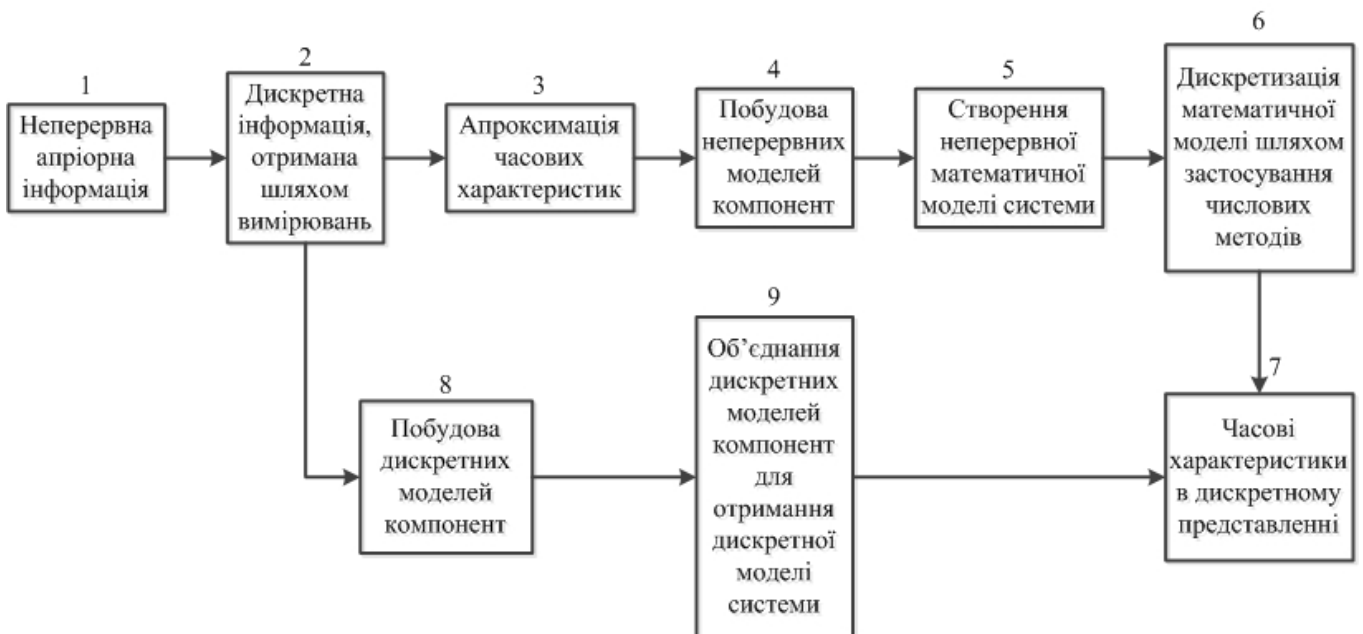


Рис. 2. Схема процесу розрахунку часових характеристик динамічної системи

Переваги застосування дискретних динамічних макромodelей такі:

- проста структура моделі, що зумовлена відсутністю детального розгляду внутрішніх процесів модельованого об'єкта;
- можливість розділення динамічних і нелінійних характеристик;

- придатність для описання об'єктів невідомої фізичної природи, яку неможливо проаналізувати, чи ж моделі яких не можуть бути зведені до простих;
- незначна чутливість до вимірності задачі, що важливо під час моделювання складних об'єктів;
- макромоделі окремих елементів електротехнічних систем можуть бути об'єднані в математичну макромодель цілої системи як за допомогою діакоптичного підходу, так і шляхом формування рівнянь зв'язку з використанням законів Кірхгофа.

У **другому розділі** розглянуті методи побудови макромоделей динамічних систем, детально описано алгоритм побудови лінійних неперервних макромоделей на основі частотних і часових характеристик. Для побудови дискретних макромоделей електротехнічних систем наведено застосування алгоритму Хо-Калмана.

Запропоновано використання оптимізаційного підходу до ідентифікації параметрів макромоделі. Основною проблемою, яка виникає під час побудови макромоделей елементів електричних кіл і ЕТС є значна вимірність оптимізаційної задачі, що зумовлює як труднощі вибору оптимізаційного алгоритму, так і збільшення часових витрат на його реалізацію. У зв'язку з цим виникає потреба спрощення оптимізаційної задачі та пришвидшення її комп'ютерної реалізації. Удосконалений алгоритм створення математичних моделей складних електричних кіл і ЕТС з використанням побудови макромоделей у вигляді “чорної скриньки” на основі експертного аналізу та розбиття побудови макромоделі на етапи, показаний на рис. 3.

Процедура побудови макромоделі об'єктів проводиться в п'ять етапів:

- 1) Вибір набору вхідних і вихідних даних й форми шуканої моделі, записаної через невідомі коефіцієнти, яка б достатньо точно описувала об'єкт моделювання;
- 2) Створення лінійної макромоделі шляхом оптимізації її коефіцієнтів;
- 3) Доповнення лінійної макромоделі нелінійною функцією спеціального вигляду;
- 4) Проведення остаточної оптимізації макромоделі, де процедурі оптимізації підлягають усі коефіцієнти;
- 5) Перевірка отриманої нелінійної макромоделі на незалежному наборі тестових експериментальних даних.

На проміжних етапах побудови макромоделі можна контролювати її точність, тоді як під час загальної побудови точність отриманої моделі відома лише після завершення процесу її створення. В якості ефективних підходів для розв'язання оптимізаційних задач використовувались стохастичні методи оптимізації: хаотичного пошуку, алгоритми з парною пробою чи перерахунком, випадкового спуску, хаотичного пошуку зі змінним законом розподілу, напрямної сфери та напрямного конуса Растрігіна. Серед згаданих методів під час побудови макромоделей найкращі властивості показав метод напрямного конуса Растрігіна.

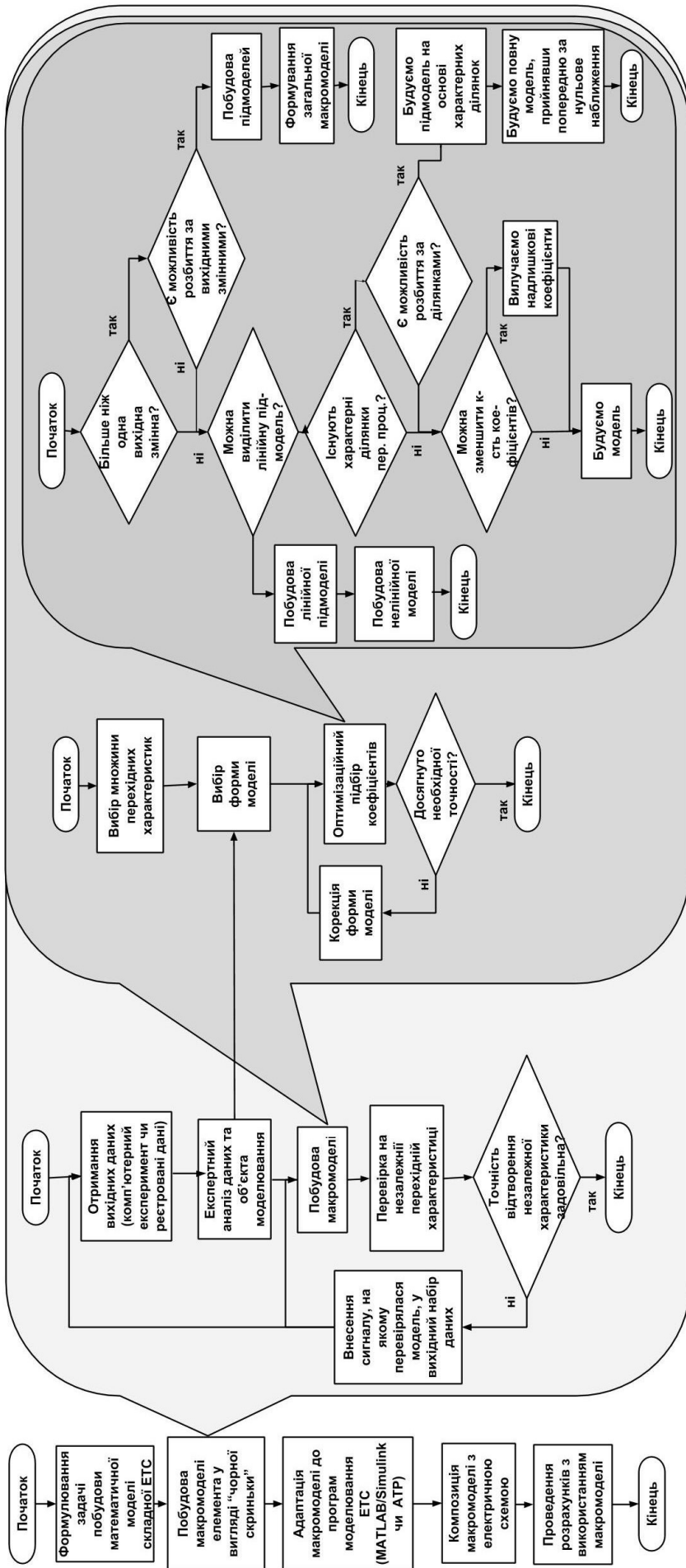


Рис. 3. Удосконалений алгоритм побудови математичних моделей ЕТС на основі макромоделей у вигляді “чорної скриньки”

Діакоптика динамічних кіл (чи, умовно, динамічна діакоптика) як окремий розділ теорії електричних кіл передбачає розгляд динамічних процесів у колах шляхом їх розбиття на частини, що розглядаються окремо. Досі домінують два підходи.

Перший базується на застосуванні алгоритмів діакоптики з використанням відомих формальних представлень  $L$  і  $C$ -елементів на кожному часовому кроці інтегрування наближеними дискретними резистивними схемними моделями та їх подальшого розрахунку частинами. Другий підхід, який отримав подальший розвиток у роботі, передбачає формування рівнянь стану для кожної підсистеми окремо. Вплив решти підсхем враховується на кожному кроці інтегрування фіктивними джерелами, параметри яких визначаються станом усього кола в попередній момент часу. Під час розрахунку динамічних режимів електричних кіл за допомогою запропонованого підходу окремі підсхеми навантажені джерелами струму чи напруги, що імітують їхні взаємозв'язки, розраховуються окремо. Після певного часу розрахунку здійснюється процедура узгодження підсхем, яка полягає у коригуванні параметрів зовнішніх джерел енергії згідно зі законами Кірхгофа.

У **третьому розділі** розглянуто проблеми інтеграції математичних моделей і макромоделей елементів електричних кіл і систем у сучасні програмні засоби розрахунку їх динамічних режимів. Розглянуто моделі елементів електричних кіл і ЕТС (джерел живлення, ліній електропересилання, трансформаторів і вузлів навантаження). Показано складність побудови еквівалентних математичних моделей складних електротехнічних систем і доцільність застосування макромодельовання з подальшою адаптацією до відповідних програмних засобів.

Найпоширенішими й вживаними програмами аналізу перехідних процесів є програми типу EMTP такі як: ATP (Alternative Transient Programme), EMTP, PSCAD, NETOMAC і з іншими принципами функціонування (SIMSEN, Paladin Software, MATLAB/Simulink тощо), які орієнтовані для використання на однопроцесорних комп'ютерах. Бібліотеки цих програм містять більшість базових елементів електричних кіл, проте до кінця не вирішеною проблемою залишається розрахунок їхніх параметрів і характеристик намагнічення магнітопроводів. Тому пропонується розроблення та застосування моделей елементів у вигляді "чорної скриньки" (макромоделей), які будуються на підставі залежностей тільки зовнішніх змінних стану досліджуваних об'єктів з їх подальшою інтеграцією в бібліотеки використовуваних середовищ. На основі критичного аналізу програмних засобів до яких доцільно адаптовувати математичні макромоделі в формі змінних стану, вибрано MATLAB/Simulink як стандарт математичного модельовання і програма ATP як засіб інженерних розрахунків.

Середовище MATLAB/Simulink містить потужні засоби програмування, які надають можливість створення бібліотек власних моделей елементів електричних кіл і систем різного рівня складності шляхом програмування та використання спеціальних функцій. Спеціалізована програма ATP також містить бібліотеки

відповідних елементів, які можуть бути доповнені математичними моделями, що створені користувачем за допомогою мови програмування MODELS, яка є спеціалізованим засобом програмування цього середовища, що орієнтоване на моделювання динамічних систем.

**Четвертий розділ** присвячено збиранню й обробленню апріорної інформації, необхідної для побудови моделей у вигляді "білої" та "сірої" скриньок, а також математичних макромоделей 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; вимірність вектора змінних стану; кількість попередніх дискрет вхідних даних, які враховуються під час розрахунку наступної дискрети тощо.

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 макромоделей ЕТС і їхніх елементів. Описано методи експертного аналізу (методи експертних оцінок), види отримуваної інформації на його основі й аспекти їх застосування з погляду побудови макромоделей елементів електротехнічних систем. Застосування експертного аналізу дозволяє на підставі якісного оцінювання наявної інформації сформулювати та вирішити задачу побудови адекватної математичної моделі (вибір структури та параметрів моделі).

Запропоновано застосовувати експертний аналіз у якості діагностичного засобу для визначення структури макромоделі на основі апріорної інформації (якісного характеру перехідних характеристик і їх числових значень), відомої про об'єкт. Сформульовано пряму задачу експертного аналізу, суть якої полягає у визначенні форми та виду макромоделі. Показано можливість розв'язання оберненої задачі – визначення виду та структури досліджуваного об'єкту за формою макромоделі та числовими значеннями її коефіцієнтів.

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

У **п'ятому розділі** запропоновано процедуру та наведено результати практичної побудови дискретних макромоделей конкретних елементів і об'єктів електротехнічних систем, як з розподіленими, так і зосередженими параметрами на основі розробленого алгоритму їхньої ідентифікації.

В якості тестових взірців вибрано елемент з розподіленими параметрами (лінія електропередавання) й об'єкт електротехнічних систем (підстанція). Лінія електропередавання є складним об'єктом з погляду моделювання в зв'язку з необхідністю врахування впливу електромагнітних процесів, теплових процесів (зміна в часі температури провідників), механічних процесів (напруження та коливання провідників, спричинені різними видами навантажень), які складно



враховувати через труднощі визначення параметрів, необхідних для побудови моделі.

Побудова дискретної макромоделі лінії електропередавання здійснювалась на основі перехідних характеристик, отриманих шляхом комп'ютерного експерименту під час симулювання математичної моделі однофазної лінії електропередавання, створеної в методі біжучих хвиль у такому вигляді:

$$u_1(t) - Z_c i_1(t) = (u_2(t - \tau) - Z_c i_2(t - \tau))e^{-\alpha\tau} + U(0)(1 - 1(t - \tau))e^{-\alpha t}, \quad (11)$$

$$u_2(t) + Z_c i_2(t) = (u_1(t - \tau) + Z_c i_1(t - \tau))e^{-\alpha\tau} + U(0)(1 - 1(t - \tau))e^{-\alpha t}, \quad (12)$$

де  $u_1, i_1, u_2, i_2$  – напруги і струми початку й кінця лінії відповідно,  $U(0)$  – напруга лінії в момент  $t = 0$ ,  $L, C, Z_c$  – індуктивність, ємність і хвильовий опір лінії електропередавання,  $\alpha$  – коефіцієнт загасання електромагнітних хвиль,  $\tau$  – тривалість поширення електромагнітних хвиль вздовж лінії,  $1(t - \tau)$  – одинична функція Гевісайда.

Моделювання лінії здійснювалось у середовищі MATLAB/Simulink як елемента електричної схеми, поданої на рис. 4, що містило в своїй структурі рівняння елементів джерела живлення, досліджуваної довгої лінії та навантаження.

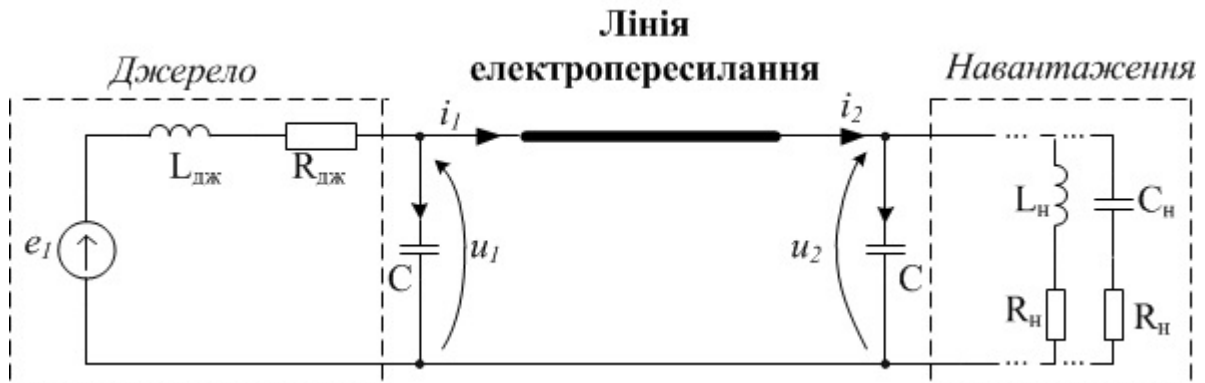


Рис. 4. Схема електричного кола для цифрового моделювання перехідних процесів лінії електропередавання

На основі запропонованої схеми отримано вхідні дані, які використано для побудови макромоделі досліджуваної лінії з такими параметрами:  $U_{nom} = 220$  кВ,  $l = 100$  км,  $L_0 = 951,7$  мкГн/км,  $C_0 = 11,9$  нФ/км,  $Z_c = 282,8$  Ом. З цією метою досліджено перехідні процеси під час вмикання лінії на постійну напругу в навантаженому (з різним навантаженням  $R_2 = Z_c, R_2 = 3 * Z_c, R_2 = Z_c / 3$ ) та неробочому режимах. Для її побудови розраховано декілька наборів перехідних характеристик для заниженої, нормальної та завищеної вхідної напруги ( $0,5 U_{nom}, U_{nom}, 1,1..1,5 U_{nom}$ ). Оскільки для отримання експериментальних даних з метою побудови дискретної макромоделі моделювання здійснювалось за допомогою методів зі змінним кроком, тому виконувався перехід до даних із сталим кроком шляхом інтегрування методом Ейлера. Це пов'язано з тим, що побудова дискретних макромоделей передбачає використання даних із сталим часовим кроком. Для побудови дискретної макромоделі лінії використано дані моделювання з кроком дискретизації  $t = 10^{-5}$  с.

Вхідними величинами під час побудови макромоделі лінії вибрано напругу  $u_1$  і струм  $i_2$ , а вихідними – струм  $i_1$  та напругу  $u_2$ . Практична побудова макромоделі виконана на основі оптимізаційного підходу за допомогою напрямного конуса Растрігіна з адаптацією параметрів пошуку.

Основною проблемою, яка виникає під час моделювання довгої лінії є принципова неможливість її описання за допомогою простого електричного кола зі зосередженими параметрами, що унеможливорює використання класичного запису макромоделі в формі змінних стану. У зв'язку з цим для побудови макромоделі лінії на основі експертного аналізу вибрано таку математичну форму її описання:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}^{(k-m)} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{v}^{(k)} + \Phi(\mathbf{x}^{(k-m)}, \mathbf{v}^{(k)}), \\ \mathbf{y}^{(k+1)} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}^{(k-m)} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{v}^{(k+1)}. \end{cases} \quad (13)$$

Це дало змогу довільно вибирати набір коефіцієнтів макромоделей і використовувати фактично доступні вхідні дані, не вдаючись у детальний аналіз фізичної суті процесу. У результаті отримано макромодель лінії електропересилання, що відрізняється від класичної моделі в формі змінних стану завдяки наявності змінної  $x^{k-35}$  у такому вигляді:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0.99 \\ -0.99 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}^{(k-35)} + \begin{pmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.2832 \end{pmatrix} \mathbf{v}^{(k)}, \\ \mathbf{y}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} 0 & 6.999 \\ 1977 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}^{(k-35)} + \begin{pmatrix} 0.003535 & 0 \\ 0 & -282.5 \end{pmatrix} \mathbf{v}^{(k+1)}. \end{cases} \quad (14)$$

Верифікацію отриманих результатів здійснено шляхом порівняння результатів моделювання лінії електропересилання на підставі її детальної моделі та макромоделі. На рис. 5 (а, б) зображено реакцію математичної моделі лінії та її макромоделі на вхідне збурення. На графіках відтворені координати процесу: струми подано в кА, а напруги – в МВ.

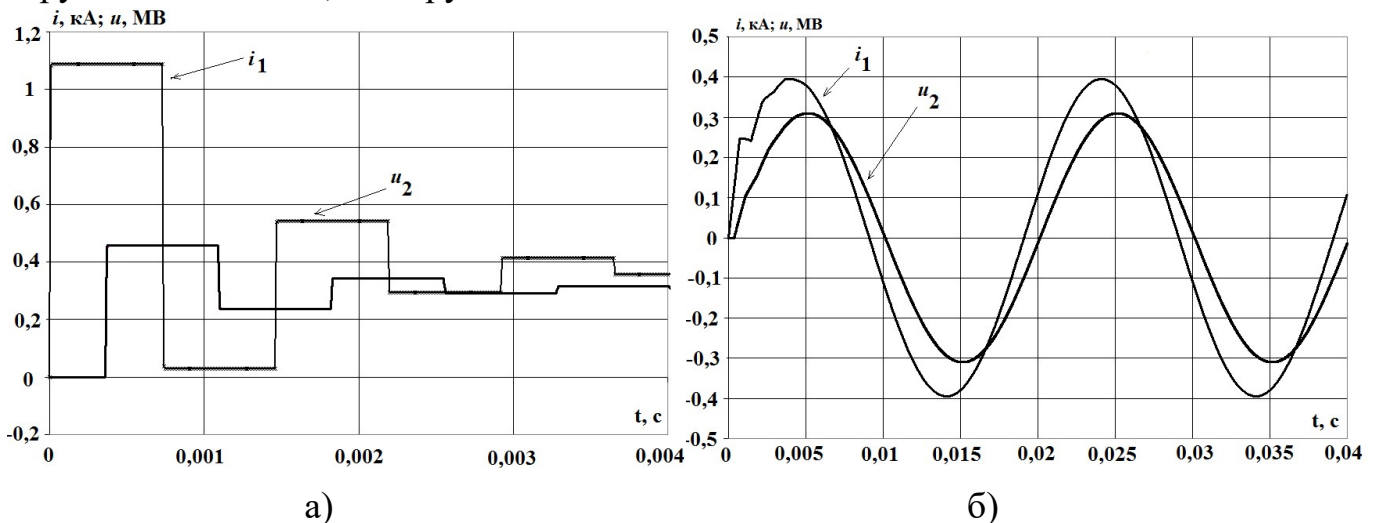


Рис. 5. Реакція математичної моделі лінії та її макромоделі на вхідний тестовий сигнал: а) на постійний сигнал б) на синусоїдний сигнал

Перевірено точність відтворення різних режимів лінії електропересилання за допомогою розробленої макромоделі. У навантаженому режимі, за умови прикладання постійної напруги з різними значеннями, середньоквадратична похибка складала 0,3–0,4 %, синусоїдної – 0,1–1,3%.

Саме завдяки незначній зміні форми математичної макромоделі вдалось побудувати достатньо просту й адекватну модель лінії електропересилання скінченної довжини, відповідну формі запису у вигляді звичайних диференціальних рівнянь.

Як приклад побудови макромоделі підстанції за принципом "чорної скриньки" взято енергоострів "Бурштин-Альбертірша". Цей об'єкт характеризується незначною кількістю вхідних і вихідних ліній, а саме: одна вхідна трифазна лінія й одна вихідна трифазна лінія. Таким чином його можна розглядати як 6-полюсник.

На підстанції за останніх декілька років за допомогою системи "Регіна" зафіксовано декілька аварій на лінії "Бурштин-Альбертірша" а саме: однофазне коротке замикання 22.07.2010 04:17; однофазне коротке замикання 18.05.2011 10:13; однофазне коротке замикання 05.12.2012 11:15 (2 спрацювання реєстру вальної апаратури з інтервалом у 8 секунд). В усіх випадках системою "Регіна" записані перехідні процеси на усіх 6-х полюсах цього об'єкта моделювання. Дані про перехідні процеси записувались протягом 6 секунд, включаючи 200 мс до виникнення аварії. Крок дискретизації – 1 мс. За вхідні величини під час побудови макромоделі вибрані миттєві значення вхідних фазних напруг:  $u_{a1}$ ,  $u_{b1}$ ,  $u_{c1}$  і миттєві значення вихідних лінійних струмів:  $i_{a2}$ ,  $i_{b2}$ ,  $i_{c2}$ ; за вихідні величини – миттєві значення вхідних лінійних струмів:  $i_{a1}$ ,  $i_{b1}$ ,  $i_{c1}$  та миттєві значення вихідних фазних напруг:  $u_{a2}$ ,  $u_{b2}$ ,  $u_{c2}$ . Макромодель будувалася в формі дискретних рівнянь змінних стану (8).

Вимірність вектора змінних стану було обмежено трьома елементами. Для ідентифікації коефіцієнтів макромоделі використовувався оптимізаційний підхід. Визначення коефіцієнтів моделі в цьому підході базується на мінімізації деякої функції мети  $Q(\vec{\lambda})$ , яка відображає відхилення поведінки модельованого об'єкта, розрахованої за допомогою побудованої моделі від експериментальних даних, які використані для її побудови. Множина перехідних процесів, на основі яких розраховується функція мети, вважається сталою. Оскільки об'єкт моделювання в першому наближенні можна вважати лінійним, то побудова макромоделі здійснювалася в 2 етапи. На першому етапі побудовано лінійну модель (9). Для знаходження мінімуму функції мети використовувався алгоритм напрямного конуса Растрігіна з адаптацією довжини кроку пошуку та кута його розкриття, процедурою швидкого проходження пологих ділянок і виходу з локальних мінімумів. Похибка отриманої лінійної моделі на тестових перехідних процесах склала 8,4%.

На другому етапі здійснювалося уточнення макромоделі шляхом уведення нелінійних коефіцієнтів. Цей об'єкт моделювання можна вважати таким, що

характеризується непарністю характеристик. Тому в разі використання поліному для апроксимації нелінійних характеристик доцільно врахувати лише кубічні члени. Для подальшого зниження кількості можливих коефіцієнтів макромоделі та спрощення її ідентифікації вважалося, що функція  $\Phi$  залежить лише від компонентів вектора змінних стану, тобто має такий вигляд:

$$\Phi_i(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}) = \sum_{j,k,l} \alpha_{ijkl} \vec{x}_j^{(k)} \vec{x}_k^{(k)} \vec{x}_l^{(k)}. \quad (15)$$

Ідентифікація нелінійних коефіцієнтів моделі здійснювалася з використанням того ж оптимізаційного алгоритму. Похибка отриманої моделі на тестовому сигналі склала 7,4%. Порівняння параметрів лінійної та нелінійної макромоделей енергострова “Бурштин-Альбертірша” наведено в табл. 1. Той факт, що введення нелінійних коефіцієнтів не дозволило значно покращити точність отриманої моделі свідчить, що вплив нелінійностей є незначним.

Таблиця 1. Параметри лінійної та нелінійної макромоделей енергострова

Модель	Кількість коефіцієнтів	Середньоквадратична похибка	Максимальна відносна похибка
Лінійна	81	8,4%	9,8%
Нелінійна	111	7,4%	9,0%

Якщо об’єкт моделювання вважати лінійним, а також припустити, що під час оптимізації знайдено глобальний мінімум (тобто побудована лінійна модель є дійсно оптимальною моделлю третього порядку), то відхилення мало б бути меншим за 8%. Це може бути зумовлено такими причинами:

- 1) об’єкт моделювання має вищий порядок, і тому для отримання точнішої моделі в такому разі слід збільшити її вимірність, тобто кількість компонентів вектора змінних стану;
- 2) об’єкт моделювання змінився між зареєстрованими аваріями, тому некоректно вимагати, щоб усі аварії описувалися однією моделлю.

На практиці спроба побудувати точнішу модель цього об’єкта шляхом підвищення вимірності моделі не спричиняла суттєвого покращення її точності. Проте, якщо побудувати моделі окремо для перших двох аварій (22.07.2010 р. і 18.05.2011 р., модель №1) й для інших двох аварій (пара аварій 05.12.2012 р., модель № 2), то кожна з моделей уже в лінійному варіанті описує процеси з точністю дещо кращою за 4% (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняння точності результатів моделювання лінійної та нелінійної макромоделі

Модель	Середньоквадратична похибка для першої аварії з пари	Середньоквадратична похибка для другої аварії з пари	Середньоквадратична похибка для обох аварій
Модель №1	3,1%	3,6%	3,4%
Модель №2	2,5%	2,3%	2,4%

Таким чином, результати побудови макромоделі енергоострова "Бурштин-Альбертірша" за принципом "чорної скриньки" на підставі даних про аварії, записаних системою "Регіна", свідчать, що характеристики цього об'єкту дещо змінилися між 18.05.2011 р. і 05.12.2012 р. Фрагменти даних з коефіцієнтами отриманих моделей наведені в табл. 3. Порівняння результатів моделювання перехідного процесу на підставі створеної макромоделі № 1 з експериментальними даними наведено на рис. 6, де цифрами позначено: 1- $i_{a1}$ , 3- $i_{b1}$ , 5- $i_{c1}$ , 7- $u_{a2}$ , 9- $u_{b2}$ , 11- $u_{c2}$  – експериментально записані значення вихідних величин моделі, 2, 4, 6, 8, 10, 12 – відповідні їм величини, розраховані за допомогою моделі. Усі напруги подаються в мегавольтах, струми – в кілоамперах.

Таблиця 3. Коефіцієнти отриманих макромоделей

Значення		
Коеф.	Модель №1	Модель №2
F <sub>0,0</sub>	0.1921	0.5351
F <sub>0,1</sub>	-0.3517	-0.6586
F <sub>0,2</sub>	0.4112	0.5829
F <sub>1,0</sub>	-0.3981	0.3519
F <sub>1,1</sub>	1.2207	1.1434
F <sub>1,2</sub>	-0.2821	-0.1300
F <sub>2,0</sub>	0.1049	-0.0527
F <sub>2,1</sub>	0.4553	-0.3240
F <sub>2,2</sub>	0.4436	1.2671

Значення		
Коеф.	Модель №1	Модель №2
G <sub>0,0</sub>	-0.6303	-0.6641
G <sub>0,1</sub>	-0.9152	0.1243
G <sub>0,2</sub>	-0.5153	-0.0150
G <sub>0,3</sub>	0.0082	0.1470
G <sub>0,4</sub>	0.3746	0.1960
G <sub>0,5</sub>	-0.1210	0.0210
...	...	.....

Значення		
Коеф.	Модель №1	Модель №2
C <sub>0,0</sub>	0.6107	-0.0875
C <sub>0,1</sub>	-0.6526	-0.5239
C <sub>0,2</sub>	0.6749	0.4896
C <sub>1,0</sub>	-0.3074	-0.1232
C <sub>1,1</sub>	-0.3483	-0.3796
C <sub>1,2</sub>	0.2059	0.3476
C <sub>2,0</sub>	-0.8832	-0.3929
C <sub>2,1</sub>	1.0634	1.4362
C <sub>2,2</sub>	-1.1541	-1.5031
C <sub>3,0</sub>	0.3095	-0.4267
C <sub>3,1</sub>	0.0170	-0.3357
C <sub>3,2</sub>	-0.0068	0.2680
C <sub>4,0</sub>	1.2714	0.1181
C <sub>4,1</sub>	0.8555	-0.1302
C <sub>4,2</sub>	-1.0061	0.1461
C <sub>5,0</sub>	0.1686	0.2355
C <sub>5,1</sub>	0.4720	0.3180
C <sub>5,2</sub>	-0.5367	-0.2731
...	...	...

Значення		
Коеф.	Модель №1	Модель №2
D <sub>0,0</sub>	-1.4226	-0.6042
D <sub>0,1</sub>	0.1589	-0.7468
D <sub>0,2</sub>	1.4324	-0.2333
D <sub>0,3</sub>	-1.1113	-0.8670
D <sub>0,4</sub>	0.1396	-0.2982
D <sub>0,5</sub>	0.0271	0.4050
D <sub>1,0</sub>	3.8372	2.6931
D <sub>1,1</sub>	0.5551	-0.6937
D <sub>1,2</sub>	-2.4920	0.4709
D <sub>1,3</sub>	0.2554	-0.2266
D <sub>1,4</sub>	-0.9336	-0.3331
D <sub>1,5</sub>	0.3626	0.1269
D <sub>2,0</sub>	-1.0275	-1.2123
D <sub>2,1</sub>	0.0288	1.8366
D <sub>2,2</sub>	0.8195	0.4223
D <sub>2,3</sub>	0.2883	0.6755
D <sub>2,4</sub>	0.5596	-0.0612
D <sub>2,5</sub>	-1.3262	-0.8220
...	...	...

Пропоновані макромоделі можуть бути корисними під час схмотехнічного проектування як складові бібліотек математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем наукових досліджень, що дозволить оцінити наслідки можливих аварійних ситуацій.

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

У середовищі Simulink дискретну макромоделю запропоновано сформулювати шляхом програмування математичних виразів, що відповідні до структури нелінійної макромоделі з використанням Simulink-функції (S-функції, S-functions).

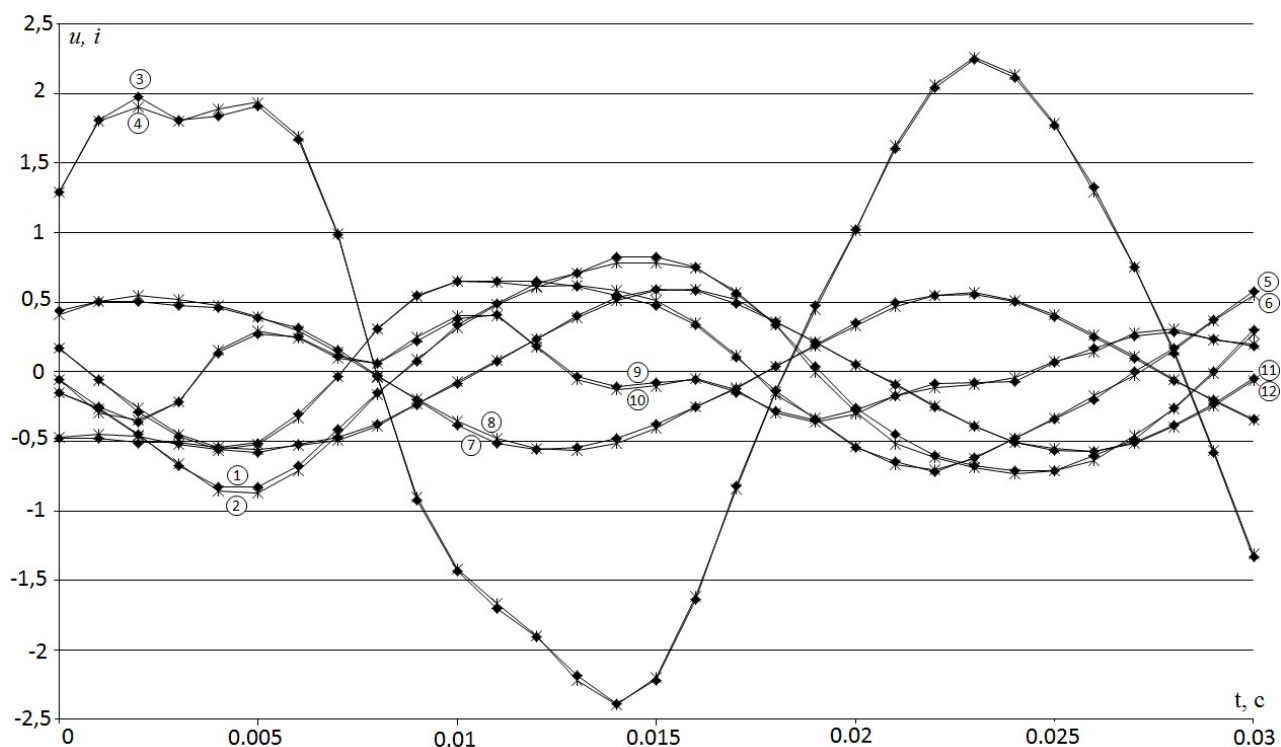


Рис. 6. Порівняння результатів моделювання перехідного процесу енергоострова на підставі створеної макромоделі з реєстрованими даними

За їх допомогою створено блок макромоделі об'єкта й під'єднано його до Simulink-моделі. Блоки на основі S-функцій не відрізняються від стандартного бібліотечного блоку Simulink і є дискретними S-функціями, що компілюються у виконуваний (\*.dll) файли. За рахунок цього забезпечується підвищена швидкість програмної реалізації моделей і подальше симулювання.

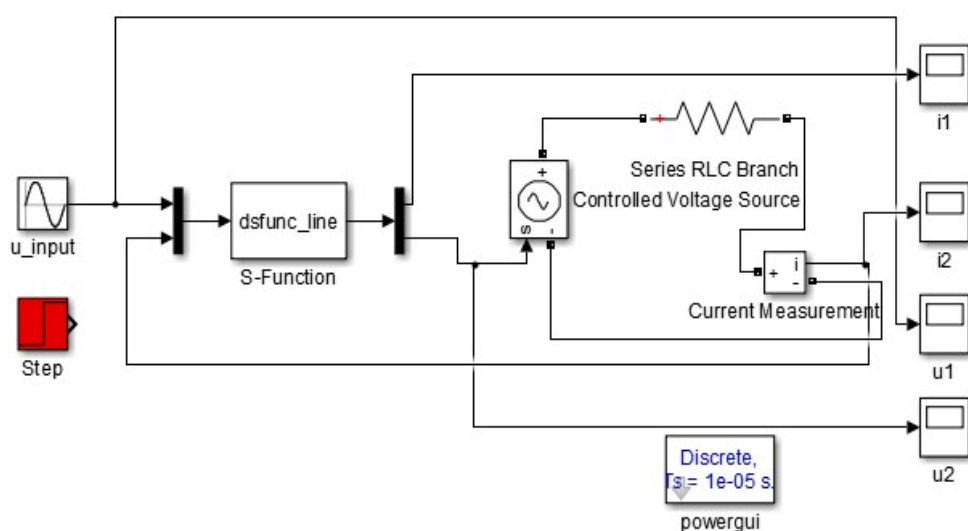


Рис. 7. Simulink – модель електричного кола з макромоделлю лінії електропересявання.

В якості прикладу можливості інтеграції в середовище Simulink дискретних макромоделей у вигляді “чорної скриньки” та тестування електричного кола, математична модель якого містить макромоделю у своїй структурі, здійснено адаптацію дискретної макромоделі лінії

електропересявання, розробленої в розділі 5.

Представлене на рис. 7 електричне коло з лінією електропересявання в своєму складі інтегровано в середовище Simulink у вигляді схеми, де моделі джерел і

навантаження є традиційними неперервними елементами, а модель лінії – дискретною макромоделлю, вбудованою за допомогою програмованого блоку S-функцій у вигляді елемента `dsfunc_line` і додаткового керованого джерела напруги `Controlled Voltage Source`.

Для введення решти елементів електричного кола та візуалізації отриманих результатів використано елементи з пакету інструментів `SimPowerSystem Blockset` середовища `Simulink` (блоки `Sine Wave`, `Step Signal` і `Series RLC Branch`, `Scope` та `Current Measurement`).

Під час моделювання значення параметрів елементів кола, а саме джерел і

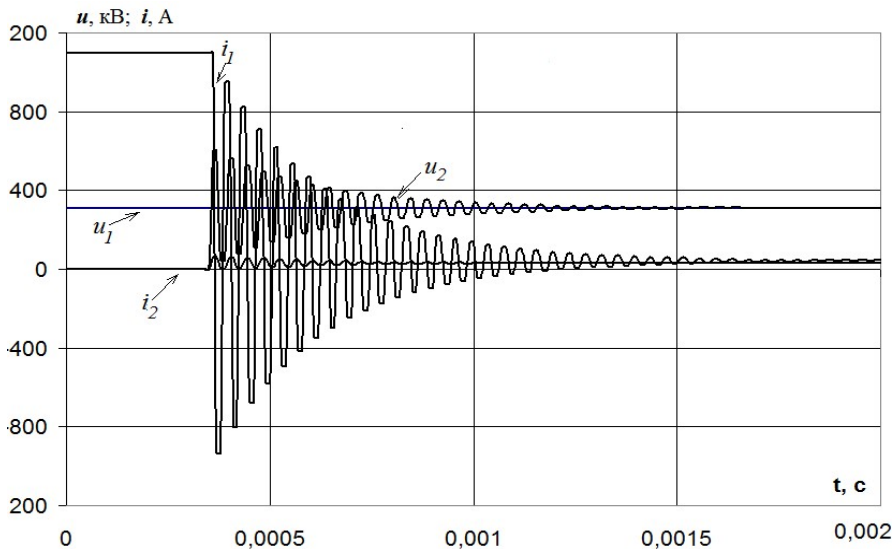


Рис. 8. Осцилограми перехідних процесів вмикання лінії на постійну напругу

навантаження відповідали використаним під час побудови дискретної макромоделі лінії електропересилання. Осцилограми перехідних процесів, отримані на основі дискретної макромоделі з використанням S-функцій, порівнювались з осцилограмами перехідних процесів, отриманих за допомогою моделі, реалізованої в методі біжучих хвиль. Порівняння осцилограм показало повну відповідність результатів моделювання.

Макромодельовання як спосіб дослідження динамічних режимів електричних кіл був реалізований також за допомогою програми АТР, яка надає можливість самостійного створення елементів чи навіть моделей підсистем шляхом вирішення задач, сформульованих користувачем (так званий `User Specified Problem (USP)`).

У програмах типу АТР/ЕМТР для розрахунків координат стану (струмів і напруг) застосовується метод вузлових напруг. Усі елементи кола з розподіленими та зосередженими параметрами формуються у вигляді джерел струму й опорів. Тому схема досліджуваного електричного кола може бути описана за допомогою матриці вузлових провідностей з використанням співвідношення, яке має такий вигляд:

$$\mathbf{GV} = \mathbf{J}, \quad (16)$$

де  $\mathbf{G}$  – матриця вузлових провідностей,  $\mathbf{V}$  – вектор вузлових напруг,  $\mathbf{J}$  – вектор вузлових джерел струму.

Для аналізу перехідних процесів у колах із зосередженими параметрами їх необхідно описати диференціальними рівняннями, дискретизованими відповідно до методу інтегрування трапеціями зі сталим часовим інтервалом  $\Delta t$ .

Для кола з  $n+1$  вузлами матриця  $\mathbf{G}$  є  $n \times n$  вимірною матрицею, а вектор  $\mathbf{J}$  описує відповідні та попередні значення стану джерел струмів.

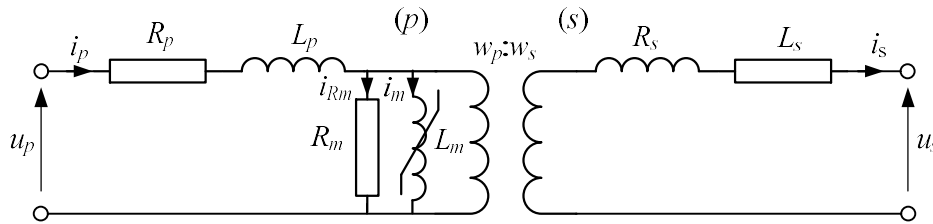


Рис. 9. Еквівалентна заступна схема однофазного трансформатора

3 метою описання такого підходу для побудови математичних макромоделей розроблено дискретну макромоделю однофазного трансформатора. Він еквівалентується наведе-

ною на рис. 9 заступною схемою. Така узагальнена модель використовується в бібліотеці елементів електротехнічних систем програми АТР. Магнітне коло описується вітками  $R_m$  і  $L_m$ , де резистором  $R_m$  можна знехтувати. Значення  $L_m$  розраховується за формулою (17):

$$L_m = \frac{d\lambda}{di_m} = \frac{S w_p^2}{l \alpha \beta} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{w_p}{l \alpha} i_m\right)^2}} \quad (17)$$

У типовій моделі трансформатора в середовищі АТР характеристика намагнічення подається у вигляді таблиці з кількома точками співвідношення:  $\lambda = f(i_m)$ . Нелінійна характеристика моделюється шляхом застосування кусково-лінійної апроксимації (так званий псевдо-нелінійний реактор (reactor Type-98). Параметри моделі:  $w_p=370$ ,  $w_s=180$ ,  $R_p=1\Omega$ ,  $R_s=0,2367\Omega$ ,  $L_p=0,0016$  Гн,  $L_s=3,7867E-4$  Гн,  $l=0,59$ м,  $S = 0,0025$ м<sup>2</sup>. Модель кола, підготовлену за допомогою графічного редактора ATPDraw, наведено на рис. 10. Трансформатор навантажено віткою з послідовно сполучених резистора та конденсатора  $R_L = 1000\Omega$ ,  $C_L = 31$ мкФ. Осцилограми струмів первинної та вторинної обмоток трансформатора, отримані за допомогою моделі АТР, показані на рис. 11.

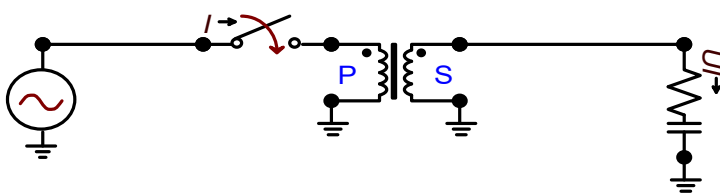


Рис. 10. ATPDraw модель однофазного трансформатора

Для реалізації дискретної макромоделі трансформатора використано програмований блок типу Type-94, який може представляти багатополосний елемент чи багатовузлову модель частини аналізованої схеми, підготовленої відповідно до підходу користувача USP. Блок належить до середовища модулів програми АТР і збільшує її можливості та функціональність. Модель елемента Type-94 створено з використанням мови MODELS. Як частина аналізованої схеми, описаний вище, багатополосний елемент повинен відповідати вимогам, що накладаються методом розв'язання (метод інтегрування трапеціями), вибраним відповідно до вузлового

методу розв'язання (метод інтегрування трапеціями), вибраним відповідно до вузлового



рівняння (16). Тому  $n$ -вузловий елемент представлений матрицею провідностей

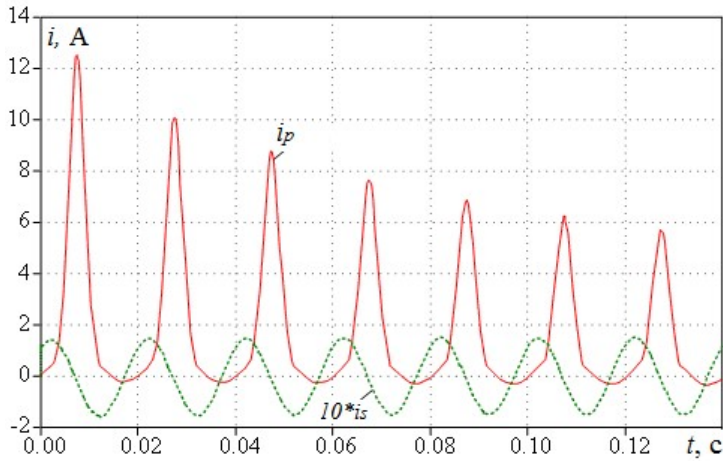


Рис. 11. Криві струмів первинної та вторинної обмоток трансформатора

вимірності  $n \times n$  та вектором вузлових напруг, який містить  $n$ -компонентів. Вони визначають значення вхідних величин на кожному часовому кроці моделювання.

Еквівалентна схема моделі цього трансформатора, створена за допомогою блоку типу Type-94, наведена на рис. 12. Модель приєднана до решти електричної схеми зліва чотирма вузлами з номерами 1..4 ( $n = 4$ ). З правого

боку вузли (5..8) виконують допоміжну роль, вони сполучені з базовим вузлом.

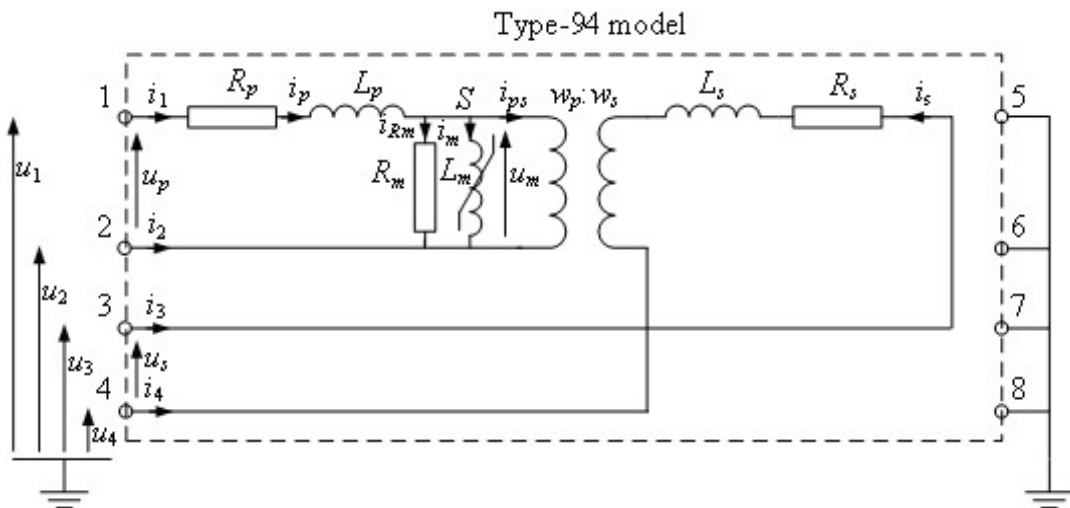


Рис. 12. Еквівалентна схема трансформатора, реалізована за допомогою моделі типу Type-94

Вхідні напруги на лівих вузлах розглядаються як напруги між парами відповідних двох бічних вузлів, наприклад  $u_1 = u_1 - u_5$ . Було створено динамічну внутрішню модель розглянутого трансформатора, яка визнає вихідний вектор:

$$\mathbf{i} = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4]^T \tag{18}$$

і матрицю провідностей (19):

$$\mathbf{G}_{1-4} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix} \tag{19}$$

У результаті цього формувався вхідний вектор вузлових напруг:

$$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T \tag{20}$$

і вектор історії процесу –  $\mathbf{hist}_{1-4}$ . Тому узагальнена функція, яка відображає поведінку

системи в формі “вхід-вихід” розглянутого 4-вузлового трансформатора може бути описана в такому вигляді:

$$(\mathbf{i}, \mathbf{G}_{1-4}) = g(\mathbf{u}, \text{hist}_{1-4}). \quad (21)$$

Для побудови макромоделі досліджуваного трансформатора диференціальні рівняння, які описують стан трансформатора, подано у вигляді таких співвідношень:

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p}(u_p - u_m) - \frac{R_p}{L_p}i_p, \quad (22) \quad \frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_m}u_m, \quad (23)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ps} \\ i_s \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} n_{sp}^2 & -n_{sp} \\ -n_{sp} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_m \\ u_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ps} \\ i_s \end{bmatrix}, \quad (24) \quad n_{sp} = \frac{w_s}{w_p}. \quad (25)$$

Останнє рівняння відповідає стану послідовно сполучених ідеального трансформатора та  $R_s$ ,  $L_s$  вітки. Напрямок струму  $i_s$  вибрано з урахуванням необхідності отримання симетричної матриці параметрів у рівнянні (24).

Для утворення замкненої системи рівнянь основну модель, записану у вигляді співвідношень (22)-(24), доповнено такими алгебричними рівняннями:

$$i_{Rm} = i_p - i_{ps} - i_m, \quad u_m = R_m i_{Rm}. \quad (26)$$

У другому рівнянні системи (26) закладено, що значення опору  $R_m$  є сталим, хоча його можна задати як нелінійне співвідношення. Диференціальне рівняння (23) є суттєво нелінійним у зв'язку з нелінійністю  $L_m$  (17). Остаточо, система рівнянь (22)-(24) з врахуванням співвідношення (17), визначає внутрішню модель досліджуваного 4-вузлового елемента типу Туре-94. Далі необхідно з'єднати внутрішні змінні зі змінними, присутніми на полюсах досліджуваного багатополосника. Вхідними величинами є:  $u_p = u_1 - u_2$ ,  $u_s = u_3 - u_4$ , а вихідними:  $i_1 = i_p$ ,  $i_2 = -i_p$ ,  $i_3 = i_s$ ,  $i_4 = -i_s$ . Для розв'язку диференціальних рівнянь моделі використано метод інтегрування трапеціями. Для рівняння (22) отримано таке дискретне співвідношення на кожному часовому кроці:

$$i_p(k) = G_p u_{pm}(k) + \text{hist}_p(k-1), \quad (27)$$

де:  $u_{pm} = u_p - u_m$ ,  $G_p = \frac{1}{s_t L_p + R_p}$ ,  $s_t = \frac{2}{\Delta t}$ , а  $\text{hist}_p(k-1) = G_p (u_{pm}(k-1) + (s_t L_p - R_p) i_p(k-1))$ .

Величина  $G_p$  в (27) є провідністю розглянутої вітки. Застосовуючи аналогічний метод до інших рівнянь моделі внутрішнього блоку, можна визначити елементи матриці провідності трансформатора.

З рис. 13 видно, що в моделі існує п'ять вузлів: 1-4 граничних вузлів і внутрішній вузол S. З вищенаведених міркувань сформовано матрицю, що містить 5-вузлів провідності для схеми та які зображені на цьому рисунку:

$$\mathbf{G}_{1-S} = \begin{bmatrix} G_{L_p R_p} & 0 & 0 & 0 & -G_{L_p R_p} \\ 0 & G_m + n_{sp}^2 G_{L_s R_s} & n_{sp} G_{L_s R_s} & -n_{sp} G_{L_s R_s} & -G_m - n_{sp}^2 G_{L_s R_s} \\ 0 & n_{sp} G_{L_s R_s} & G_{L_s R_s} & -G_{L_s R_s} & -n_{sp} G_{L_s R_s} \\ 0 & -n_{sp} G_{L_s R_s} & -G_{L_s R_s} & G_{L_s R_s} & n_{sp} G_{L_s R_s} \\ -G_{L_p R_p} & -G_m - n_{sp}^2 G_{L_s R_s} & -n_{sp} G_{L_s R_s} & n_{sp} G_{L_s R_s} & G_m + G_{L_p R_p} + n_{sp}^2 G_{L_s R_s} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

де:  $G_{L_p R_p} = \frac{1}{s_t L_p + R_p}$ ,  $G_{L_s R_s} = \frac{1}{s_t L_s + R_s}$ ,  $G_m = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{s_t L_m}$ ; причому відповідні рядки та стовпці матриць відносяться до вузлів: (1, 2, 3, 4, S).

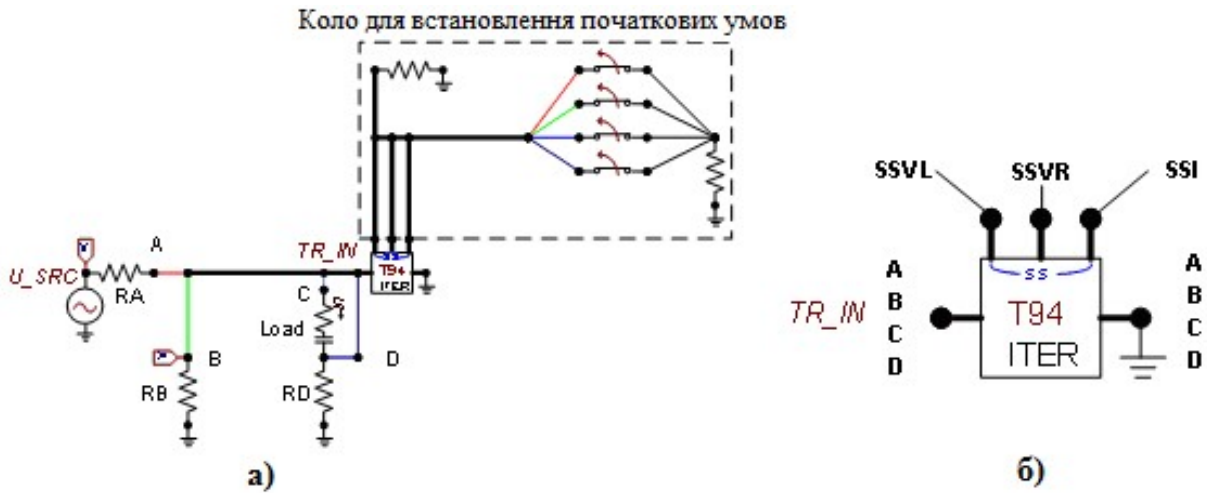


Рис. 13. ATPDraw модель трансформатора (а) та схематичне зображення блоку елемента типу Type-94 (б)

Оскільки досліджувана модель представлена у вигляді системи рівнянь (16) тільки за допомогою граничних вузлів, внутрішній вузол  $S$  повинен бути усунутий з вхідної матриці, вважаючи, що вхідний струм вузла  $i_S = 0$ . Це забезпечує умови для розрахунку напруги  $u_S$  у вузлі  $S$  відносно землі:

$$u_S = \frac{-1}{G_{SS}} \sum_{i=1}^4 G_{Si} u_i, \quad (29)$$

де  $u_{1-4}$  – напруги на відповідних граничних вузлах,  $G_{S1-4}$  – провідності віток між вузлами  $S$  та 1-4.

Нові елементи провідності редукованої матриці перераховуються за виразами  $\mathbf{G}_{1-4}^{(S)} = \frac{1}{G_{SS}} \mathbf{G}_{1-4}$ , де  $\mathbf{G}_{1-4}$  є симетричною матрицею з такими елементами:  $G_{12} = -G_{11}$ ,  $G_{11} = G_{L_p R_p} (n_{sp}^2 G_{L_s R_s} + G_m)$ ,  $G_{13} = -G_{L_p R_p} n_{sp} G_{L_s R_s}$ ,  $G_{14} = -G_{13}$ ,  $G_{22} = G_{11}$ ,  $G_{23} = G_{14}$ ,  $G_{24} = G_{13}$ ,  $G_{33} = G_{L_s R_s} (G_{L_p R_p} + G_m)$ ,  $G_{34} = -G_{33}$ ,  $G_{44} = G_{33}$ .

У такому разі напруга  $u_S$  може бути застосована для підставлення у вузлові рівняння. Це надає можливість побудови загального алгоритму з метою усунення внутрішнього (не граничного) вузла з моделі, яка розглядається.

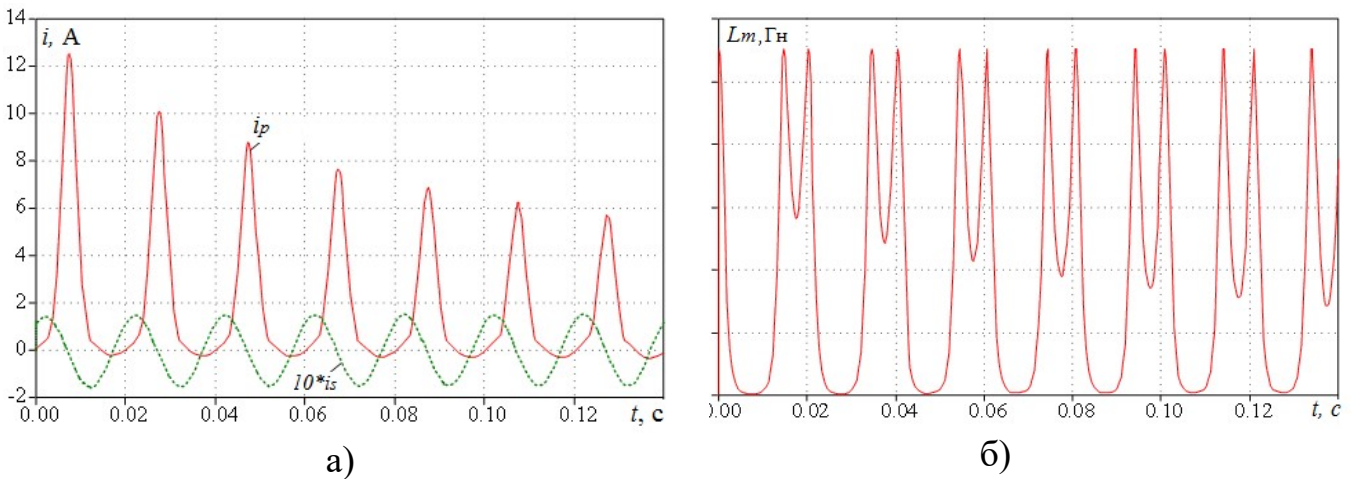


Рис. 14. Осцилограми перехідних процесів вмикання трансформатора:  
 а) струми первинної та вторинної обвиток трансформатора ,  
 б) динамічна зміна індуктивності  $L_m$  трансформатора

На основі сформованих рівнянь реалізовано макромодель трансформатора, створену за допомогою графічного редактора ATPDraw, яка подана на рис. 13. Осцилограми струмів первинної та вторинної обвиток трансформатора, отримані за допомогою макромоделі, показані на рис. 14 (а).

У **сьомому розділі** запропоновано використовувати макромоделювання як засіб прогнозування енергоспоживання. Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених цьому питанню, переважна їхня більшість не дозволяє урахувати склад, специфіку й технологічні особливості електроспоживачів, а також багаторівневу структуру енергоукомплектування та взаємозв'язок між різними його видами. Для забезпечення безперебійного й ефективного енергопостачання об'єктів, прогнозування як короткотермінового (від однієї до семи діб), так і довготермінового (річного) енергоспоживання є актуальною проблемою.

Для розрахунку очікуваного енергоспоживання використовують методи прогнозування, які можуть відтворювати та в перспективі прогнозувати енергоспоживання як детермінований процес чи процес з його ймовірнісним характером.

Здійснено аналіз математичних методів прогнозування, які поділяють на три групи: аналітичного, ймовірнісного прогнозування та методи статистичної класифікації, а саме це відображається в:

- 1) моделях часових рядів у яких навантаження моделюється як функція її спостережуваних у минулому значень (до них належать мультиплікативні авторегресійні, динамічні лінійні чи нелінійні моделі, порогові авторегресійні моделі зі застосуванням фільтрів Калмана тощо);
- 2) причинно-наслідкових моделях, де навантаження моделюється як функція деяких екзогенних факторів (на основі передатних функцій Бокса й Дженкінса, оптимізаційні моделі та моделі непараметричної регресії).

Альтернативою може стати математичне макромоделювання з використанням

дискретних автономних макромоделей у вигляді "чорної скриньки", оскільки вектор вхідних змінних у явному вигляді відсутній. Таке моделювання здійснюється на основі аналізу реєстрованих характеристик споживання енергії та його взаємозв'язку зі структурою досліджуваного об'єкту шляхом розв'язання однорідних диференціальних чи різницевих рівнянь стану у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}) \\ \vec{y} = \vec{g}(\vec{x}) \end{cases}, \quad (30) \quad \begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \vec{f}(\vec{x}^{(k)}) \\ \vec{y}^{(k+1)} = \vec{g}(\vec{x}^{(k)}) \end{cases}, \quad (31)$$

де  $\vec{x}$  – вектор змінних стану;  $\vec{y}$  – вектор вихідних змінних;  $\vec{f}(\cdot)$ ,  $\vec{g}(\cdot)$  – деякі вектор-функції.

Оскільки під час побудови моделі енергоспоживання вектор вхідних змінних явно відсутній, розглянемо випадок, коли початкове значення змінних стану модельованого об'єкта є ненульовим. Виберемо

форму описання макромоделей у вигляді (32):

де  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{C}$  – деякі матриці, а  $\Phi(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)})$  – нелінійна функція векторів  $\vec{x}$  і  $\vec{v}$ .

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(k)} + \Phi(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}) \\ \vec{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(k+1)} \end{cases} \quad (32)$$

Початковий стан модельованого об'єкта описується нульовою дискретою вектора змінних стану  $\vec{x}^{(0)}$ . Тому компоненти цього вектора повинні додатись до набору невідомих коефіцієнтів моделі  $\vec{\lambda}$ . Проте  $\vec{x}^{(0)}$  не можна просто ввести в набір параметрів моделі, оскільки для кожного динамічного процесу буде своє незалежне значення  $\vec{x}^{(0)}$ . Щоб урахувати цей чинник, треба розділити вектор невідомих коефіцієнтів  $\vec{\lambda}$  на дві частини: першу, в яку входять коефіцієнти, однакові для всіх процесів, і другу, з незалежним набором компонентів вектора  $\vec{x}^{(0)}$  для кожного процесу, що збільшує невідому кількість коефіцієнтів і ускладнює оптимізаційну задачу. У разі використання пропонованої макромоделі виникає проблема визначення нульової дискрети вектора  $\vec{x}$ , оскільки елементи цього вектора, зазвичай, безпосередньо не вимірюються експериментально, а визначаються через певні значення компонентів вектора вихідних змінних  $\vec{y}$ . У загальному це означає, що необхідно додатково знайти певну лінійну чи нелінійну залежність вектора  $\vec{x}^{(0)}$  від експериментально вимірюваних величин  $\vec{y}$ . Зокрема, в задачах прогнозування ця залежність будується як функція кількох перших дискрет вихідних величин:

$$\vec{x}^{(0)} = \vec{f}(\vec{y}^{(1)}, \vec{y}^{(2)}, \dots, \vec{y}^{(l)}), \quad (33)$$

де  $l$  – кількість дискрет, що використовують для знаходження нульової дискрети вектора  $\vec{x}$ .

Оптимізаційний підхід, завдяки універсальності щодо форми представлення макромоделі, може бути використаний для знаходження таких додаткових залежностей. Фактично це означає, що елементи вектора  $\vec{x}^{(0)}$ , які додані до набору

невдомих коефіцієнтів  $\vec{\lambda}$ , необхідно замінити на коефіцієнти виразу (32), тобто фактично ввести цей вираз у макромодель, яку ще необхідно побудувати. Якщо модель має вигляд (32), то отримаємо рівняння (34).

Побудова дискретних макромоделей прогнозування енергоспоживання є зручним підходом для створення математичних моделей, призначених для прогнозів короткотермінового енергоспоживання, оскільки вони не потребують статистичного накопичування даних протягом тривалого періоду. З метою перевірки запропонованого підходу побудовано макромодель добового енергоспоживання енергорайону ПС-Яворів 330 кВ. Для побудови автономної макромоделі цього об'єкту використано дані за 2016–2017 роки, з яких графіки добового енергоспоживання за два тижні січня 2016 року наведено на рис. 15.

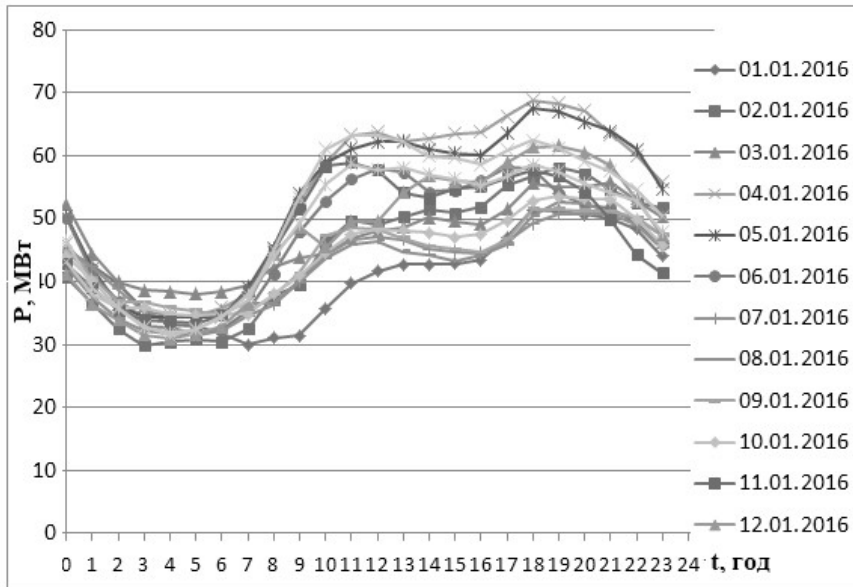


Рис. 15. Подобове енергоспоживання ПС-Яворів 330 кВ, січень 2016 року

електроенергії в довільно вибраних часових відліках, а саме об 11-й, 16-й і 20-й годинах. Таким чином вираз (33) запишеться у вигляді співвідношення (36).

У результаті проведення оптимізації, виявлено, що точність отриманої моделі залежить від вимірності вектора змінних стану. Зокрема з 4-ма компонентами цього вектора вдалося отримати достатньо точну модель.

Реакцію створеної макромоделі на вхідні дані протягом вибраної доби з масиву даних місяця, які використовувались для побудови макромоделі, зображено на рис. 16 (а).

Верифікація автономної макромоделі здійснювалась на незалежному наборі

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(k)} + \vec{\Phi}(\vec{x}^{(k)}) \\ \vec{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(k+1)} \\ \vec{x}^{(0)} = \vec{f}(\vec{y}^{(1)}, \vec{y}^{(2)}, \dots, \vec{y}^{(l)}) \end{cases} \quad (34)$$

Дискретну макромодель енергоспоживання цього об'єкту побудовано у вигляді співвідношення:

$$\begin{cases} \vec{x}^{(i+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(i)}, \\ \vec{y}^{(i+1)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(i+1)}. \end{cases} \quad (35)$$

Макромодель створювалась на основі добового енергоспоживання протягом одного місяця. Початкове значення змінних стану визначалося на основі лінійної залежності від рівня споживання

$$\vec{x}^{(0)} = \mathbf{S} \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{16} \\ y_{20} \end{pmatrix} \quad (36)$$

даних. Для цього використано дані енергоспоживання за лютий 2016 року. Результати верифікації для довільно вибраного дня місяця наведено на рис. 16 (б).

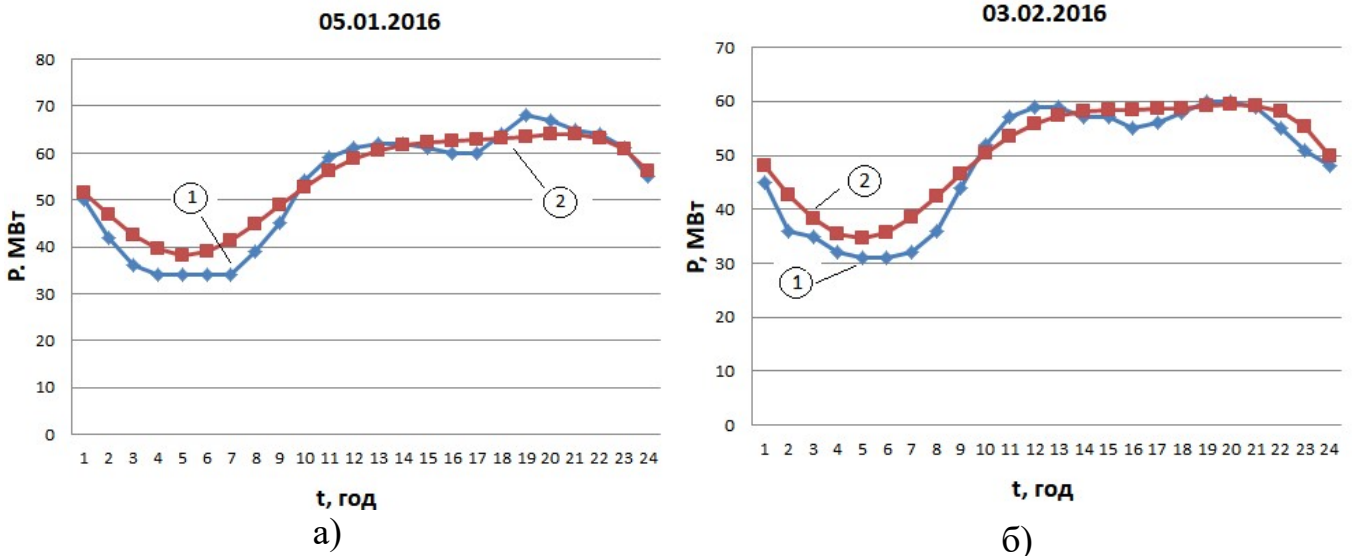


Рис. 16. Вхідні дані та відгук макромоделі короткотермінового прогнозування енергоспоживання (крива (1) – графіки добового енергоспоживання, використані для побудови моделі, крива (2) – відгук створеної макромоделі):

- а) вхідні дані та реакція на сигнал, використаний для побудови, січень 2016 р.  
 б) вхідні дані та реакція на незалежний тестовий сигнал, лютий 2016 р.

Як приклад довгострокового енергоспоживання побудовано дискретну автономну макромоделю річного енергоспоживання ПАТ "Київенерго" за 2007 рік. Середньоквадратична похибка моделі складає 6 %. На рис. 17 зображено криві фактичного річного споживання й одержані за допомогою макромоделі.

Отримана модель має 19 ненульових коефіцієнтів, 4 компоненти вектора змінних стану й квадратичну нелінійність:

$$\begin{cases}
 x_1^{(k+1)} = 0.6166x_1^{(k)} + 0.8x_4^{(k)} \\
 x_2^{(k+1)} = 1.001x_2^{(k)} - 7.79 \cdot 10^{-4} x_1^{(k)}x_3^{(k)} - 7.6 \cdot 10^{-3} x_2^{(k)}x_4^{(k)} \\
 x_3^{(k+1)} = 0.3335x_3^{(k)} + 1.22 \cdot 10^{-3} \left(x_2^{(k)}\right)^2 - 0.1191x_2^{(k)}x_4^{(k)} + 0.4745x_2^{(k)}x_3^{(k)} \\
 x_4^{(k+1)} = -0.8109x_1^{(k)} + 0.6491x_4^{(k)} - 0.2054x_2^{(k)}x_3^{(k)} \\
 \bar{y}^{(k+1)} = 0.42x_1^{(k)} + 1.474x_2^{(k)} + 0.8777x_4^{(k)}
 \end{cases}
 \quad x^{(0)} = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 1.43 \\ -1.427 \\ 0.215 \end{pmatrix}
 \quad (37)$$

Аналіз отриманих результатів свідчить, що метод автономного макромоделювання є застосовним для прогнозування довготермінового енергоспоживання. Незважаючи на наявність суттєвого рівня шумів у вхідних даних, які спричинені випадковими факторами, точність відтворення процесу, який підлягав моделюванню макромоделлю, є досить високою, хоча отримана макромоделю є досить складною.

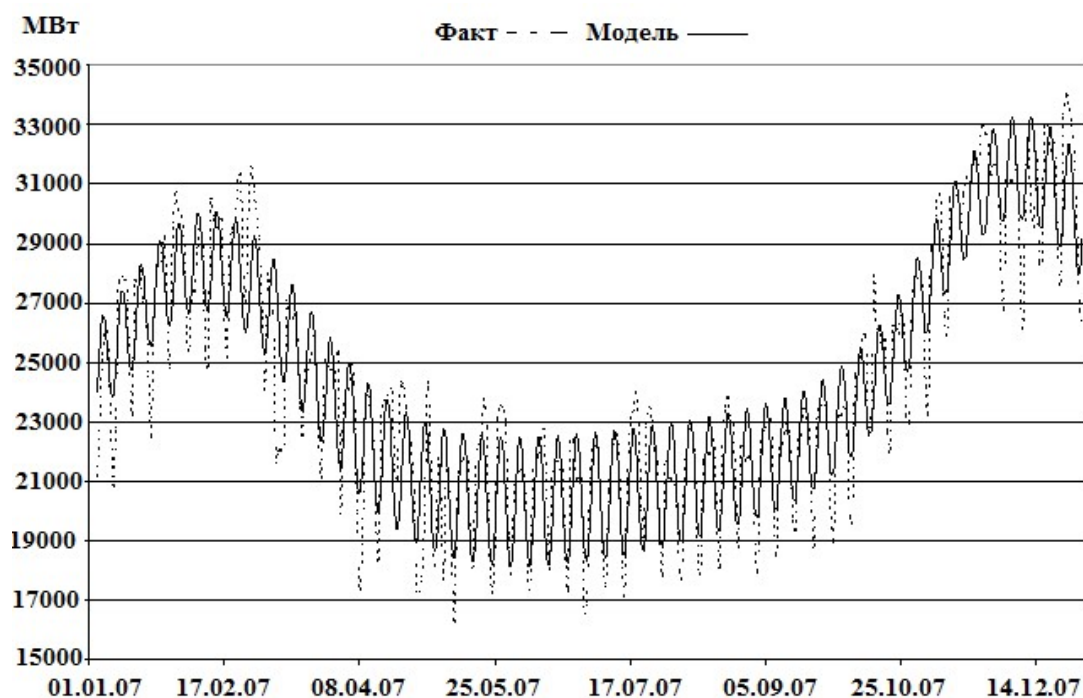


Рис. 17. Щодобове енергоспоживання ПАТ "Київенерго"  
(фактичне та відтворене за допомогою макромоделі).

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішена науково-прикладна проблема вдосконалення методів аналізу й синтезу математичних моделей електротехнічних систем і пристроїв на основі макромодельовання з метою створення математичних макромоделей складних електричних кіл і елементів ЕТС для покращення якості аналізу їхніх динамічних режимів і процесів.

1. Проаналізовано сучасний стан теорії динамічних систем, основні класи неперервних та дискретних моделей, що дозволило обґрунтувати доцільність вибору математичних методів макромодельовання як основи для дослідження динамічних режимів і перехідних процесів електричних кіл і електротехнічних систем.
2. З метою створення моделей для аналізу динамічних режимів складних ЕТС, які містять елементи зі зосередженими та розподіленими параметрами, запропоновано використовувати метод побудови макромоделей у вигляді “чорної скриньки” в формі дискретних рівнянь стану згідно запропонованого алгоритму.
3. Здійснено аналіз сучасних комп’ютерних програм і середовищ моделювання перехідних процесів складних електротехнічних систем, що дозволило вибрати середовища MATLAB/Simulink і ATP як основу для моделювання їхніх динамічних режимів з використанням дискретних макромоделей.
4. Запропоновано застосовувати експертний аналіз з метою визначення структури макромоделі на основі апріорної інформації (якісного характеру перехідних характеристик і числових значень координат), отриманої шляхом комп’ютерного експерименту чи реальних експлуатаційних даних, зареєстрованих апаратно-



програмними вимірювальними комплексами.

5. Розроблено спосіб розрахунку перехідних процесів у електротехнічних системах, який дозволяє використання макромоделей як компонентів аналізованих об'єктів з подальшою адаптацією до сучасних програмних середовищ.

6. Вперше створено дискретну математичну макромодель лінії електропересилання, що дозволяє здійснювати аналіз її динамічних режимів, з врахуванням фізичних процесів, які складно піддаються моделюванню відомими методами.

7. Вперше створено дискретну нелінійну математичну макромодель, яка адекватно відображає перехідні процеси енергоострова “Бурштин-Албертірша”, що дало можливість застосування макромодельовання як засобу аналізу складних ЕТС без урахування їхньої внутрішньої структури та визначення параметрів елементів, необхідних для побудови деталізованих математичних моделей.

8. Запропоновано спосіб формування дискретних макромоделей у середовищі Simulink за допомогою використання S-функцій шляхом програмування математичних виразів, відповідних до структури лінійної та нелінійної частин макромоделі, що надає можливість у подальшому створювати бібліотеку конкретних елементів електричних кіл і елементів електротехнічних систем.

9. Запропоновано спосіб побудови дискретних макромоделей багатополосних елементів у формі “вхід-вихід” у програмі ATP шляхом програмування відповідних рівнянь на мові MODELS модулів спеціального типу, що дозволяє розширити її можливості та створити бібліотеку макромоделей користувача.

10. На основі дискретного макромодельовання запропоновано метод прогнозування часових характеристик ЕЕС, що дозволило вперше розробити макромоделі коротко- та довготермінового прогнозування енергоспоживання у вигляді “чорної скриньки” в формі автономних дискретних рівнянь стану.

11. На основі розроблених макромоделей виконано аналіз динамічних режимів електричних кіл і ЕТС з врахуванням параметрів їхніх структурних елементів, які складно піддаються визначенню. Це дозволило здійснювати моделювання досліджуваних систем із високою точністю й адекватністю.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографія:*

Стахів П. Г., Козак Ю. Я., Гоголюк О. П. Дискретне макромодельовання в електротехніці та суміжних областях: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. 260 с.

### *Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Стахів П.Г., Гоголюк О. П. Побудова математичних моделей електричних систем в сучасних комп'ютерних середовищах. *Технічна електродинаміка, тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”*. Київ, 2004, Ч. 1. С. 125–128.
2. Стахів П.Г., Козак Ю. Я., Гоголюк О. П. Макромодель трехфазного силового трансформатора. *Электронное моделирование*. 2005. Т. 27, № 6. С. 91 – 100.

3. Стахів П.Г., Гоголюк О. П. Математичне моделювання електропересильні з неявно полюсними синхронними генераторами. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*. 2007. № 597. С. 166–171.
4. Стахів П.Г., Козак Ю. Я., Гоголюк О. П. Пришвидшений розрахунок перехідних процесів з використанням дискретних макромоделей компонент на прикладі електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка. тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки"*. Київ, 2008. Ч. 6. С. 17–21.
5. Гоголюк О. П. Математичне моделювання лінії електропересилання в сучасних комп'ютерних середовищах. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2009. № 654. С. 291 – 297.
6. Гоголюк О. П. Дослідження електропередачі в сучасних комп'ютерних середовищах. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2010. № 671. С. 24 – 31.
7. Стахів П. Г., Гоголюк О. П., Рендзіняк С. Й. Розрахунок перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області з використанням сучасних комп'ютерних середовищ. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ : зб. наук. пр. К., 2010. Спец. вип. С. 78 – 81.*
8. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Ієрархічне макромоделювання для розрахунку електроенергетичних систем. *Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ : зб. наук. пр. НАН України, Від-ня фіз.-техн. пробл. енергетики. К., 2011., Спецвип., ч. 2. С. 137 – 141.*
9. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Адаптація макромоделей електротехнічних систем та їхніх складових до програмних засобів моделювання перехідних процесів. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 29–30. (Scopus)
10. Стахів П.Г., Козак Ю. Я., Гоголюк О. П. Підвищення ефективності алгоритмів побудови макромоделей об'єктів електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 29–31. (Scopus)
11. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Стахів П. Г., Козак Ю. Я., Гоголюк О. П. Побудова дискретних макромоделей об'єктів електроенергетичних систем на підставі реальних експлуатаційних характеристик. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 77–86. (Scopus)
12. Stakhiv P., Hoholyuk O., Kozak Yu. Effectiveness Evaluation of Discrete Macromodelling to Forecast Power Consumption of Electric Power Systems Component Elements. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2016. Vol. 1. № 1. p. 45–48.
13. Hoholyuk O., Kozak Yu., Nakonechnyy T., Stakhiv P. Macromodeling as an Approach to Short-Term Load Forecasting of Electric Power System Objects. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2017. Vol. 7, No. 1. P. 25–32.
14. Hoholyuk O. Adaptation of Discrete Macromodels of Electric Transmission Lines to Modern Computer Tools. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2017, Vol. 7. No. 2. P. 83–86.

**Статті у наукових фахових виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз:**

15. Stakhiv P., Hoholyuk O. Mathematical modeling of transmission line transients in MATLAB/Simulink environment. *Acta Technica CSAV*, 2004. Vol. 49. P. 89 – 105. (Scopus)
16. Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models of transformers for electromagnetic transient process simulation. *Przegląd Electrotechniczny*. 2008. № 6. P. 278 – 280. (Scopus, Web of Science)
17. Stakhiv P., Rendzinyak S., Hoholyuk O. Modeling of Electric Power Systems Based on Diakoptic Approach and Parallel Algorithms in Modern Computer Tools. *Przegląd Electrotechniczny*. 2010. № 1. P. 115–117. (Scopus, Web of Science)
18. Stakhiv P., Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models and macromodels of electric power transformers. *Przegląd Electrotechniczny*. 2011. № 5. P. 163 – 165. (Scopus, Web of Science)
19. Byczkowska-Lipińska L, Stakhiv P., Hoholyuk O., Vasylychshyn I. Evaluation of discrete modeling efficiency of asynchronous electric machines. *Przegląd elektrotechniczny*. 2012. №3а. P. 58 60. (Scopus, Web of Science)
20. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Discrete mathematical macromodel of electric transmission line. *Przegląd Electrotechniczny*. 2013. № 4. P. 272 – 274. (Scopus)
21. Andriychuk M., Hoholyuk O. CPEE 2015 Sponsored by IEEE MTT/ED/AP/CPMT/SSCS-West Ukraine Chapter [Conference Reports] *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2016. Vol. 8, Issue 1. P. 60 – 61. DOI: 10.1109/MSSC.2015.2495858 (Scopus)

**Стаття в інших наукових періодичних виданнях:**

22. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Construction of macromodels of nonlinear dynamical systems using optimization. *Computational problems of electrical engineering*, Lviv Polytechnic National University. 2011. Vol. 1, No. 1. P. 95 – 102.

**Стаття в науковому періодичному виданні іншої держави:**

23. Bondarchuk A.S., Hoholyuk O.P., Shullie Iu. A comparative analysis of real dynamics of electric loading of housing microregion of city determined by modeling and normatives. *The Scientific Method*, Warszawa, Poland. 2018. No. 18. P. 23– 28.

**Публікації в матеріалах міжнародних конференцій:**

24. Stakhiv P., Hoholyuk O. Mathematical modeling of electrical transmission in MATLAB/Simulink environment. *Konferencja Naukowo-Techniczna SIECI'2004*. Wroclaw, Polska. 15–17 Września, 2004. s. 395 – 402.
25. Stakhiv P, Rendzinyak S., Hoholyuk O. Time-domain modeling of large-scale electric circuits by parallel methods. *Proceedings of Vth International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”*. (Zakopane, Poland, September 1–4, 2004). P.79 – 80.
26. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Математичне моделювання електропередачі в середовищі Matlab/Simulink. *Тези доп. ювілейної наук. конф., присвяченої 40-річчю*

- кафедри радіофізики. (Львів, Україна, 7–8 жовтня 2004 р.). Львів, 2004. С. 62 – 63.
27. Stakhiv P., Rendzinyak S., Korud A., Hoholyuk O. Analysis of electric circuits transient processes with components described by discrete parameters. *Proceedings of Seventh International Conference in Advanced Methods in The Theory of Electrical Engineering Applied to Power Systems AMTEE'05*. (Pilsen, Czech Republic, September 12-14, 2005). Pilsen, 2005. Part I. P. B37 – B41.
  28. Stakhiv P., Korud A., Hoholyuk O. Computer Modeling of Transient Processes of Elements with Distributed Parameters. *Proceedings of the International Conference TCSET'2006 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science"* (Lviv–Slavske, Feb. 28 – March 4, 2006). P. 125–126. (Scopus)
  29. Stakhiv P., Hoholyuk O. Electrical Transmission Transient Processes Simulation. *Proceedings of VII International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering"*. (Odessa, August 27 – 30, 2006). Odessa, 2006. P. 205–207.
  30. Stakhiv P., Hoholyuk O. Simulation of Electrical Transmission Transient Processes Using MATLAB. *Proceedings of III International Symposium "Modern Electric Power Systems"*. (Wroclaw, Poland, 6-8 September, 2006). Wroclaw, 2006. P. 447–452.
  31. Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models of transformers for electromagnetic transient process simulation. *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering"*. (Alushta, Crimea, September 16-20, 2008). Alushta, 2008. P. 17–19.
  32. Гоголюк О., Корецький Р., Пташник В. Дослідження ЕЕС на основі діакоптичного підходу та макромодельовання в сучасних комп'ютерних середовищах. *Матеріали міжнар. конф. молодих вчених EPECS'2009 "Енергетика та системи керування"*. (Львів, 14 –16 травня 2009). Львів, 2009. С.12 –13.
  33. Stakhiv P., Hoholyuk O. Methods of Macromodelling and Diakoptic for Creation of Mathematical Models of Electric Power Systems and Their Elements. *Proceedings of the International Conference TCSET'2010 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science"*. (Lviv–Slavske, February 23– 26, 2010). Lviv–Slavske, 2010. P. 315. (Scopus, Web of Science)
  34. Рендзіняк С., Гоголюк О., Самойлова С. Розрахунок перехідних процесів систем керування в електроенергетиці з використанням сучасних комп'ютерних середовищ. *Збірник тез II наук.-практ. конф. "Проблеми електроніки та інформаційні технології"*, (сmt. Чинадієво, Закарпатська обл., 2 – 5 вересня, 2010). сmt. Чинадієво, 2010. с. В17–В18.
  35. Stakhiv P., Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models and macromodels of electric power transformers. *Proceedings of XI-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" CPEE'2010*. (Lazne Kynzvalt, Czech Republic, September 13-16, 2010). Lazne Kynzvalt, 2010. P. 42.
  36. Рендзіняк С., Гоголюк О., Бугрин Ю. Розрахунок перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області діакоптичними методами. *Матеріали II –ої міжнар. конф. молодих вчених EPECS'2010 "Енергетика та системи*

керування”. (Львів, 25-27 листопада 2010). Львів, 2010. С. 76–77.

37. Byczkowska-Lipińska L, Stakhiv P., Hoholyuk O., Vasylychshyn I. Evaluation of discrete modeling efficiency of asynchronous electric machines. *Proceedings of International Workshop CPEE'2011 "Computational Problems of Electrical Engineering"*, Kostryna, Trans-Carpathian region, Ukraine, September 5 – 7, 2011, P. 37.
38. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Discrete mathematical macromodel of electric transmission line. *XIII-th International Workshop CPEE'2012 "Computational Problems of Electrical Engineering"*, Grzybow, Poland, September 5-8, 2012, p. 3.
39. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Usage of expert analysis for practical creation of macromodels of electrotechnical systems. *Proceedings of XII-th International Conference "Modern Problems of Radioengineering, Telecommunications and Computer Science"* (February 25 – March 1, 2014). Lviv-Slavske, 2014. P. 62 – 64.
40. Stakhiv P., Hoholyuk O. Macromodeling as an approach to improve the analysis of electric power systems and their elements. *Proceedings of 5th International Conference "Modern Electric Power Systems" MEPS'15*. Wroclaw, Poland, July 2-5, 2015. DOI: [10.1109/MEPS.2015.7477197](https://doi.org/10.1109/MEPS.2015.7477197) (Scopus, Web of Science)
41. Stakhiv P., Hoholyuk O. Macromodeling as an Alternative Approach for Electric Power Systems Modeling Using ATP and MATLAB/Simulink. *Proceedings of 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, September 2-5, 2015, Lviv, Ukraine. P. 200–203. DOI: [10.1109/CPEE.2015.7333375](https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333375) (Scopus, Web of Science)
42. Rosolowski E., Stakhiv P., Hoholyuk O. Prospects of Discrete Macromodels Usage for Calculation of Electric Power Systems Modes. *Proceedings of the XIII th International Conference TCSET'2016*, Lviv-Slavsko, Ukraine, Feb. 23–26, 2016. P. 55–57. DOI: [10.1109/TCSET.2016.7451966](https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7451966) (Scopus, Web of Science)
43. Rosolowski E., Stakhiv P., Hoholyuk O. Transformer Discrete Macromodel for Simulation in ATP-EMTP Programme. *Proceedings of the International Conference EPNET'2016 (Electric Power Networks)*, Szklarska Poręba, Poland, September 19-21, 2016. DOI: [10.1109/EPNET.2016.7999378](https://doi.org/10.1109/EPNET.2016.7999378) (Scopus)
44. Byczkowska-Lipinska L., Hamola O., Hoholyuk O., Kozak Yu. Adaptation of discrete macromodels for calculations in MATLAB/Simulink environment. *Proceedings of 2016 17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, (September 14-17, 2016, Sandomierz, Poland). Sandomierz, 2016. DOI: [10.1109/CPEE.2016.7738755](https://doi.org/10.1109/CPEE.2016.7738755) (Scopus, Web of Science)
45. Hamola O., Hoholyuk O., Kozak Ya. Stakhiv P. Comparing of effectiveness of transient processes calculation in electrotechnical devices using discrete models. *Proceedings of 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, (September 11-13, 2017, Kutna Hora, Czech Republic). DOI: [10.1109/CPEE.2017.8093046](https://doi.org/10.1109/CPEE.2017.8093046) (Scopus, Web of Science)
46. Stakhiv P., Hoholyuk O. Features of Calculation Procedures Used for Transient Processes Simulation in Electric Systems and Their Components Described by

## АНОТАЦІЯ

**Гоголюк О. П. Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на основі макромоделювання. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – Теоретична електротехніка.– Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної проблеми розвитку теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл і електротехнічних систем на основі поєднання методів теоретичної електротехніки, макромоделювання й експертного аналізу апріорної інформації.

Наведено класифікацію динамічних систем, детально описано їх неперервні та дискретні моделі, моделі “вхід-вихід” і у вигляді передатної функції. Розглянуто способи спрощення побудови математичних моделей, перспективи застосування макромоделей у вигляді "чорної скриньки" для аналізу динамічних режимів електричних кіл і електротехнічних систем.

Розглянуто процедуру побудови дискретних лінійних і нелінійних макромоделей та особливості застосування діакоптики з метою удосконалення макромоделювання елементів електротехнічних систем. Удосконалено універсальний алгоритм побудови дискретних макромоделей у вигляді “чорної скриньки” в формі змінних стану на основі апріорної інформації, отриманої під час експлуатації об’єктів з використанням експертного аналізу. Розглянуто способи розбиття побудови макромоделі на етапи й необхідності їх подальшої адаптації до сучасних комп’ютерних середовищ математичного моделювання динамічних режимів ЕТС.

Здійснено аналіз сучасних комп’ютерних програм моделювання перехідних процесів електротехнічних систем на одно- та багатопроекторних комп’ютерах. Розглянуто наявні математичні та комп’ютерні моделі й макромоделі елементів електричних кіл і електротехнічних систем із зосередженими та розподіленими параметрами. Описано особливості формування математичних моделей і макромоделей елементів електричних кіл і електротехнічних систем й обґрунтовано вибір оптимальних способів їх побудови.

Розглянуто способи одержання апріорної інформації про елементи електричних кіл і електротехнічних систем, методики її оцінювання, форми представлення та її коректну систематизацію. Описано методи експертного аналізу, види отримуваної інформації на його основі й аспекти їх застосування з погляду побудови макромоделей елементів електротехнічних систем. Адаптовано методи теорії експертного аналізу до побудови математичних макромоделей

електротехнічних систем й удосконалено підходи застосування критеріїв оцінювання якісних і кількісних характеристик динамічних режимів таких систем з метою вибору оптимальних множин перехідних характеристик, придатних для побудови макромоделей досліджуваних об'єктів.

Розглянуто проблему прогнозування перебігу перехідних процесів електротехнічних систем на підставі реальних часових характеристик координат динамічних режимів таких систем, отриманих шляхом реєстрації сучасними системами моніторингу. Для цього розроблено нові математичні макромоделі елементів електричних кіл, а також ЕТС у цілому. Уперше розроблено дискретну макромоделю лінії електропередавання у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану на підставі результатів комп'ютерного експерименту. Уперше розроблено дискретну макромоделю енергоострова у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану на підставі результатів моніторингу апаратно-програмним комплексом "Регіна". Розроблені макромоделі дозволяють описати складну електротехнічну систему для відтворення параметрів її процесів.

Запропоновано методи адаптації макромоделей до комп'ютерних засобів моделювання динамічних режимів електротехнічних систем до середовищ MATLAB/Simulink й АТР/ЕМТР. Створено необхідні компоненти програмного забезпечення, які необхідні для аналізу перехідних процесів електротехнічних систем з використанням розроблених макромоделей.

Уперше запропоновано використовувати математичні методи дискретного моделювання для побудови макромоделей прогнозування енергоспоживання без поетапного оброблення апріорної інформації. Це надало змогу здійснити як коротко- так і довготривале прогнозування енергоспоживання об'єктів. Побудовано дискретні макромоделі для коротко- та довготермінового енергоспоживання конкретних енергооб'єктів України та перевірено їх адекватність.

Здійснено апробацію розроблених моделей і макромоделей для дослідження динамічних режимів і процесів конкретних електротехнічних систем та показано доцільність їх використання.

*Ключові слова:* електричне коло, динамічний режим, перехідний процес, макромоделю, дискретна модель, метод змінних стану, експертний аналіз, прогнозування, оптимізація.

## ABSTRACT

**Hoholyuk O. P. The development of theory and methods for analysis of dynamic modes of electric circuits based on macromodeling.** – On the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.09.05 –Theoretical Electrical Engineering. – Lviv Polytechnic National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to solving of scientific and technical problem of the

theory and methods development for dynamic modes analysis of electric circuits and systems on the basis of a combination of methods of theoretical electrical engineering and discrete macromodeling with expert analysis of a priori information. The theoretical principles of electrotechnical systems modes analysis based on the electric circuit theory, macromodeling and diakoptics has been formulated.

Classification of dynamic systems is presented, their continuous and discrete dynamical systems models, models in the "input-output" and transfer function forms are described in details. The approaches how to simplify the creation of mathematical models, prospects of the macromodels in the form of the "black box" usage for the analysis of the electric circuits dynamic modes are considered.

The approach how to develop the discrete linear and nonlinear macromodels and features of the diakoptic principles applying in order to improve the procedure of macromodeling of the electric circuits elements are presented. A universal algorithm intended for construction of discrete mathematical macromodels using the "black box" technique in the form of state variables based on a priori information obtained in the process of real objects operation was developed based on the Delphi technique.

Analyses of modern computer programs used for modeling of the electric systems transients on the basis of single- and multiprocessor computers was carried out. Mathematical and computer models and macromodels of electrical circuits and systems were considered.

The approaches of a priori information obtaining about the elements of electrical circuits and electrical systems, methods of its evaluation, processing and correct systematization were analysed. The methods of the expert analysis theory were fit to the construction of mathematical macromodels of electrical systems. Application of the criteria of estimations of qualitative and quantitative characteristics of dynamic modes was improved in order to select the optimal sets of transient characteristics, suitable for construction of macromodels of such type objects.

The problem of the transient processes analysis of electrical systems based on real time characteristics obtained by their registration using modern SCADA systems was considered. The discrete macromodel of transmission line using the "black box" approach in the form of discrete state equations based on the computer experiment results was developed for the first time. The discrete macromodel of the electric substation based on the monitoring results registered by "Regina" software and hardware tools was developed. Developed macromodels allow to describe complex electrical system in order to analyse their transient processes.

The methods of adaptation of macromodels to modern computer simulation tools intended for practical analysis of electric systems operating regimes, namely the MATLAB/Simulink environment and ATP/EMTP program were proposed. All necessary software components using programming operators embedded into these environments required for the transient processes research in the electrical systems under analysis using created macromodels were developed.

For the first time it was proposed to use the discrete mathematical macromodeling technique for creation of models for the energy consumption forecasting without stage by stage processing of the a priori information. It made possible to carry out both short-and



long-term forecasting of power consumption of power facilities which are under exploitation in Ukraine

The adequacy verification and approbation of the developed mathematical models and macromodels for the study of specific electrical systems transient processes research was carried out.

Keywords: electric circuit, dynamic mode, transient process, macromodel, discrete model, state variables method, Delphi technique, forecasting, optimization.

## АННОТАЦИЯ

**Гоголюк О. П. Развитие теории и методов анализа динамических режимов электрических цепей на основе макроmodellирования.** – На правах рукописи.

Диссертация на получение научной степени доктора технических наук по специальности 05.09.05 – Теоретическая электротехника. – Национальный университет “Львовская политехника” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы развития теории и методов анализа динамических режимов электрических цепей и систем на основе объединения методов теоретической электротехники, макроmodellирования и экспертного анализа априорной информации. Сформулированы теоретические принципы анализа режимов электротехнических систем на основе теории электрических цепей, макроmodellирования и диакоптики.

Приведена классификация динамических систем, детально описаны непрерывные и дискретные модели, модели “вход-выход” и в виде передаточной функции. Рассмотрены способы упрощения создания математических моделей, перспективы применения макромоделей в виде “черного ящика” для анализа динамических режимов электрических цепей.

Рассмотрен подход построения дискретных линейных и нелинейных макромоделей и особенности применения диакоптики для улучшения процедуры макроmodellирования элементов электротехнических систем. Усовершенствован универсальный алгоритм построения дискретных макромоделей в виде “черного ящика” в форме переменных состояния на основе априорной информации, полученной во время эксплуатации объектов с использованием экспертного анализа.

Осуществлен анализ современных компьютерных программ моделирования переходных процессов электротехнических систем на одно- и многопроцессорных компьютерах. Рассмотрены математические и компьютерные модели и макромоделей элементов электрических цепей и электротехнических систем.

Рассмотрены способы получения априорной информации об элементах электрических цепей и электротехнических системах, методики ее оценивания, формы представления и ее корректную систематизацию. Адаптированы методы теории экспертного анализа к построения математических макромоделей

электротехнических систем и усовершенствованы подходы применения критериев оценивания качественных и количественных характеристик динамических режимов для построения макромоделей исследуемых объектов.

Рассмотрена проблема прогнозирования течения переходных процессов электротехнических систем на основании реальных временных характеристик, полученных путем их регистрации современными системами мониторинга. Впервые разработана дискретная макро модель линии электропередачи в виде "черного ящика" в форме дискретных уравнений состояния с использованием результатов компьютерного эксперимента. Впервые разработана дискретная макро модель энергоострова на основании результатов мониторинга аппаратно-программным комплексом "Регина". Разработанные макро модели позволяют описать сложную электротехническую систему для воспроизведения параметров ее процессов.

Предложены методы адаптации макромоделей к компьютерным средствам моделирования динамических режимов электротехнических систем к средам MATLAB/Simulink и ATP/EMTP. Созданы необходимые компоненты программного обеспечения, которые необходимы для анализа переходных процессов электротехнических систем с использованием разработанных макромоделей.

Впервые предложено использовать математические методы дискретного макро моделирования для построения макромоделей прогнозирования энергопотребления без поэтапной обработки априорной информации. Построены дискретные макро модели для коротко- и долгосрочного энергопотребления конкретных энергообъектов Украины.

Проверена адекватность и выполнена апробация разработанных моделей и макромоделей для исследования динамических режимов и процессов конкретных электротехнических систем.

*Ключевые слова:* электрическая цепь, динамический режим, переходной процесс, макро модель, дискретная модель, метод переменных состояния, экспертный анализ, прогнозирование, оптимизация.