

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГОГОЛЮК ОКСАНА ПЕТРІВНА

УДК 621.372.061: 519.87(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

**Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів
електричних кіл на основі макромоделювання**

05.09.05 – Теоретична електротехніка

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

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



(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант –
Стахів Петро Григорович,
д. т. н., професор

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

/В. І. Коруд/

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Гоголюк О. П. Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на основі макромоделювання. – Кваліфікаційна наукова праця 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.

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.

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 надає 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.

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

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 макромодельовання елементів електротехнічних систем. Детально описано алгоритм побудови лінійних неперервних макромоделей на основі частотних і часових характеристик.

Запропоновано використання оптимізаційного підходу до ідентифікації параметрів макромоделі. Основною проблемою, яка виникає під час побудови макромоделей елементів електричних кіл і ЕТС є значна 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.

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.

Процедура побудови макромоделі об'єктів включає 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.

Розглянуто способи розбиття побудови макромоделі на етапи й обґрунтовано необхідність 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 багатопроцесорних 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 електричних кіл і елементів 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. Побудова дискретної макромоделі лінії електропередавання здійснювалась на основі перехідних характеристик, отриманих шляхом комп'ютерного експерименту в середовищі MATLAB/Simulink під час симулювання математичної моделі однофазної лінії електропередавання, створеної в методі біжучих хвиль.

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. Завдяки одержаним шляхом макромоделювання перехідним характеристикам ЕТС і їхніх елементів, а також застосуванню експертного аналізу, можна виявити їх характерні особливості, що надасть можливість прогнозувати їхню динаміку.

Запропоновано методи адаптації макромоделей до комп'ютерних засобів моделювання динамічних режимів електротехнічних систем до середовищ MATLAB/Simulink й АТР/ЕМТР. Запропоновані підходи дозволяють розширити можливості розглянутих програм і створити бібліотеку макромоделей користувача.

Створено необхідні компоненти програмного забезпечення, які необхідні для аналізу перехідних процесів електротехнічних систем з використанням розроблених макромоделей. Дискретні макромоделі можливо адаптувати до середовища Simulink за допомогою використання S-функцій шляхом

програмування математичних виразів, відповідних до структури лінійної та нелінійної частин макромоделі. В якості прикладу інтеграції в середовище Simulink дискретних макромоделей у вигляді “чорної скриньки” та тес-тування електричного кола, математична модель якого містить макромодель у своїй структурі, здійснено адаптацію дискретної макромоделі лінії електропересялення. На основі отриманої моделі ЕТС “джерело живлення-лінія електропересялення-навантаження” здійснено аналіз перехідних процесів у різних режимах роботи системи.

У програмі АТР дискретні макромоделі багатополюсних елементів у формі “вхід-вихід” програмуються на мові MODELS за допомогою модулів спеціального типу. З метою опису такого підходу для побудови математичних макромоделей розроблено дискретну макромодель однофазного трансформатора. Для реалізації дискретної макромоделі трансформатора використано програмований блок типу Type-94, який є багатополюсним елементом чи багатовузловою моделлю частини аналізованої схеми, підготовленої користувачем відповідно до вимог, які накладаються середовищем АТР. Блок належить до середовища модулів програми АТР і збільшує її можливості та функціональність. Отримана модель у вигляді “джерело живлення-трансформатор-навантаження” була протестована у різних можливих режимах його роботи.

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.

Уперше запропоновано використовувати математичні методи дискретного макромодельовання для побудови макромоделей прогнозування енергоспоживання без постадійного оброблення апріорної інформації (автономне макромодельовання). Побудовано дискретні макромоделі для

коротко- та довготермінового енергоспоживання конкретних енергооб'єктів України та перевірено їх адекватність.

З метою перевірки запропонованого підходу побудовано макромодель добового енергоспоживання енергорайону ПС-Яворів 330 кВ. Як приклад прогнозування довгострокового енергоспоживання побудовано дискретну автономну макромодель річного енергоспоживання ПАТ "Київенерго" за 2007 рік. Аналіз отриманих результатів свідчить, що метод автономного макромодельювання є застосовним для прогнозування як короткотермінового, так і довготермінового енергоспоживання.

Здійснено апробацію розроблених моделей і макромоделей для дослідження динамічних режимів і процесів конкретних електротехнічних систем і показано доцільність їх використання. На основі розроблених макромоделей виконано аналіз динамічних режимів досліджуваних систем з урахуванням параметрів їхніх структурних елементів, які складно піддаються визначенню. Це дозволило здійснювати моделювання досліджуваних систем із високою точністю.

Ключові слова: електричне коло, динамічний режим, перехідний процес, макромодель, 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 the scientific and technical problem of the development of theory and methods for analyzing the dynamic modes of electric circuits and systems on the basis of a combination of methods of theoretical electrical engineering and discrete macromodeling with expert analysis of apriory information. The theoretical principles of mode analysis of electrotechnical systems based on the electric circuit theory, macromodeling and diakoptics have been formulated.

Development and improvement of the methods intended for analysis of dynamic modes and processes in electromagnetic circuits as elements of electrotechnical systems with the purpose to improve their technical and economical parameters or operation reliability is an important problem of modern electrical engineering.

Macromodeling is one of the possible approaches to solve the problem of dynamic modes modeling which in the case of its usage for construction of mathematical models of the systems under research provides a way to link together only the input and output variables (the rest of the variables can be removed from the description) and display only the most important characteristics of the simulated objects. Due to transient characteristics of electric systems and their elements obtained using macromodeling and expert analysis it is possible to detect their typical features that will enable forecasting of their dynamics. Usage of discrete macromodels of electrotechnical systems as a part of modern mathematical modeling methods with the purpose of forecasting of electrotechnical systems behaviour is an actual scientific approach to solve a complex task to improve operation and increase

reliability of electric power objects of Ukraine.

The goal of the thesis work is a development and improvement of theory and methods for the research of dynamic regimes of electrotechnical systems using mathematical methods of macromodeling and computer tools for analysis and forecasting of dynamic characteristics of electrotechnical systems.

The classification of dynamic systems is presented; the models of continuous and discrete dynamical systems, models of the "input-output" and transfer function forms are described in details. The approaches to simplifying the creation of mathematical models and prospects of using the "black box" macromodels for the analysis of the dynamic modes of electric circuits are considered.

The approach to developing the discrete linear and nonlinear macromodels and features of applying the diakoptic principles in order to improve the procedure of macromodeling of the elements of electric circuits. The algorithm of creation of linear continuous macromodels based on characteristics in frequency and time domain is described in details.

It is proposed to use the optimization approach for identification of the macromodel parameters. The main problem that occurs during construction of macromodels of electrical circuits elements and electric systems is a significant complexity of the optimization problem. It leads to the difficulties in selecting of the optimization algorithm, and increases the time required for its implementation. Therefore there is a need to simplify the optimization task and accelerate its computer implementation.

A universal algorithm intended for the construction of discrete mathematical macromodels using the "black box" technique in the form of state variables based on apriory information obtained in the process of operation of real objects was developed being based on the Delphi technique. The approaches to decomposition of the macromodels developing procedures on stages and necessity of their further adaptation to modern computer software of the electrotechnical systems simulation have been considered.

The procedure of the macromodel creation consists of five stages:

- 1) selection of a set of input and output data, form of the model under research defined using unknown coefficients that will allow to describe the object to be modeled;
- 2) creation of linear macromodel using optimization of its coefficients;
- 3) supplement of linear macromodel with nonlinear special form function;
- 4) conducting of final optimization of macromodel whereby all coefficients of the model should be optimized;
- 5) verification of nonlinear macromodel using independent set of the test data.

The approaches how to decompose the process of the macromodel creation on stages. The necessity of their further adaptation to simulation environments of the electric system dynamic regimes has been backgrounded.

The analysis of modern computer programs used for modeling of the transients of electric systems 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 features of the mathematical models and macromodels formation of the electric circuits and electric systems objects have been described. The choice of the optimal ways of their creation was backgrounded.

The approaches to obtaining apriory information 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 adapted to the construction of mathematical macromodels of electrical systems. Application of the estimation criteria 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 investigated objects.

The problem of analyzing the transient processes of electrical systems based on real time characteristics obtained by their registration with the use of modern SCADA systems was considered. The discrete macromodel of a 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. Construction of the discrete macromodel of transmission line was carried out based on the transient

characteristics obtained by computer experiment in MATLAB/Simulink environment using simulation of the mathematical model of single phase transmission line in travelling wave method.

The discrete macromodel of a power substation based on the monitoring results obtained by "Regina" software and hardware tools was developed. Developed macromodels allow describing complex electrical systems in order to analyze 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. These methods allow to enlarge possibilities of considered programs and create user-defined library of required macromodels.

All necessary software components using programming operators embedded into these environments required for the investigation of transient processes in the electrical systems under analysis with the use of created macromodels were developed. Discrete macromodels can be adapted to Simulink program using S-functions programming of the mathematical equations corresponding the linear and nonlinear parts of the macromodel. To show the possibility of integration of the discrete macromodels in the form of a "black box" into Simulink and testing of some electrical circuit, the mathematical model which includes macromodel in its structure, the adaptation of discrete macromodel of electric transmission line was carried out. On the basis of the received model of the electrotechnical system in the form "power source-electric transmission line-load" the analysis of transient processes in different operation modes was carried out.

In the ATP program discrete macromodels of multipolar components are formed using special programmable blocks. Proposed approaches make it possible to enlarge the possibilities of mentioned programs and create the library of specified macromodels. In order to describe such approach to create mathematical models the discrete macromodel of single-phase transformer was developed. In order to implement programmable block of Type-94 was used. It can describe the multipolar

element or multimodal model of some part of the system to be analyzed prepared according to requirements of the ATP program. The block belongs to the modules of ATP program and increases its possibilities and functionality. The resulting model in the form of "power supply-transformer-load" has been tested in different possible operation modes.

For the calculation of the expected power consumption the forecasting methods which can depict and forecast in the future power consumption as a deterministic process or the process of with probabilistic nature are used. The analysis of mathematical forecasting methods divided into three groups: the analytical, probabilistic forecasting and statistical classification methods were analysed.

For the first time it was proposed to use the discrete mathematical macromodeling technique for creation of models intended for forecasting of energy consumption without stage by stage processing of prior information. It made it possible to give both short- and long-term forecasts of power consumption by power facilities which are exploited in Ukraine.

In order to verify the proposed approach the macromodel of daily power forecasting of the power district served by substation "Yavoriv" of voltage 330 kV was developed. As an example of long-term power consumption forecasting the discrete autonomous macromodel of annual power consumption of "Kyivenergo" company for the 2007 year was carried out. Analysis of the results has shown that the method of autonomous macromodeling can be applied for the long-term power consumption forecasting.

The adequacy verification and approbation of the developed mathematical models and macromodels for the study of the transient processes of specific electrical systems was carried out and expediency of their further usage was shown. Based on the developed macromodels the analysis of their dynamic modes taking into account impossible for estimation parameters of their structural elements was carried out. It made it possible to conduct the simulation of systems under research with high adequacy.

Keywords: electric circuit, dynamic mode, transients, macromodel, discrete

model, method of state variables, Delphi technique, forecasting, optimization.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

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 НАН України: зб. наук. пр.* К., 2010. Спец. вип. С. 78 – 81.
8. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Ієрархічне макромодельовання для розрахунку електроенергетичних систем. *Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ : зб. наук. пр. НАН України.* 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, No. 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., Vasylchyshyn I. Evaluation of discrete modeling efficiency of asynchronous electric machines. *Przegląd elektrotechniczny*. 2012. №3a. 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. URL: DOI: 10.1109/MSSC.2015.2495858 (Scopus)

Стаття у 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 у 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 доповідей Ювілейної науков. гонф., присвяченої 40-річчю кафедри радіофізики*. Львів, Україна, 7 – 8 жовтня 2004 р. 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*, September 12-14, 2005. Pilsen, Czech Republic. 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"* (Feb. 28 – March 4, 2006), Lviv–Slavske, 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, Ukraine, August 27 – 30, 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. P. 447 – 452.

31. Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models of transformers for electromagnetic transient process simulation. *Proceedings of 9th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering"*, Alushta (Crimea), 2008, September 16-20, 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"*, 14 –16 травня 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, Ukraine February 23– 26, 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 науково-практичної конференції "Проблеми електроніки та інформаційні технології"*, смт. Чинадієво, Закарпатська обл., Україна, 2 – 5 вересня, 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. P. 42.
36. Рендзіняк С., Гоголюк О., Бугрин Ю. Розрахунок перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області діакоптичними методами. *Матеріали II-ої міжнародної конференції молодих вчених EPECS"2010 "Енергетика та системи керування"*, Львів, 25-27 листопада 2010 – с. 76 – 77.
37. Byczkowska-Lipińska L, Stakhiv P., Hoholyuk O., Vasylchyshyn 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, Poland, ISBN: 978-83-935801-4-9. (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. (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, February 23 – 26, 2016, Pages: 55 – 57. (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)*, Szekliarska 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. 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 Macromodels. *Proceedings of the XIV th International Conference TCSET'2018*, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 20 – 24, 2018. DOI: [10.1109/TCSET.2018.8336222](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336222) (Scopus, Web of Science)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	23
ВСТУП	24
РОЗДІЛ 1 ДИНАМІЧНІ МАКРОМОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	37
1.1. Математичні неперервні й дискретні моделі й макромоделі елементів електротехнічних систем	37
1.2. Неперервні моделі динамічних систем.....	42
1.3. Моделі "вхід-вихід" і у вигляді передатної функції.....	44
1.4. Дискретні динамічні моделі.....	47
1.5. Особливості ідентифікації динамічних систем.....	51
Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ МАКРОМОДЕЛЕЙ	61
2.1. Алгоритм побудови лінійної неперервної макромоделі на основі частотних характеристик	61
2.2. Алгоритм побудови лінійних неперервних макромоделей на основі часових характеристик	64
2.3. Дискретні макромоделі лінійних об'єктів.....	67
2.4. Дискретні макромоделі нелінійних об'єктів.....	69
2.5. Процедура побудови дискретних макромоделей.....	74
2.6. Особливості моделювання елементів електротехнічних систем на основі діакоптики та макромодельовання	81
Висновки до розділу 2.....	88
РОЗДІЛ 3 ІНТЕГРАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І МАКРОМОДЕЛЕЙ В СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	89
3.1. Порівняльний аналіз комп'ютерних програм моделювання перехідних процесів електротехнічних систем.....	89
3.2. Особливості, моделі й алгоритми комп'ютерних програм для моделювання електротехнічних систем	100
3.3. Засоби моделювання електротехнічних систем і їхня реалізація на одно- та багатопроцесорних комп'ютерах.....	118

3.4. Моделі і макромоделі елементів електротехнічних систем	122
3.5. Еквівалентні моделі складних електротехнічних систем	130
3.6. Проблеми і засади побудови математичних макромоделей елементів електротехнічних систем.....	136
Висновки до розділу 3	142
РОЗДІЛ 4 АПРІОРНА ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	144
4.1. Види та форми апріорної інформації для побудови макромоделей ЕТС на основі експериментальних даних.....	144
4.2. Апаратно-програмні комплекси реєстрації експериментальної інформації для побудови макромоделей електротехнічних систем і їх елементів.....	148
4.3. Експертний аналіз і його застосування для підготовки апріорної інформації з метою побудови макромоделей ЕТС і їх елементів	133
4.4. Аналіз інформації, отриманої на основі ідентифікації критичних режимів за перехідними характеристиками	155
Висновки до розділу 4	172
РОЗДІЛ 5 ПОБУДОВА ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	174
5.1. Дискретна макро модель лінії електропересилання	174
5.2. Побудова дискретних макромоделей складних об'єктів на основі результатів оперативного контролю	186
5.3. Побудова макромоделі об'єкта ЕТС на основі тестових даних, отриманих системою моніторингу й оперативного контролю	193
Висновки до розділу 5	202
РОЗДІЛ 6 АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ І НАЯВНИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ.....	203
6.1. Адаптація дискретних макромоделей до комп'ютерних	

середовищ моделювання перехідних процесів	203
6.2. Особливості адаптації макромоделей елементів електротехнічних систем до середовища MATLAB/Simulink та їх реалізація.....	207
6.3. Особливості адаптації макромоделей елементів електротехнічних систем до середовища ATP.....	215
6.4. Реалізація макромоделі трансформатора у середовищі ATP	220
6.5. Побудова макромоделі трансформатора в середовищі ATP з використанням блоку типу Type-94	225
6.6. Спрощена макромодель трансформатора на основі блоку типу Type-94	
6.7. Особливості використання макромоделей у сучасних комп'ютерних засобах	240
6.8. Композиція математичних моделей і макромоделей у комп'ютерних середовищах	244
Висновки до розділу 6	252
РОЗДІЛ 7 ЗАСТОСУВАННЯ МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ	254
7.1. Прогнозування енергоспоживання та методи його реалізації	254
7.2. Автономні макромоделі як засіб прогнозування енергоспоживання	262
7.3. Побудова макромоделей для прогнозування енергоспоживання на основі тестових даних систем моніторингу й оперативного контролю	267
Висновки до розділу 7	272
ВИСНОВКИ	273
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	275
ДОДАТКИ	305
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	306
ДОДАТОК Б Матеріали, які підтверджують використання результатів дисертаційної роботи	313

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АТ – автотрансформатор

ВН – висока напруга

ВП – вимірювальний перетворювач

ДЦ – диспетчерський центр

ЕМА – електромагнітний апарат

ЕЕС – електроенергетична система

ЕО – енергооб'єднання

ЕС – електрична система

ЕТС – електротехнічна система

НН – низька напруга

ОЕС – об'єднана енергосистема

ПЗ – програмні засоби

РС – реєстратор сигналів

САПР – система автоматизованого проектування

СТГ – синхронізований турбогенератор

ФДН – фіктивне джерело напруги

ФДС – фіктивне джерело струму

АТР – Alternative Transient Program (Альтернативна програма аналізу перехідних процесів)

DTNA- Digital Transient Network Analysers (Цифровий мережевий аналізатор перехідних процесів)

EMTP – Electromagnetic Transient Program (Програма аналізу електромагнітних перехідних процесів)

FDNE – Frequency Dependent Network Equivalents (Частотно-залежний еквівалент складної системи)

RTDS – Real-Time Digital Simulator (Цифровий апаратно-програмний комплекс моделювання перехідних режимів в реальному часі)

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Диспетчерське керування та збір даних)

ВСТУП

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 [1, 2, 16, 50, 80, 82, 126, 128]. Раціональне використання енергоресурсів в сучасних умовах є важливим завданням. Це дозволяє оптимізувати їхнє використання в промисловості, комунальній та житловій сферах. В електроенергетиці цього можна досягнути зменшенням втрат електроенергії під час її пересилання, раціонального використання шляхом розроблення відповідних технічних засобів на основі математичних методів і програмних ресурсів [131, 132].

Одним із основних заходів, необхідних для вирішення цієї задачі, є прогнозування поведінки систем у різних експлуатаційних умовах і попередження виникнення аварійних ситуацій. Однією з умов їх нормального функціонування є оперативне виявлення, а по можливості й усунення пошкоджень, які можуть зумовити аварійні ситуації. Час, необхідний для цього, може визначатись секундами, а то й меншими часовими проміжками. Окрім цього, з метою вирішення проблем забезпечення безперебійного та економного енергоспоживання задача прогнозування як короткотермінового (від однієї до семи діб), так і довготермінового енергоспоживання залишається актуальною проблемою.

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 диференціальних 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.

Крім цього, сучасні електротехнічні комплекси та системи складаються з великої кількості різних елементів, якими є синхронні генератори, трансформатори, синхронні і асинхронні двигуни, лінії пересилання, перетворювачі й системи захисту. Для математичного моделювання складних ЕТС необхідно мати математичні моделі їхніх елементів, які можуть бути подані заступними схемами, що з деяким наближенням відображають реальні процеси в них. Отже актуальною задачею сучасної електротехніки є аналіз динамічних режимів і процесів складних ЕТС, елементи яких описуються математичними макромоделями. Проблема оперативного керування роботою електротехнічних систем потребує швидкого неперервного аналізу процесів, однак математичне моделювання динамічних режимів всієї системи на основі детального описання процесів у кожному елементі робить математичну модель всієї системи настільки складною, що вона не задовольняє вимогам щодо швидкодії програми й не дає можливості реагувати на перебіг процесу в реальному часі. Функційна складність ЕТС, велике розмаїття якісно нових вимог до їх параметрів та надійності вимагають вдосконалення існуючих та розроблення нових підходів для швидкого й одночасно адекватного аналізу їхніх режимів і процесів з використанням математичних і комп'ютерних засобів моделювання. 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. Верляня, 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 сформуvalи 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 електроенергетичних систем є актуальним науковим підходом до вирішення складної проблеми 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 напряму наукових досліджень кафедри ТЗЕ Національного університету "Львівська політехніка" "Математичне моделювання динамічних процесів в електротехнічних та електронних колах і системах".

Дисертаційна робота виконувалась в 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 макромодельовання”, 2009 – 2010 р., (номер державної реєстрації 0109U001148); “Побудова макромоделей компонент електроенергетичних систем на основі експлуатаційних характеристик” 2011 – 2012 р. (номер державної реєстрації 0111U001224); “Дискретні макромоделі та їх застосування до прогнозування характеристик електроенергетичних систем”, 2013 – 2015 р., (номер державної реєстрації 0113U003194).

Мета й задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розвиток і удосконалення теорії та методів дослідження динамічних режимів електротехнічних систем з використанням математичних методів макромодельовання 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 макромодельовання.

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, макромодельовання й діакоптики, що дає змогу враховувати складність досліджуваної системи та пришвидшити її розрахунок;

2. Удосконалено метод побудови дискретних макромделей 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 макромделей у вигляді "чорної скриньки" до сучасних програмних середовищ, що забезпечує можливість аналізу динамічних режимів складних електротехнічних систем з використанням дискретних макромделей у складі комп'ютерних середовищ MATLAB/Simulink і ATP/EMTP.

4. Уперше розроблено математичні методи дискретного макромделювання 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 макромделювання можуть бути використані для побудови математичних моделей і макромделей електротехнічних систем з використанням експертного аналізу й удосконаленої методики відбору апріорної інформації з використанням сучасних вимірювальних комплексів.

Розроблено способи безпосереднього формування дискретних макромделей у середовищі Simulink за допомогою S-функцій шляхом програмування математичних виразів, відповідних до структури лінійної та нелінійної частин макромделі. Розроблено спосіб адаптації дискретних макромделей об'єктів електротехнічних систем до середовища ATP. Завдяки

цьому можна створити власні бібліотеки макромоделей елементів у середовищах MATLAB/Simulink і ATP, які можуть бути використані для прогнозування динамічних режимів конкретних ЕТС на реальних енергетичних об'єктах України.

Запропоновані теоретичні засади побудови математичних моделей електротехнічних систем в цілому та їхніх елементів із використанням макромоделювання й експертного аналізу доцільно використовувати під час викладання дослідницьких дисциплін у вищих навчальних закладах освіти України.

Отримані результати можна використовувати у науково-дослідних установах, відділах і конструкторських бюро відповідного спрямування для аналізу режимів і процесів електротехнічних систем та промислових підприємствах, які займаються експлуатацією систем електропостачання. Запропонований спосіб прогнозування споживання електроенергії може використовуватись для оцінювання витрат електроенергії у енергетичних компаніях України.

Створені макромоделі окремих елементів і компонент підстанції та додаткові блоки програмного забезпечення для дослідження перехідних процесів елементів ЕТС на підставі розроблених математичних моделей і макромоделей будуть запропоновані для використання в енергетичних компаніях України для розрахунку перехідних процесів з метою перевірки умов функціонування основного електроустаткування, передбачення й аналізу аварійних ситуацій.

Впровадження результатів досліджень. Результати досліджень, отримані під час виконання дисертаційної роботи, використовуються:

– у навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” під час викладання дисциплін “Методи оптимізації та їх застосування в задачах електротехніки” та ”, “Макромоделювання компонентів електромеханічних систем”, які викладаються для магістрів і аспірантів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в

Національному університеті “Львівська політехніка”;

– у науково-дослідній роботі під час виконання дослідних тем кафедри теоретичної та загальної електротехніки Інституту енергетики та систем керування Національного університету “Львівська політехніка”;

– математичній моделі елементів електропересилання та прогнозування, що впроваджені в ПАТ "Вінницяобленерго" і РДЦ Західного регіону відповідно, та використовуються для аналізу режимів і процесів під час експлуатації електричних мереж.

У додатках дисертації наведено документи, що підтверджують впровадження результатів роботи в Національному університеті “Львівська політехніка” та виробничих установах України.

Особистий внесок здобувача.

Усі наукові результати, викладені в дисертації, отримано здобувачем особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати (зі списку праць здобувача): аналіз властивостей динамічних систем та аспектів їх макромодельовання, аналіз класичних методів побудови макромоделей та побудова макромоделей окремих ефектів електричних кіл та електротехнічних систем в цілому (Розділи 2, 3, 9 монографії); опис особливостей застосування методів дослідження електричних кіл у сучасних програмних засобах [1]; вибір структури макромоделі та підбір 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 компонент на прикладі електроенергетичних систем [4]; спосіб розрахунку перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області на основі макромодельовання [7]; засади застосування ієрархічного модельовання для побудови макромоделей з метою побудови моделей електроенергетичних систем [8]; процедура адаптації макромоделей електротехнічних систем та їхніх складових до програмних засобів модельовання перехідних процесів [9]; алгоритм підвищення ефективності

побудови макромоделей [10]; дискретна макромоделі підстанції [11]; макромоделі довготермінового прогнозування енергоспоживання [12]; макромоделі короткотермінового прогнозування енергоспоживання [13]; математична модель трифазної лінії електропередачі для збирання експериментальної інформації для побудови їх макромоделей [15]; спосіб побудови дискретних макромоделей трансформаторів та автотрансформаторів [16, 31]; аналіз особливостей моделювання складних електричних систем діакоптичними методами [17]; аналіз переваг макромоделей трансформаторів у порівнянні із 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 електропередачі [20]; описання апробації результатів наукових досліджень [21]; удосконалено процедуру побудови макромоделей нелінійних динамічних систем з використанням оптимізації [22]; запропоновано використовувати методику моделювання для прогнозування енергоспоживання житлового мікрорайону [23]; математична модель для дослідження системи електропередачі [24]; опис способів моделювання великовимірних електричних систем паралельними методами [25]; комп'ютерна модель для дослідження системи електропередачі [26]; спосіб аналізу електричних компонент під час їх опису дискретними макромоделями [27]; запропоновано способи аналізу електричних кіл з елементами із 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 електропередачі у середовищі MATLAB/Simulink [30]; розроблення процедури дослідження ЕЕС на основі діакоптичного підходу та моделювання в сучасних комп'ютерних середовищах [32]; аналіз проблем застосування моделювання та діакоптичного підходу для дослідження ЕЕС та 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 електропередавання [38]; розроблення засад застосування експертного аналізу для практичної побудови макромоделей електротехнічних систем та їх елементів [39]; розроблення способів усунення труднощів при моделюванні перехідних процесів із використанням макромодельовання та діакоптичного підходу [40]; розробка методики отримання даних для побудови макромоделі складного електричного кола, досліджуваного у режимі короткого замикання [41]; спосіб адаптації макромоделей до середовища ATP [42]; дискретні макромоделі трансформатора у середовищі ATP за допомогою мови програмування MODELS [43]; спосіб реалізації дискретної макромоделі у 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 нестійкості при моделюванні електричних кіл із макромоделями у їх структурі [46].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації представлено й обговорено 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-ий Міжнар. наук.– техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці" Львів, жовтень 2007;
- 9th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", Alushta (Crimea), Ukraine, September 16–20, 2008 p.;
- I-ий міжнародній конференції молодих вчених EPECS'2009 "Енергетика та системи керування", Львів, 14-16 травня 2009 p.;
- X-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", Waplewo, Poland, September 16-19, 2009;
- X-th International Conference TCSET'2010 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science", Lviv–Slavske, Feb. 23–26, 2010, Ukraine;
- II науково-практичній конференції "Проблеми електроніки та інформаційні технології", смт. Чинадієво, Закарпатська обл., Україна, 2 – 5 вересня, 2010 p.;
- XI-th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" CPEE'2010, Lazne Kynzvalt, Czech Republic, September 13-16, 2010;
- II –ий Міжнародній конференції "Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11)", 7 –10 червня 2011 p., Мукачево, Свалявський р – н., Закарпатська обл., Україна;
- II – й міжнародної конференції молодих вчених EPECS'2010 "Енергетика та системи керування", Львів, 25-27 листопада 2010 p.;
- XII- th International Workshop CPEE'2011 "Computational Problems of

Electrical Engineering”, Kostryna, Trans-Carpathian region, Ukraine, September 5-7, 2011;

– XIII- th International Workshop CPEE’2012 “Computational Problems of Electrical Engineering”, Grzybow, Poland, September 5-8, 2012 ;

– XII-th International Conference TCSET’2014 “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Feb. 25 – March 1, 2014, Lviv–Slavske, Ukraine, 2014 p.;

– XIII International Scientific&Technical Conference “Problems of Present-Day Electrotechnics” PPE-2014, Kyiv, Ukraine 02-06, June 2014 p.

– 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 p.

– Проблеми сучасної електротехніки ПСЕ -2014 , Київ, 6-10 червня 2016 року;

– XVI- th International Workshop CPEE’2015 “Computational Problems of Electrical Engineering”, Lviv, September 2-5, 2015 [165].

– 17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), September 14-17, 2016, Sandomiez, Poland;

– International Conference EPNET"2016 (Electric Power Networks), Szekliarska 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 у одній монографії, а також 46 друкованих працях, з 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 у науковому періодичному виданні іншої держави; 1 стаття у періодичному виданні України, 23 матеріали конференцій, з яких 9 у виданнях, що включені до наукометричної бази даних Scopus,; 3 праці написано без співавторів.

Опубліковані праці в повній мірі відображають зміст дисертаційної роботи, що підтверджується посиланнями в її тексті.

Структура 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.

РОЗДІЛ 1

ДИНАМІЧНІ МАКРОМОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

1.1. Математичні неперервні й дискретні динамічні моделі й макромоделі елементів електротехнічних систем

Однією з важливих наукових проблем є прогнозування поведінки досліджуваного об'єкта в часі з урахуванням даних про його початковий стан. Ця проблема зводиться до пошуку деякого закону, за яким на підставі відомої інформації про об'єкт у початковий момент часу t_0 прогнозують його стан у будь-який інший момент $t > t_0$. Під час розв'язання деяких технічних задач більшість процесів є нестационарними. Тому в таких випадках доцільно застосовувати динамічні моделі [4, 18, 125]. Оскільки елементи електротехнічних систем мають динамічну природу, то для їх описання необхідно застосовувати математичний апарат, призначений для аналізу неперервних та дискретних динамічних систем.

Динамічну систему, в загальному, можна зобразити за допомогою багатополіюсника, наведеного на рис.1.1., де множина вхідних сигналів $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ подається у вигляді вектора \vec{v} . Вихідними сигналами є вектор \vec{y} , а її енергетичний стан визначається n -вимірним вектором змінних стану \vec{x} .

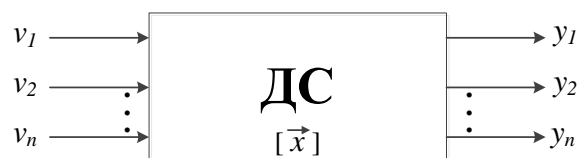


Рис. 1.1. Схематичне представлення динамічної системи

Динамічна система є результатом визначеної ідеалізації, що полягає у нехтуванні випадковими факторами, наявними у будь-якій реальній системі. За допомогою оператора еволюції можна знайти відповідність між станом системи у початковий момент часу і станом у кожний наступний його момент. Цей оператор задається багатьма способами: за допомогою диференціальних,

інтегральних, інтегро-диференціальних, різницевих рівнянь, а також за допомогою матриць, графів тощо [56, 67, 71].

Класифікація динамічних систем ґрунтується на визначеному стані системи, властивостях і способі описання оператора відображення.

Залежно від властивостей оператора відображення можна виділити декілька класів динамічних систем:

- лінійні, якщо оператор володіє властивістю суперпозиції (тобто є лінійним).
- нелінійні, якщо оператор не наділений цією властивістю.

Також виділяють два такі класи динамічних систем:

- консервативні – це замкнені системи, у яких енергетичний стан не змінюється в часі. До них належать, зокрема, коливні системи за умови відсутності тертя.
- дисипативні – динамічні системи, енергетичний стан яких залежить від часу.

Залежно від закономірності зміни характеристик динамічні моделі поділяють на:

- аналогові – динамічні моделі, вхідні та вихідні змінні яких є неперервними;
- дискретні – моделі, вхідні та вихідні змінні яких набувають певний дискретний ряд значень;
- дискретно-неперервні (комбіновані, гібридні) моделі – моделі, у яких змінні можуть бути як неперервними, так і дискретними.

Автономними є системи, у яких без зовнішнього впливу, за рахунок внутрішньої енергії, можуть виникати змінні у часі процеси. Своєю чергою, за характером змінних, що характеризують динамічні системи, їх поділяють на неперервні, дискретні та комбіновані.

До неперервних належать динамічні системи, вхідні та вихідні змінні яких можуть бути визначені у будь-який момент часу.

До дискретних динамічних систем відносять системи, вхідні та вихідні змінні яких можуть набувати дискретного ряду значень, зазвичай, нескінченного.

Комбіновані динамічні системи поєднують якості обох класів зазначених вище динамічних систем.

Актуальним є поділ динамічних систем [36, 63, 66] на:

– динамічні систем із розподіленими параметрами – це системи, у яких змінні x_i є функціями часу і певних просторових координат. Такі системи описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних або інтегральними рівняннями. До типових електротехнічних систем такого класу можна віднести довгі лінії, трансформаторні обвитки за умови застосування високочастотного аналізу, тощо.

– динамічні системи із зосередженими параметрами – це системи, у яких змінні x_i є функціями лише однієї змінної – часу. Такі системи описуються звичайними диференціальними рівняннями.

Детермінованою називається така динамічна система, стан якої в будь-який момент часу t можна достовірно визначити за відомими початковим станом та вхідними сигналами.

Стохастичною називається динамічна система, інформація про стан якої в деякий момент часу t визначається тільки з певною імовірністю або іншими статистичними засобами.

Математичний апарат дослідження динамічних систем володіє такими перевагами, як:

- універсальність;
- можливість дослідження системи на різних рівнях деталізації, що визначається постановкою задачі дослідження;
- можливість дослідження динаміки взаємодії елементів системи в часі та в просторі параметрів системи;
- можливість оцінювання характеристик системи у визначені моменти часу.

Поведінка динамічних систем у будь-який момент часу залежить від значень вхідних змінних та від передісторії досліджуваного об'єкту. Модель динаміки системи відображає математичні залежності між множинами вхідних, вихідних та внутрішніх змінних.

Модель динаміки системи відображає математичні залежності між трьома множинами змінних:

- вхідні змінні – це зовнішні фактори, що впливають на систему. Вони задаються множиною функцій або множиною послідовностей вхідних значень;
- вихідні змінні – відображають поведінку системи.
- внутрішні змінні – визначаються множиною значень змінних стану системи.

Якщо в будь-який момент часу t_0 відомо стан і вхідні збурення $\{u(t_0, t)\}$, то в будь-який інший момент часу $t \geq t_0$ можна визначити вихідні змінні та стан системи.

Методи динамічного моделювання призначені для вивчення процесів та змін станів на певних часових інтервалах. На противагу їм, статичні методи моделювання не потребують побудови окремої моделі для різних значень початкових станів. Доцільність застосування теорії динамічних систем зумовлена можливістю їх використання для дослідження широкого класу систем практично будь-якої складності, а також у тих випадках, коли статистичні характеристики модельованої системи отримати неможливо.

Відповідно до потреб дослідження математичні моделі класифікують, так і, відповідно, будують за ознаками, описаними вище, такими як форма представлення, спосіб побудови чи описання доступної інформації про явища тощо. Важливим аспектом під час вибору типу моделі та методу її побудови є потреба (чи її відсутність) володіти інформацією про внутрішню структуру та процеси досліджуваного об'єкта.

Моделі, які описують лише зовнішні характеристики модельованої системи, поданої у вигляді об'єкта з багатьма входами та виходами у вигляді математичних співвідношень, називаються макромоделями. У такому разі модельований об'єкт подається як “чорна скринька”, показана на рис. 1.1. Для побудови макромоделей доцільно застосовувати математичний апарат теорії динамічних систем [5, 7, 15, 79].

Залежно від наявності вхідної інформації та потреби моделювання математичні моделі для аналізу динамічних режимів технічних систем різної природи можуть містити як повну, так і часткову інформацію про

досліджуваний об'єкт. З іншого боку, саме наявність достовірної інформації, отриманої шляхом комп'ютерного чи натурального експерименту зумовлює вибір виду моделі (у вигляді так званих "білої", "сірої" та "чорної" скриньок) та форму її математичного опису, як це показано на рис. 1. 2.



Рис. 1.2. Побудова математичних моделей динамічних систем

Модель, яка будується у вигляді "білої скриньки" передбачає наявність повної інформації про структуру досліджуваного об'єкту, його параметри та перехідні характеристики. Модель у вигляді "сірої скриньки" будують у випадку наявності неповної інформації, а "чорної" – за умови відсутності будь-якої інформації про внутрішній стан досліджуваної системи. Саме тоді наявність достатньої кількості наборів перехідних характеристик, отриманих імовірно у різних режимах роботи досліджуваного об'єкту буде визначальним як при визначенні структури макромоделі, так і пошуку її параметрів, як це буде показано у розд. 4.

До недоліків макромоделей у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану належать неможливість їх використання для аналізу внутрішніх процесів, що відбуваються в модельованому об'єкті, необхідність отримання великих масивів даних апріорної інформації для їх побудови. Також

незручності може спричинити потреба побудови нової макромоделі для об'єкта одного типу, але з іншими параметрами, та подальша адаптація створених макромоделей до комп'ютерних програмних середовищ [117, 118, 125].

1.2. Неперервні моделі динамічних систем

Найуживанішою формою математичних моделей неперервних динамічних систем із зосередженими параметрами вважають диференціальне рівняння у формі Коші такого виду:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{v}), \quad (1.1)$$

$$\vec{y} = \vec{y}(\vec{x}, \vec{v}), \quad (1.2)$$

де $\vec{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$ – вектор змінних стану системи, \vec{v}, \vec{y} – вектори вхідних збурень і вихідних змінних відповідно. Часто сукупність рівнянь (1.1) та (1.2) називають рівнянням стану. У загальному разі функція $\vec{f}(\vec{x}, \vec{v})$ є нелінійною вектор-функцією, елементи якої $f(x) = f_i(x_1, \dots, x_n)$ – нелінійні скалярні функції змінних \vec{x} і \vec{v} .

Аналогічно визначається вектор-функція $\vec{y}(\vec{x}, \vec{v})$. Рівняння (1.1) окреслює зв'язок між вхідними збуреннями і вектором змінних стану. Рівняння (1.2) – це рівняння виходів. Воно описує зв'язки вихідних величин системи з її станом.

Якщо в рівняннях (1.1) та (1.2) розкласти нелінійні функції у ряд Тейлора і обмежитись першими членами ряду, то отримаємо лінійну модель у формі рівнянь стану [74, 76, 104, 134]:

$$\dot{\vec{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{v}, \quad (1.3)$$

$$\vec{y} = \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{v}, \quad (1.4)$$

де \mathbf{A} – квадратна матриця $n \times n$ сталих коефіцієнтів, $\mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ – числові матриці. Їх вимірності $\mathbf{B} - n \times m$, $\mathbf{C} - q \times n$, $\mathbf{D} - q \times m$. Розв'язком рівнянь, наведених вище, 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. Саме цей розв’язок описує зміну стану динамічних систем (1.1) – (1.2), (1.3) – (1.4) у часі. Підставивши його у відповідні рівняння виходів, отримуємо вектор-функцію $\vec{y}(t) = \vec{y}(t, x_0)$, яка описуватиме зміну в часі вихідних величин цих систем. Якщо є один вхідний сигнал, то матриця **B** матиме тільки один стовпець. Якщо є тільки одна вихідна змінна, то матриця **C** складається з одного рядка. Зазвичай нема прямого зв’язку між вхідними та вихідними змінними, і тоді матриця **D** є нульовою.

Застосуванню методу змінних стану в теорії автоматичного керування у другій половині 50-х років XX ст. сприяли праці Л. С. Понтрягіна, Р. Беллмана (метод динамічного програмування) [4], Р. Калмана (загальна теорія фільтрації й керування) [48].

Вибір компонентів вектора змінних стану в задачах математичного моделювання є досить довільним унаслідок їхньої фізичної невизначеності. Основні вимоги до цих змінних – щоб вони окреслювали енергетичний стан системи. Зокрема, змінними стану можуть бути вибрані похідні вихідних змінних чи будь-які інші функції, які, зазвичай, є лінійною комбінацією реальних змінних системи й які утворюють вектор стану [134].

Вагомий внесок у розвиток методу змінних стану та його застосування для описання динамічних систем зробив Л. Заде [48].

Відзначимо особливості цього способу математичного моделювання, що ґрунтується на рівняннях стану:

- однакове формулювання різних задач;
- можливість простого розв’язання задач керування з великою кількістю керованих і керуючих змінних;
- розв’язання задач асинхронного квантування, задач зі скінченним часом квантування і задач неперіодичного квантування;
- можливість дослідження нестационарних і нелінійних систем управління.

Лінійна система у формі змінних стану має багато переваг. Найважливішою властивістю лінійних систем є можливість застосування принципу суперпозиції та властивості адитивності вхідних сигналів. Зазвичай,

вплив сигналів керування і збурень аналізують окремо. Опис систем у просторі станів дає змогу виявити і дослідити такі властивості, які у разі використання класичних методів частотного аналізу й описання в термінах "вхід-вихід" залишались би прихованими. Матрична форма їх запису має незаперечну перевагу для числового розв'язання на комп'ютері, дає змогу здійснити чітку формалізацію й автоматизацію обчислювальних процедур, а якість математичного формулювання і самих розв'язків не погіршується навіть для багатовимірних і складних систем [76, 134, 136, 137]. Метод змінних стану сумісний із багатьма числовими методами й дає можливість увести такі моделі в сучасні програмні засоби комп'ютерного аналізу динамічних систем.

Проте теорія простору станів має також недоліки. Незважаючи на усі переваги лінійного описання, його застосування обмежене, оскільки більшість процесів у динамічних системах є суттєво нелінійними. Якщо відсутні істотні збурення, то за певних умов нелінійну систему можна лінеаризувати, і лінійний опис буде справедливим для малих відхилень навколо точки рівноваги.

Якщо змінні стану вимірюються безпосередньо чи мають конкретний фізичний зміст, то зв'язок між математичним описом і внутрішньою фізичною реальністю зберігається, а моделювання систем на аналоговій і цифровій техніці відразу впливає із математичного описання. Якщо вибір змінних стану чітко не означений, зокрема в разі використання підходу "чорної скриньки", то змінні часто не мають конкретного фізичного трактування. Тоді зв'язок із фізичною реальністю втрачається і розрахунки, зазвичай, неможливо зіставити з фізичними уявленнями.

1.3. Моделі "вхід–вихід" і у вигляді передатної функції

Модель "вхід–вихід" (ВВ) – це описання зв'язку між вхідними та вихідними змінними динамічної системи. Якщо описувати тільки зв'язок між вхідними та вихідними сигналами, то деякі внутрішні змінні й взаємозв'язки між ними залишатимуться прихованими, водночас математичне описання системи стає компактнішим і має меншу кількість параметрів, ніж описання в просторі змінних стану. Оскільки в модель "вхід–вихід" входять лише вхідні та

вихідні змінні, то її називають зовнішнім описом, на протипагу внутрішньому описанні за допомогою рівнянь стану [58, 74, 76, 77].

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

$$a_0 y^{[n]} + a_1 y^{[n-1]} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 u^{[m]} + b_1 u^{[m-1]} + \dots + b_m u \quad (1.5)$$

де a_i, b_i – коефіцієнти (параметри моделі), $a_0 \neq 0, b_0 \neq 0$, n – порядок моделі, $0 \leq m < n$. Рівняння (1.5) пов'язує вхідні сигнали $u(t)$ і їх похідні $u^{[i]}(t)$ з вихідними сигналами $y(t)$ та їх похідними $y^{[i]}(t)$ на деякому часовому інтервалі, тобто при $t \in [t_0, t_f)$. Параметри моделі a_i, b_i можна отримати з матриць **A**, **B**, **C** і **D**. У системах з багатьма вхідними та вихідними змінними для кожної пари "вхід–вихід" існує своя залежність.

Вирази $y(t_0) = y_0, \dot{y}(t_0) = \dot{y}_0, \dots, y^{[n-1]}(t_0) = y_0^{[n-1]}$ називають початковими значеннями (умовами), а число $r = n = m \geq 1$ – порядком моделі.

Розрізняють стаціонарні системи, для яких значення параметрів незмінні: $a_i = \text{const}, b_i = \text{const}$, і де можна прийняти $t_0 = 0$, і нестаціонарні системи, де параметри є функціями часу, тобто $a_i = a_i(t), b_i = b_i(t)$. У разі, коли $a_0 = 1$, рівняння називається зведеним.

Система, для якої $u(t) = 0$, називається автономною. Описання автономної системи є однорідним диференціальним рівнянням виду

$$a_0 y^{[n]} + a_1 y^{[n-1]} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = 0. \quad (1.6)$$

Модель (1.6) можна переписати в операторній формі. Для цього введемо в розгляд оператор диференціювання $s = d/dt$ і приймемо, що $s^i = d/dt^i$.

З урахуванням введених позначень за нульових початкових умов рівняння (1.5) перетворюються в операторну форму виду

$$a(s)y(t) = b(s)u(t), \quad (1.7)$$

у якій застосовуються диференціальні оператори:

$$a(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n, \quad (1.8)$$

$$b(s) = b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m. \quad (1.9)$$

Оператор $a(p)$ є характеристичним поліномом диференціального рівняння (1.5), а комплексні числа $s_i, i = \overline{1, n}$ є коренями характеристичного рівняння

$$a(s) = 0, \quad (1.10)$$

і називаються полюсами системи (1.5).

Диференціальний оператор $b(s)$ – характеристичний поліном правої частини рівняння (1.9). Корені рівняння

$$b(s) = 0, \quad (1.11)$$

тобто комплексні числа $s_i^0, i = \overline{1, m}$, називаються нулями системи (1.5).

З рівняння (1.7) знайдемо явний зв'язок змінних $y(t)$ і $u(t)$ у вигляді операторного рівняння:

$$y(t) = H(s)u(t) \quad (1.12)$$

де інтегрально - диференціальний оператор

$$H(s) = \frac{b(s)}{a(s)}, \quad (1.13)$$

називається операторною передатною функцією системи (1.5).

Перевага використання операторних моделей типу (1.7) і (1.12) полягає, по-перше, в стислості запису відповідних рівнянь, а по-друге, в зручності перетворення окремих складових моделей.

Отже, для диференціального рівняння (1.7) порядку n можна виконати перетворення Лапласа у вигляді

$$(s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n)Y(s) = (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m)U(s) \quad (1.14)$$

де $Y(s)$ та $U(s)$ – результат перетворення Лапласа (зображення) для $y(t)$ і $u(t)$ відповідно.

Перевага цього методу полягає в тому, що над комплексними змінними s , які є операторами диференціювання, можна виконувати математичні операції за допомогою алгебричних методів. Підкреслимо: за умови використання цього методу вважають, що початкові значення змінних y є нульовими.

Зв'язок між вхідними та вихідними змінними лінійної системи можна відобразити її передатною функцією, яка є відношенням зображень Лапласа вихідного та вхідного сигналів системи

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n} \quad (1.15)$$

Передатну функцію також можна розрахувати безпосередньо, на підставі рівняння змінних стану. Отримане співвідношення матиме такий вигляд:

$$\mathbf{H}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (1.16)$$

де \mathbf{I} – одинична матриця порядку n . У системі з одним входом і одним виходом матриця \mathbf{C} складається з однієї стрічки, а матриця \mathbf{B} – з одного стовпця, матриця \mathbf{A} – має вимірність $n \times n$. Зазвичай матриця \mathbf{D} , яка має вимірність 1×1 , є нульовою. У такому разі \mathbf{H} стає скаляром. Для декількох входів і виходів $\mathbf{H}(s)$ є матрицею з елементами $h_{ij}(s)$, які є передатними функціями для кожної пари входу u_i та виходу y_j .

1.4. Дискретні динамічні моделі

Сьогодні основними засобами розв'язування диференціальних рівнянь є числові методи. Зазначені методи дають змогу отримати розв'язок диференціального рівняння у числовому вигляді для певних значень змінної, якою у нашому разі є час. Тобто, неперервна змінна (час) стає дискретною, що, своєю чергою, зумовлює дискретні значення розв'язку диференціального рівняння. Зазвичай, отриманий у таким чином розв'язок не є точним, і навіть

більше, інколи відповідні обчислювальні процедури не є збіжними. Однак сучасні комп'ютерні технології числового інтегрування дають змогу практично гарантовано усунути зазначені вище недоліки числових методів розрахунку динамічних процесів, і, зокрема, звести похибку розв'язку диференціального рівняння до рівня похибки заокруглення. Все це зумовлює той факт, що нині результати аналізу неперервних динамічних систем мають дискретний вигляд. В символному вигляді цей факт можна подати у такій формі:

$$x(t) \Rightarrow \{x^{(k)}\}; t \Rightarrow \{t^{(k)}\}, k = \overline{0, \infty}, \quad (1.17)$$

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

Перехід від неперервного описання динамічної моделі (1.1) – (1.2) до дискретного можна проілюструвати, використавши деякий числовий метод, наприклад, неявний метод Ейлера. Замінивши у співвідношенні (1.1) похідну відповідною різницею, отримуємо:

$$\frac{\bar{x}^{(k+1)} - \bar{x}^{(k)}}{h} = \bar{f}(\bar{x}^{(k+1)}, \bar{v}^{(k+1)}), \quad (1.18)$$

чи для лінійного випадку:

$$\frac{\bar{x}^{(k+1)} - \bar{x}^{(k)}}{h} = \mathbf{A}\bar{x}^{(k+1)} + \mathbf{B}\bar{v}^{(k+1)}, \quad (1.19)$$

де $\bar{v}^k = \bar{v}(kh)$ – дискретні значення вектора збурень.

Після відповідного впорядкування виразів (1.18) і (1.19) й додавання до них дискретизованих рівнянь виходів (1.2) і (1.4) отримуємо такі системи рівнянь:

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = hf(\bar{x}^{(k+1)}, \bar{v}^{(k+1)}) + \bar{x}^{(k)} \\ \bar{y}^{(k+1)} = g(\bar{x}^{(k+1)}, \bar{v}^{(k+1)}) \end{cases} \quad (1.20)$$

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = (1 + h\mathbf{A})\bar{x}^{(k+1)} + h\mathbf{B}\bar{v}^{(k+1)} \\ \bar{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\bar{x}^{(k+1)} + \mathbf{D}\bar{v}^{(k+1)} \end{cases} \quad (1.21)$$

Системи рівнянь (1.20) і (1.21) називають відповідно нелінійними та лінійними дискретними рівняннями стану неперервної динамічної системи.

У зв'язку з необхідністю застосування дискретних відліків, доречним є застосування моделі в такому вигляді:

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\bar{x}^{(k)} + \mathbf{G}\bar{v}^{(k)} + \bar{\Phi}(\bar{x}^{(k)}, \bar{v}^{(k)}) \\ \bar{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\bar{x}^{(k+1)} + \mathbf{D}\bar{v}^{(k+1)} \end{cases}, \quad (1.22)$$

де $\bar{x}^{(k)}$ – вектор змінних стану, $\bar{v}^{(k)}$ – вектор вхідних змінних, $\bar{y}^{(k+1)}$ – вектор вихідних змінних, $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ – деякі матриці, $\bar{\Phi}$ – деяка нелінійна вектор-функція, k – порядковий номер дискрети. Як показано в роботах [97, 98, 134] така форма моделі практично є універсальною й придатна для побудови моделей широкого класу динамічних систем.

Лінійний варіант цієї моделі записується так:

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\bar{x}^{(k)} + \mathbf{G}\bar{v}^{(k)} \\ \bar{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\bar{x}^{(k+1)} + \mathbf{D}\bar{v}^{(k+1)} \end{cases}. \quad (1.23)$$

В табл. 1.1 представлені аналогові і дискретні моделі, розглянуті вище, які можна застосовувати для побудови математичних моделей динамічних систем.

Альтернативним підходом до побудови динамічних систем є використання функціональних рядів, процедура застосування яких в якості макромоделей для аналізу динамічних режимів нелінійних електричних кіл висвітлена в працях Данилова Л. В., Соловйової Є. Б., Камінська Р. та інших. Зокрема, застосовним є метод побудови математичних макромоделей нелінійних електричних та електронних кіл за допомогою рядів Вольтерра [105, 107].

Відповідно до цього підходу для довільної динамічної системи можна вибрати форму її математичного опису у вигляді функційного ряду Вольтерра у

формі такого співвідношення:

$$y(t) = y_0(t) + \sum_{i=1}^{\infty} T_i[x(t)],$$

де $y_0(t)$ – складова вихідного сигналу, яка не зумовлена дією вхідного сигналу.

Таблиця 1.1. Характеристики аналогових і дискретних моделей

Характеристики моделей	Аналогові моделі	Дискретні моделі
Вид рівнянь	Диференціальні	Різницеві
Опис у просторі станів	$\begin{cases} \dot{\vec{x}} = \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{u} \\ \vec{y} = \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{u} \end{cases}$	$\begin{cases} \vec{x}_{k+1} = \mathbf{A}\vec{x}_k + \mathbf{B}\vec{u}_k \\ \vec{y}_k = \mathbf{C}\vec{x}_k + \mathbf{D}\vec{u}_k \end{cases}$
Описання за допомогою передатної функції	$Q(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$ <p>де s – оператор диференціювання</p>	$Q(z) = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0}$ <p>де z – оператор дискретного перетворення</p>
Означення передатної функції	$\mathbf{H}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$	$\mathbf{Q}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$
Вид інтегрального перетворення	<p>Перетворення Лапласа</p> $F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$	<p>z-перетворення</p> $F(z) = \int_{n=0}^{\infty} \frac{f(nz)}{z^n}$

Коефіцієнти ряду $T_i[x(t)]$ визначають як

$$T_i[x(t)] = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} h_i(\tau_1 \dots \tau_i) \cdot v(t - \tau_1) \dots v(t - \tau_i) d\tau_1 \dots d\tau_i,$$

де $T_i[x(t)]$ – оператор Вольтерра i – го порядку, $h_i(\tau_1 \dots \tau_i)$ – ядро Вольтерра (імпульсна перехідна функція i – го порядку).

У такому записі ряд Вольтерра є узагальненням інтегралу згортки на нелінійні динамічні системи. Перевагою застосування рядів Вольтерра для моделювання електричних кіл є встановлення безпосередньої залежності

вихідного сигналу y від вхідного сигналу v , узагальнена форма запису та хороша збіжність процесу моделювання. Найбільшою проблемою застосування цього підходу є складність визначення ядер Вольтерра, аналітичну форму запису яких можна отримати лише для достатньо невеликого класу динамічних об'єктів. Задача визначення аналітичної форми запису ядер Вольтерра може бути вирішена за допомогою застосування методу ітерацій Пікара або модифікованого методу макромодельовання на основі теорії розщеплення сигналів [105].

1.5. Особливості ідентифікації динамічних систем

Важливим етапом моделювання динамічних систем є визначення параметрів і структури побудованої моделі. Такий процес називають ідентифікацією математичної моделі. Він, зазвичай, поділяється на структурну та параметричну ідентифікацію [42, 67, 72, 85]. Цей процес є обов'язковим для побудови адекватних моделей. Зазвичай, процес побудови моделей розпочинається з визначення елементів, з яких будується модель, і їхніх взаємозв'язків, тобто структурної ідентифікації. Щодо математичних моделей, то процес структурної ідентифікації полягає у виборі форми моделі та кількості відповідних її складових.

Структурна ідентифікація, відповідно до класичного означення ідентифікації Заде, – це процес розроблення критеріїв ідентифікації структури моделі з класу моделей, якщо задані класи моделей і типи вхідних сигналів [18]. Задача структурної ідентифікації є найскладнішою й потребує значних витрат інтелектуальних і машинних ресурсів. Правильний вибір структури моделі значною мірою визначає успіх побудови адекватної моделі системи.

Параметрична ідентифікація – це процес визначення значень параметрів окремих елементів моделі. Задачу параметричної ідентифікації можна безпосередньо пов'язати зі задачею структурної ідентифікації, якщо для її розв'язання використовуються експериментальні дані, отримані для розв'язання задачі структурної ідентифікації.

Тобто ідентифікація, за суттю, є процесом побудови моделі. Її мета – визначення виду та параметрів оператора, що пов’язує вхідний і вихідний сигнали [71, 109, 155] на основі спостережень натурального чи математичного експерименту. Результати спостережень вхідних і вихідних сигналів називають апіорною інформацією.

Для ідентифікації моделей використовують дані, що характеризують модельовані системи, які можна отримати як у результаті натурального експерименту, так і за допомогою деталізованої комп’ютерної моделі. Зазначимо, що для більшості систем неможливо зібрати повну інформацію про об’єкт і тому досить часто отримані дані є фрагментарними. Іноді вони містять прогалини, викиди, а в окремих випадках нерівномірні в часі. Неоднорідність даних може бути зумовлена також специфікою постановки експерименту чи обмеженими можливостями наявного програмного забезпечення [7, 8, 138].

Первинним моментом ідентифікації є [8, 98, 103]:

- вибір характеристик для описання об’єкта;
- вибір сигналів із заданими характеристиками, якщо це можливо;
- визначення вхідних змінних.

Виконуючи параметричну ідентифікацію математичних моделей, визначають коефіцієнти, наприклад, передатної функції чи рівняння об’єкта. Структурна ідентифікація дає змогу визначити порядок моделі (кількість рівнянь, порядок похідних), характер нелінійних залежностей, взаємозв’язки між окремими рівняннями.

У деяких випадках параметрична та структурна ідентифікація поєднуються в єдиний процес. Зауважимо, що ідентифікація – це багатоетапний процес, який поєднує такі послідовні етапи:

1. Структурна ідентифікація – визначення структури математичної моделі переважно на підставі теоретичних уявлень;
2. Параметрична ідентифікація – встановлення значень параметрів моделі на основі апіорної інформації;
3. Перевірка адекватності – перевірка якості моделі за критерієм

близькості інших сигналів або, інакше кажучи, верифікація моделі.

Верифікацію моделі здійснюють на підставі методів регресійного, дисперсійного, кореляційного та статистичного аналізу, які є основою для правильної інтерпретації отриманих результатів і оцінювання її якості. Регресійний аналіз дає змогу знайти оптимальні значення параметрів моделі, дисперсійний аналіз – кількісно оцінити збіжність результатів у середньому та встановити, як саме її можна забезпечити, а також зробити висновок про ступінь впливу окремих факторів на реакцію об'єкта та моделі, а також їх взаємний вплив. Для встановлення взаємного впливу та виду залежностей між параметрами та змінними в моделях застосовують кореляційний аналіз. Методи статистичного аналізу дають змогу досліджувати закони розподілу випадкових параметрів і змінних для моделей, знаходити їхні числові характеристики, статистичне оцінювання та властивості [76].

Отже, підсумовуючи, під ідентифікацією моделей динамічних об'єктів розуміють процедуру визначення структури й параметрів їхніх математичних моделей, які за однакових вхідних сигналів об'єкта та моделі забезпечують близькість виходу моделі до виходу реального об'єкта згідно з певним критерієм якості [31].

Для ілюстрації процесу ідентифікації розглянемо деяку динамічну систему, поведінку якої моделюють. Будуватимемо модель у формі дискретних рівнянь стану (1.22). У цьому випадку - це елементи матриць $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ і коефіцієнти розкладу вектор-функції $\vec{\Phi}(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)})$.

Структура ж моделі визначається вимірністю вектора \vec{x} (інакше кажучи, порядком) моделі, а також видом нелінійної функції $\vec{\Phi}(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)})$. Метою параметричної ідентифікації є визначення параметрів матриць $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ і коефіцієнтів нелінійної вектор-функції.

Щодо структурної ідентифікації, то в цьому разі порядок рівняння (1.10) можна визначити з лінеаризованої моделі на основі алгоритму Хо-Калмана [48],

а форму нелінійного доданка $\vec{\Phi}(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)})$ зазвичай вибирають на основі наявної інформації про модельований об'єкт.

Запропонований підхід до ідентифікації математичної моделі динамічної системи можна запропонувати у вигляді схеми, наведеної на рис 1.2.

Пояснення цієї узагальненої схеми ідентифікації моделей доволі просте. На основі наявної інформації про систему її інфраструктуру визначає загальний вигляд (форма) моделі системи. Зокрема, модель системи можна подати у вигляді системи дискретних рівнянь стану [85].

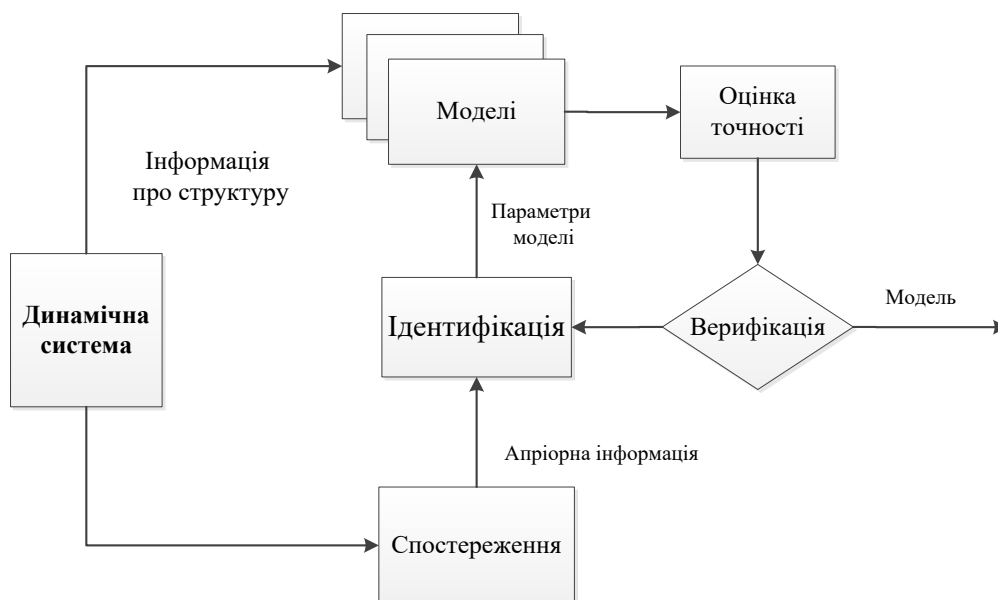


Рис. 1.2. Узагальнена схема ідентифікації моделі

Ідентифікація параметрів такої моделі може здійснюватись за деяким алгоритмом з використанням апіорної інформації про цю систему. Однак алгоритм ідентифікації може породжувати не один набір параметрів моделі, а деяку їхню множину. Це дає змогу вибрати з блоку "Моделі" наявні моделі й здійснити порівняння моделей з однаковою структурою, але з різним набором параметрів. Оцінивши їхню точність, можна визначити ступінь адекватності отриманих моделей щодо реального об'єкта. Кінцева оцінка отриманих моделей здійснюється за допомогою верифікації. У разі недостатньої адекватності наявних моделей слід виконати повторну ідентифікацію зі зміною

порядку самої моделі чи зміненою формою врахування нелінійності в динамічній моделі, тобто здійснити структурну ідентифікацію [102, 155].

Для оцінювання адекватності побудованої моделі необхідно оцінити її точність. Критерієм точності моделі може бути величина $Q > 0$, що характеризує похибку відтворення поведінки системи створеною моделлю й називається функцією мети [95, 107, 116]. Функція мети Q_i може не лише відображати точність відтворення поведінки системи, а й урахувати деякі бажані критерії самої моделі, наприклад, її складність.

Зазвичай, функція мети записується у вигляді середньоквадратичного відхилення поведінки моделі від поведінки модельованого об'єкта:

$$Q_i(\vec{\lambda}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k^N |\bar{y} - \bar{y}'|^2}, \quad (1.24)$$

де $\vec{\lambda}$ – вектор невідомих коефіцієнтів, в який входять елементи матриць **F**, **G**, **C**, **D** і коефіцієнти нелінійної функції **Φ**, \bar{y} – перехідні характеристики, розраховані за допомогою макромоделі, \bar{y}' – перехідні характеристики модельованого об'єкта. Визначивши мінімум функції **Q**, знайдемо найкращий набір коефіцієнтів для вибраної форми моделі, а також мінімізуємо похибку, й функція мети може задовольняти такі вирази:

$$Q(\vec{\lambda}) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_k |\bar{y} - \bar{y}^*|^2}, \quad Q(\vec{\lambda}) = \sum_k |\bar{y} - \bar{y}^*|, \quad (1.25)$$

За умови використання такого підходу побудова моделі зводиться до знаходження такого значення $\vec{\lambda}$, за якого значення функції Q_i буде мінімальним. Отже, задача побудови макромоделі зводиться до пошуку мінімуму функції, а вектор невідомих параметрів $\vec{\lambda}$ знаходиться за допомогою оптимізації.

Зважаючи на те, що представлення первинної інформації про модельований об'єкт, зазвичай, дискретне, покажемо перспективність використання дискретних моделей для моделювання неперервних динамічних

систем.

Для цього використовуємо схему (рис. 1.3), яка ілюструє процес розрахунку деякої динамічної системи, складеної з певних елементів, які теж належать до класу динамічних систем.



Рис. 1.3. Схема процесу розрахунку часових характеристик динамічної системи

Цей процес розпочинається з отримання апріорної інформації для моделювання окремих елементів неперервної системи, побудови відповідних їм математичних моделей, подальшого об'єднання цих моделей для створення моделі цілої системи, а відтак розрахунку динамічних режимів утвореної у такий спосіб системи.

З рис. 1.3. випливає, що є два шляхи часового аналізу режимів деякого динамічного об'єкта:

- перший шлях утворюється послідовністю блоків 1–7. Він потребує виконання досить складної процедури багатовимірної апроксимації функції багатьох змінних;
- другий шлях – значно коротший, містить блоки 1, 2, 8, 9, 7 і, зазвичай, є значно простішим.

Зазвичай, процеси функціонування електротехнічних систем є настільки складними, що виникає необхідність спрощення їхніх математичних моделей і

відповідних їм методів математичного моделювання [6, 9, 10].

Найпоширенішими способами такого спрощення є:

- лінеаризація нелінійних систем в деякій області зміни змінних загальноприйнятим методом малих відхилень;
- зведення систем з розподіленими параметрами до систем із зосередженими параметрами;
- нехтування динамічними властивостями досліджуваного об'єкта;
- розбиття складних систем на декілька простіших підсистем (декомпозиція).
- виділення суттєвих властивостей і впливів й урахування інших (несуттєвих чи неврахованих) у параметричній формі (метод макромоделювання).

Для математичного макромоделювання систем великої вимірності, як вже було зазначено вище, застосовування неперервні та дискретні макромоделі.

Як засіб математичного описання макромоделей електротехнічних об'єктів пропонується використовувати дискретне рівняння стану вигляду (1.22), що дозволить врахувати специфіку поставленої задачі,

Вектори вхідних \vec{v} і вихідних \vec{y} змінних у макромоделях утворюються з множини зовнішніх характеристик модельованого об'єкта довільним чином. Вектор внутрішніх змінних \vec{x} складається, зазвичай, зі змінних, які не мають безпосереднього фізичного трактування, проте вони визначають стан модельованої системи в заданий момент часу.

Для ідентифікації параметрів макромоделі, тобто знаходження матриць $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ і функції $\vec{\Phi}(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)})$, використовується апріорна інформація у вигляді перехідних характеристик, зумовлених вхідними збуреннями, отриманими як експериментально, так і за допомогою комп'ютерного моделювання.

Дискретні математичні макромоделі зручні для комп'ютерного моделювання, не мають жодних обмежень стосовно модельованих об'єктів, не вимагають дотримання умов фізичної реалізації, що характерно для традиційних заступних електричних схем. Важливо є й те, що вже існують

надійні методи ідентифікації структури й параметрів таких моделей на основі відомих перехідних характеристик, отриманих як експериментально, так і розрахунково.

Такі моделі мають певні переваги:

- проста структура моделі, зумовлена відсутністю детального розгляду внутрішніх процесів модельованого об'єкту;
- можливість розділення динамічних і нелінійних характеристик;
- придатність для описання об'єктів невідомої фізичної природи, яку неможливо проаналізувати, або ж модель якої не може бути зведена до простої;
- незначна чутливість до вимірності задачі, що важливо під час моделювання складних об'єктів;
- макромоделі окремих елементів електротехнічних об'єктів можуть бути об'єднані в математичну макромодель цілої системи як за допомогою діакоптического підходу, так і шляхом формування рівнянь зв'язку з використанням законів Кірхгофа.

На сучасному етапі моделювання складних електротехнічних систем виділяють декілька типів макромоделей, які можна застосовувати для дослідження електричних кіл. Найпоширеніші схемні макромоделі (макромоделі з редукцією схеми), математичні макромоделі та символічні макромоделі [213].

У схемних макромоделях первинна схема замінюється іншою схемою (макромоделлю) з меншою кількістю елементів. У результаті цю макромодель аналізують такими самими методами, що й первинну схему. Найзастосованішими макромоделями в цій категорії є еквівалентні схеми, коли лінійний двополіусник замінюється джерелом напруги, увімкненим послідовно з повним опором джерела [68, 69].

Другим типом макромоделей є математичні макромоделі, які формуються на основі спрощених математичних рівнянь складних елементів. Такі спрощені математичні співвідношення можуть містити апроксимаційні вирази у вигляді поліномів чи кусково-лінійних функцій. Отриману макромодель аналізують

спеціальними методами аналізу електричних кіл [149, 213].

Наступний тип – це символні макромоделі, які будують з використанням попередньо розв’язаних і скомпільованих систем рівнянь, реалізованих у вигляді підпрограм для описання окремих підсхем. На етапі моделювання конкретної підсхеми викликається відповідна підпрограма, яка генерує специфічні параметри підсхеми, які, своєю чергою, узгоджуються з іншими даними, необхідними для моделювання решти електричного кола.

Якісна оцінка макромоделі проводиться на основі таких критеріїв, як точність, область і межі застосування, а також вартість, необхідні для її побудови й апробації. Точність макромоделі може бути оцінена як відхилення результатів моделювання, отриманих на основі розробленої макромоделі від тих, які використовувались для її побудови. Переважно, точність макромоделі визначається для конкретного діапазону, поза його межами похибки при використанні макромоделі стають суттєвими.

Вартістю побудови макромоделі називають кількість зусиль, покладених на її побудову (комп’ютерний час, оцінка праці). Знання специфіки об’єкту, який моделюється, є необхідним на цьому етапі. Більш того, висока конструкційна вартість зумовлює вищу точність.

Різне застосування макромоделей має різну вартість їхньої апробації. Вартістю апробації є кількість обчислень, які необхідні для встановлення результатів її функціонування. Оскільки, в першу чергу, макромоделі розробляються для спрощення обчислень, то мінімальна вартість їхньої апробації є визначальним фактором доцільності побудови макромоделей.

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто класифікацію динамічних систем, детально описано неперервні моделі динамічних систем, моделі "вхід-вихід", у вигляді передатної функції, що дозволило встановити переваги та недоліки їх застосування.

2. Описано процедуру ідентифікації динамічних систем, особливості параметричної та структурної ідентифікації.

3. З метою створення моделей для аналізу динамічних режимів складних електротехнічних систем, які містять елементи із зосередженими та розподіленими параметрами запропоновано використовувати метод побудови макромоделей у вигляді "чорної скриньки" у формі дискретних рівнянь стану.

4. Розглянуто способи спрощення побудови математичних моделей та перспективи застосування макромоделей у вигляді "чорної скриньки" у формі дискретних рівнянь стану для аналізу динамічних режимів електричних кіл та електротехнічних систем.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПОБУДОВИ МАКРОМОДЕЛЕЙ

2.1. Алгоритм побудови лінійної неперервної макромоделі на основі частотних характеристик

Нагадаємо, що лінійне рівняння стану динамічного об'єкта має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= \mathbf{A}\vec{x} + \mathbf{B}\vec{v}, \\ \vec{y} &= \mathbf{C}\vec{x} + \mathbf{D}\vec{v}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Апріорною інформацією для знаходження матриць \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} такої системи є передатні функції в частотній області. Розглянемо відповідну процедуру ідентифікації для цього випадку [107].

Припустимо, що відома матрична передатна функція розглянутої системи $\mathbf{H}(j\omega)$. Вважатимемо, що кожний елемент матриці $H_{m,k}(j\omega)$ представлений у вигляді відношення двох поліномів змінної $s = j\omega$.

Припустимо, що матриця \mathbf{D} , яка визначається як

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \mathbf{H}(s) = \mathbf{D}, \quad (2.2)$$

є нульовою. У лінійній динамічній системі цього можна завжди досягти відповідним вибором вектора змінних стану \vec{x} .

За такого допущення для визначення матриць \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} застосовуємо відомий алгоритм Сілвермана -Хо [48, 164].

На першому кроці алгоритму виконаємо розклад матричної передатної функції в скінчений ряд:

$$\mathbf{H}(s) = s + \mathbf{M}_1/s^2 + \dots + \mathbf{M}_{n-1}/s^n, \quad (2.3)$$

де \mathbf{M}_k – дійсні матриці Маркова.

На основі матриць Маркова будуються матриці Ганкеля такого вигляду:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_0 & \mathbf{M}_1 & \dots & \mathbf{M}_{r-1} \\ \mathbf{M}_1 & \mathbf{M}_2 & \dots & \mathbf{M}_r \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{M}_{r-1} & \mathbf{M}_r & \dots & \mathbf{M}_{2r-2} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Тут значення індексу r змінюється в межах від 1 до n , де n є мінімальним порядком рівняння стану, що визначається з умови

$$n = \max(\text{rank} \Gamma) \quad (r \geq 1), \quad (2.5)$$

тобто значення n є рівним максимальному рангу матриці Ганкеля.

Наступний крок алгоритму Сілвермана-Хо – перетворення матриці Ганкеля до діагонального вигляду

$$\mathbf{P}_1 \cdot \Gamma_l^\sigma \cdot \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

де \mathbf{P}_1 і \mathbf{P}_2 – числові прямокутні матриці відповідних розмірів, $\mathbf{1}$ – одинична матриця, $\mathbf{0}$ – нульова матриця. Матриця Γ_l^σ має вигляд

$$\Gamma_l^\sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{M}_2 & \dots & \mathbf{M}_l \\ \mathbf{M}_2 & \mathbf{M}_3 & \dots & \mathbf{M}_{l+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{M}_l & \mathbf{M}_{l+1} & \dots & \mathbf{M}_{2l-1} \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

і називається зміщеною матрицею Ганкеля [62].

Тоді матриці \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} рівняння стану мінімального розміру подаються в такий спосіб: \mathbf{A} – ліва верхня підматриця порядку $n \times n$ добутку $\mathbf{P}_1 \cdot \Gamma_l^\sigma \cdot \mathbf{P}_2$. Матриця \mathbf{B} є лівою верхньою підматрицею порядку $n \times t$ добутку $\mathbf{P}_1 \cdot \Gamma_l^\sigma \cdot \mathbf{P}_2$, \mathbf{C} є лівою верхньою підматрицею розміру $l \times n$ добутку $\Xi_l^\sigma \cdot \mathbf{P}_2$; (l – кількість входів модельованого об'єкта). Зазвичай, $\mathbf{D} = \mathbf{H}(\infty)$.

У результаті виконання алгоритму Сілвермана-Хо одержуються рівняння стану мінімального порядку. Однак у цьому алгоритмі трудомісткими є операції визначення n і знаходження матриць \mathbf{P}_1 і \mathbf{P}_2 із співвідношення (2.6).

Простішою є процедура ідентифікації параметрів макромоделі у вигляді неперервного рівняння стану, яка ґрунтується на записі матриці передатних функцій динамічної системи у вигляді матричного багаточлена змінної s .

Нехай задана матриця передатних функцій $\mathbf{H}(s)$ задовольняє умову

$\mathbf{H}(\infty) = \mathbf{0}$. Уведемо позначення

$$b(s) = s^q + b_{q-1}s^{q-1} + \dots + b_1s + b_0, \quad (2.8)$$

де $b(s)$ є найменшим спільним знаменником елементів матриці $\mathbf{H}(s)$.

Добуток $b(s) \cdot \mathbf{H}(s)$ буде матрицею, елементи якої є поліномами змінної s степенем, меншим за q . Цей добуток можна подати таким чином:

$$b(s) \cdot \mathbf{H}(s) = \mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_1s + \dots + \mathbf{K}_{q-1}s^{q-1}, \quad (2.9)$$

де \mathbf{K}_i ($i = \overline{1, q-1}$) – квадратні матриці, елементи яких – скінченні дійсні числа.

Використовуючи матричні сигнальні графи, можна довести, що матриця передатних функцій $\mathbf{H}(s)$ відповідає сукупності матриць \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , які визначають рівняння стану:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \cdot & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \cdot & \mathbf{0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdot & \mathbf{1} \\ -b_0 \cdot \mathbf{1} & -b_1 \cdot \mathbf{1} & -b_2 \cdot \mathbf{1} & \cdot & -b_{q-1} \cdot \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \cdot \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0^T \\ \mathbf{K}_1^T \\ \cdot \\ \mathbf{K}_{q-2}^T \\ \mathbf{K}_{q-1}^T \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

де $\mathbf{0}$, $\mathbf{1}$ є квадратними нульовими й одиничними матрицями відповідних розмірів.

Показані вище матриці $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ визначають рівняння стану, яке є макромоделлю модельованої динамічної системи.

Аналогічно в [164] доведено, що тій самій матриці $\mathbf{H}(s)$ відповідає сукупність матриць $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ трохи іншого вигляду:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdot & \mathbf{0} & -b_0 \cdot \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} & \cdot & \mathbf{0} & -b_1 \cdot \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \cdot & \mathbf{0} & -b_2 \cdot \mathbf{1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdot & \mathbf{1} & -b_{q-1} \cdot \mathbf{1} \end{bmatrix}; \quad (2.10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_0 \\ \mathbf{K}_1 \\ \mathbf{K}_2 \\ \cdot \\ \mathbf{K}_{q-1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

У двох останніх випадках порядок рівняння стану визначається добутком $q \times n$ і, зазвичай, він є значно більший від мінімального порядку n рівняння, отриманого за допомогою алгоритму Сілвермана-Хо.

2.2. Алгоритм побудови лінійних неперервних макромоделей на основі часових характеристик

Для побудови неперервних макромоделей елементів електротехнічних систем здійснюється ідентифікація коефіцієнтів рівняння стану лінійної динамічної системи з використанням його часових характеристик, яка легко піддається формалізації математичного запису та подальшій комп'ютерній реалізації. Доцільність побудови макромоделей електротехнічних систем у часовій області зумовлена такими перевагами:

- можливістю реєстрації вхідних і вихідних характеристик досліджуваного об'єкта в часовій області за допомогою сучасних вимірювально-реєстраційних комплексів;
- можливістю переходу від зареєстрованих дискретних величин до неперервних за допомогою числових методів інтегрування;
- можливістю адаптації розроблених моделей до сучасних програмних

засобів – як до систем комп'ютерної математики (Mathematica, MathCAD, MATLAB, VisSim тощо), так і спеціалізованих, призначених для моделювання електромагнітних перехідних процесів (SimPowerSystem Blockset, PSCAD, ATP/EMTP тощо) [13, 14, 32, 41, 61].

Припустимо, що нам відомий деякий аналог матриці гібридних параметрів багатополюсника, що описує поведінку динамічної системи в часовій області. Запишемо цю матрицю у вигляді

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} H_{11}(t) & H_{12}(t) & \dots & H_{1n}(t) \\ H_{21}(t) & H_{22}(t) & \dots & H_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{n1}(t) & H_{n2}(t) & \dots & H_{nn}(t) \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Нехай $H_{ki}(t)$ – реакція окремого виходу на певну дію збурення, яка має вигляд одиничної функції. Припустимо, що всі функції $H_{ki}(t)$ апроксимовані експонентами, і тому матрицю $\mathbf{H}(t)$ можна записати так:

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{S}'_0 + \mathbf{S}'_1 e^{\lambda_1 t} + \dots + \mathbf{S}'_i e^{\lambda_i t}, \quad (2.15)$$

де $\mathbf{S}'_0, \mathbf{S}'_1, \mathbf{S}'_i$ – дійсні матриці розміром $n \times n$.

Для побудови рівнянь стану багатополюсника, часові характеристики якого так апроксимовані, скористаємося ефективним алгоритмом, що гарантує завідомо мінімальну реалізацію й описаний у [107].

У цьому алгоритмі визначення порядку шуканого рівняння стану здійснюється на основі співвідношення

$$n = \sum_{k=1}^i \text{rank} \mathbf{S}'_k. \quad (2.16)$$

Наступний крок алгоритму – подання матриць \mathbf{S}'_i у вигляді суми матриць $\mathbf{S}'_i{}^k$, ранг яких дорівнює одиниці:

$$\mathbf{S}'_i = \sum_{k=1}^{r_i} \mathbf{S}'_i{}^k, \quad (2.17)$$

де r_i – ранг матриці \mathbf{S}'_i .

Оскільки ранг матриці \mathbf{S}'_i дорівнює одиниці, її завжди можна подати у вигляді

$$\mathbf{S}'_i = [K_{ik}^{(1)} \cdot \mathbf{S}'_{ik}, K_{ik}^{(2)} \cdot \mathbf{S}'_{ik}, \dots, K_{ik}^{(n)} \cdot \mathbf{S}'_{ik}], \quad (2.18)$$

де \mathbf{S}'_{ik} – деякий ненульовий вектор-стовпець розміру n , $\mathbf{K}_{in} = [K_{ik}^{(1)}, K_{ik}^{(2)}, \dots, K_{ik}^{(n)}]$ – матриця-рядок коефіцієнтів.

За прийнятих вище позначень матрицю рівняння стану можна записати у вигляді:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \oplus \mathbf{A}_2 \oplus \dots \oplus \mathbf{A}_k, \quad (2.19)$$

$$\mathbf{A}_k = \lambda_k \mathbf{1}_{rk}, \quad (2.20)$$

де $\mathbf{1}_{rk}$ – одинична матриця порядку r_k ; знак \oplus означає пряму суму матриць:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{K}. \quad (2.21)$$

де \mathbf{K} – матриця, рядками якої є вектори \mathbf{K}_{ik} ;

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}'_0 + \sum_{i=1}^n \mathbf{S}'_i. \quad (2.22)$$

Отримані матриці $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ однозначно визначають рівняння стану динамічного об'єкта, заданого початковою перехідною характеристикою (2.15). Оскільки це рівняння задовольняє умови повної керованості та спостережності [72], то його порядок мінімальний.

Щодо алгоритму побудови рівнянь стану за часовими характеристиками необхідно зробити певні зауваження. Оскільки в співвідношенні (2.15) числа λ_i можуть бути як дійсними, так і комплексними, актуальним є розгляд випадків, коли деякі λ_i є комплексними. Зазвичай, комплексні корені λ_i є парними: λ_i і λ_i^* (λ_i^* – комплексно спряжене число щодо до λ_i). Тоді матриці, які визначаються співвідношеннями (2.19) – (2.21) є комплексні, що є доволі незручно. Для зведення отриманих матриць до дійсних можна використати

еквівалентні перетворення, відповідно до яких перетворювальна матриця \mathbf{P} , як це доведено в роботі [107], має вигляд

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 \oplus \mathbf{P}_2 \oplus \dots \oplus \mathbf{P}_k, \quad (2.23)$$

де $\mathbf{P}_k, (k = \overline{1, v})$ – матриця розміру 2×2 , яка відповідає k – парі комплексно спряжених значень $\underline{\lambda}$, подана як

$$\mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

2.3. Дискретні макромоделі лінійних об'єктів

У зв'язку з можливістю отримання апіорної інформація про електротехнічні об'єкти у дискретній формі, що забезпечується сучасними апаратно вимірювальними комплексами, доцільною є побудова їх математичних моделей у дискретній формі. У цьому випадку макромодель динамічного багатополюсника буде побудована у вигляді дискретного рівняння стану, яке у лінійному випадку розглядається як співвідношення (1.23). Безпосередньою перевагою такого рівняння стану є можливість визначення значення координат стану досліджуваної системи в наступній точці на основі лише однієї попередньої дискрети. Нині набули поширення алгоритми, що використовують як вхідну інформацію деяку сукупність дискрет вихідних величин. Для побудови дискретних макромоделей електротехнічних систем загалом, чи їх елементів, доцільно застосовувати алгоритм Хо-Калмана [48, 58, 124].

Тут вхідна інформація подається у формі матриці Ганкеля такого виду:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma}^{(1)} & \mathbf{\Gamma}^{(2)} & \mathbf{\Gamma}^{(3)} & \dots \\ \mathbf{\Gamma}^{(2)} & \mathbf{\Gamma}^{(3)} & \mathbf{\Gamma}^{(4)} & \dots \\ \mathbf{\Gamma}^{(3)} & \mathbf{\Gamma}^{(4)} & \mathbf{\Gamma}^{(5)} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Кожний елемент матриці Ганкеля в нашому випадку являє собою прямокутну матрицю розміром $m \times l$, кожний рядок якої відповідає вихідним змінним, стовпець – вхідним. Елемент із номером i, j цієї матриці визначає реакцію на i -му виході в разі подавання на j -й вхід одиничного сигналу в момент часу, зумовлений верхнім індексом. Кількість дискрет вхідних сигналів, що враховуються, тобто розмір матриці Ганкеля знаходять на підставі оцінювання її рангу, а матрицю Ганкеля розширюють доти, доки її ранг зростає. Позначимо таку матрицю Ганкеля мінімального розміру, що має максимальний ранг r , через $\bar{\Gamma}$ і здійснимо її сингулярне розкладання згідно з формулою

$$\bar{\Gamma} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{R} \quad (2.26)$$

де $\mathbf{\Lambda}$ – діагональна матриця, кількість ненульових елементів якої дорівнює n , \mathbf{Q} і \mathbf{R} – квадратні дійсні унімодулярні матриці.

Процедура розкладання (2.26) матриці Ганкеля є найскладнішою в розглянутому алгоритмі, однак існують програми [125, 145], що успішно її реалізують.

На основі отриманих матриць \mathbf{Q} , $\mathbf{\Lambda}$, \mathbf{R} , визначаємо пари матриць \mathbf{P} і \mathbf{T} , розмір яких збігається з розміром матриці $\bar{\Gamma}$ у такий спосіб:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}^T; \mathbf{T} = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{\Lambda}^+ \quad (2.27)$$

де $\mathbf{\Lambda}^+$ – псевдообернена діагональна матриця до матриці $\mathbf{\Lambda}$, тобто її елементи λ^+ визначаються так:

$$\lambda_i^+ = \begin{cases} 1/\lambda_i, & \text{якщо } \lambda_i \neq 0 \\ 0, & \text{якщо } \lambda_i = 0 \end{cases}, \quad (2.28)$$

де λ^+ – відповідний діагональний елемент матриці.

Припустимо, що розкладання (2.26) здійснено так, що в матриці $\mathbf{\Lambda}$ є n ненульових елементів, що заповнюють початок діагоналі і перейдемо до зміщеної матриці Ганкеля

$$\Gamma^\sigma = \begin{bmatrix} \Gamma^{(2)} & \Gamma^{(3)} & \Gamma^{(4)} & \dots \\ \Gamma^{(3)} & \Gamma^{(4)} & \Gamma^{(5)} & \dots \\ \Gamma^{(4)} & \Gamma^{(5)} & \Gamma^{(6)} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

вимагаючи, щоб розміри матриць $\bar{\Gamma}$ і Γ^σ збігалися.

Зазвичай, для формування зміщеної матриці Ганкеля необхідно мати додаткову дискрету вихідних змінних.

Наступний крок алгоритму – формування добутку

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} \cdot \bar{\Gamma}^\sigma \cdot \mathbf{T}. \quad (2.30)$$

Отримана матриця \mathbf{S} складається з блоків, що однозначно визначають матриці \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{C} :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} & \mathbf{G} \\ \mathbf{C} & \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Матриця \mathbf{D} , як неважко переконатись, збігається з матрицею $\Gamma^{(i)}$, якщо $i \rightarrow \infty$.

Зауважимо, що точне визначення максимального рангу матриці Ганкеля в алгоритмі Хо-Калмана для багатьох практичних випадків необов'язкове. При цьому дещо зменшується точність макромодельовання.

2.4. Дискретні макромоделі нелінійних елементів

Розглянемо нелінійні дискретні макромоделі, описані в просторі стану. Тут можна застосувати спеціальну спрощену форму рівняння стану, яка дала б змогу поширити алгоритм Хо-Калмана на нелінійні динамічні багатополіусники. Найпоширенішою формою дискретного рівняння стану є "білінійна модель" такого вигляду:

$$\vec{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(k)} + \mathbf{N}_1\vec{x}^{(k)}\mathbf{N}_2\vec{u}^{(k)} + \sum_{i=1}^r \mathbf{G}_i \left[\vec{u}^{(k)} \right]^i, \quad (2.32)$$

де $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2, \mathbf{G}_i (i = \overline{1, r})$ – дійсні матриці відповідних розмірів.

За умови деяких спрощень Ісідорі запропонував оригінальний алгоритм [209], який надалі узагальнили інші дослідники [201]. Розглянемо алгоритм Ісідорі в застосуванні до ідентифікації дещо спрощеної макромоделі виду (2.32) – приймаємо, що $r = 1$, $\mathbf{N}_1 = \mathbf{N}$, $\mathbf{N}_2 = 1$, тобто кількість входів дорівнює одиниці.

Уведемо в розгляд нескінченну послідовність

$$\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j, \dots\}, \dim \omega_j = 1 \times 2^{j-1} \quad (2.33)$$

$$\omega_j = \mathbf{C}\mathbf{P}_j \quad (2.34)$$

Матриці \mathbf{P}_j визначаються рекурсивно:

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{G}; \mathbf{P}_i = [\mathbf{F}\mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{N}\mathbf{P}_{i-1}] \quad i = 2, 3, \dots \quad (2.35)$$

З вхідної послідовності утворюємо сукупність векторів

$$\begin{aligned} \vec{u}_1^{(k)} &= \vec{u}^{(k)}; \\ \dim \vec{u}_j^{(k)} &= 2^{j-1} \times 1; \quad \vec{u}_j^{(k)} = \begin{bmatrix} \vec{u}_{j-1}^{(k)} \\ \vec{u}_{j-1}^{(k)} u^{(k+j-1)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

За нульових початкових умов отримуємо

$$\vec{x}^{(1)} = \mathbf{G}\vec{u}^{(0)} = \mathbf{P}_1\vec{u}_1^{(0)}; \quad (2.37)$$

$$\vec{x}^{(2)} = \mathbf{F}\mathbf{P}_1^{(0)} + \mathbf{N}\mathbf{P}_1\vec{u}_1^{(0)}\vec{u}^{(1)} + \mathbf{G}\vec{u}^{(1)} = \mathbf{P}_2\vec{u}_2^{(0)} + \mathbf{P}_1\vec{u}_1^{(1)}; \quad (2.38)$$

$$\vec{x}^{(3)} = \mathbf{P}_3\vec{u}_3^{(0)} + \mathbf{P}_2\vec{u}_2^{(1)} + \mathbf{P}_1\vec{u}_1^{(2)}; \quad (2.39)$$

...

$$\vec{x}^{(k)} = \sum_{j=1}^k \mathbf{P}_j \vec{u}_j^{(k-j)}. \quad (2.40)$$

Для вихідної послідовності отримуємо

$$\vec{y}^{(k)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(k)} = \mathbf{C} \sum_{j=1}^k \mathbf{P}_j \vec{u}_j^{(k-j)} = \sum_{j=1}^k \omega_j u_j^{(k-j)}. \quad (2.41)$$

Задача ідентифікації зводиться до знаходження на основі $\{\omega_j\}$ матриць $\mathbf{N}, \mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}$. У разі скінченної послідовності $\{\omega_1, \dots, \omega_m\}$ існує окрема реалізація. Як і для лінійного випадку, справедливе твердження, що реалізація є мінімальною за умови повної спостережуваності та керованості простору станів [209].

Для дослідження керованості та спостережуваності формуються матриці керованості й спостережуваності \mathbf{P} і \mathbf{Q} :

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{G}; \mathbf{P}_i = [\mathbf{F}\mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{N}\mathbf{P}_{i-1}], \mathbf{P} = [\mathbf{P}_1 \ \mathbf{P}_m]; \quad (2.42)$$

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{C}; \mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} Q_{i-1} & F \\ Q_{i-1} & N \end{bmatrix}, i = 2, 3, \dots; \mathbf{Q} = [Q_1, \dots, Q_m]^T. \quad (2.43)$$

Реалізація є спостережуваною, якщо $\text{rank}\mathbf{Q} = m$, і керованою, якщо $\text{rank}\mathbf{P} = m$ (m – порядок рівняння стану).

Утворимо матрицю Ганкеля для білінійних моделей. Цю матрицю будуватимемо з блоків \mathbf{S}_{ij} . Приймемо, що

$$\mathbf{S}'_{1j} = \omega_j, j = 1, 2, \dots \quad (2.44)$$

Наступні матриці $\mathbf{S}'_{i,j}$ ($i = 2, 3, \dots; j = 1, 2, \dots$) утворюються з $\mathbf{S}_{i-1,j+1}$ за таким правилом: розбиваємо $\mathbf{S}_{i-1,j+1}$ на праву та ліву підматриці

$$\mathbf{S}_{i-1,j+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{i-1,j+1}^1 & \mathbf{S}_{i-1,j+1}^2 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

й утворюємо блок

$$\mathbf{S}'_{i,j} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{i-1,j+1}^1 \\ \mathbf{S}_{i-1,j+1}^2 \end{bmatrix}. \quad (2.46)$$

Розміри підматриць у виразі (2.45) вибираємо з урахуванням розміру шуканої матриці $\mathbf{S}'_{i,j}$. Ці операції необхідні тому, що кількість стовпців матриці

$\mathbf{S}'_{i,j}$ відома й дорівнює 2^{j-1} . У результаті одержуємо шукані матриці $\mathbf{S}'_{i,j}$, причому $\dim \mathbf{S}'_{i,j} = 2^{i-1} \cdot 2^{j-1}$.

З отриманих матриць формуємо нескінченну матрицю Ганкеля

$$\mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} & \dots \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

Для побудови макромоделі використовуватимемо обмежені матриці Ганкеля $\mathbf{S}_{M'M}$:

$$\dim \mathbf{S}_{M'M} = (2^{M-1} - 1)(2^M - 1). \quad (2.48)$$

Ця матриця містить ту саму інформацію, що й послідовність

$$\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{M'+M-1}\}. \quad (2.49)$$

Для визначення матриць $\{\mathbf{F}, \mathbf{N}, \mathbf{G}, \mathbf{C}\}$ необхідно додатково ввести матриці $\mathbf{S}'_{M',M+1}$ і $\mathbf{S}'_{M'+1,M}$, з яких утворюємо $\mathbf{S}'_{M'M}$ та $\mathbf{S}^2_{M'M}$, використовуючи тільки ті стовпці, які виділені пунктиром:

$$\mathbf{S}'_{M',M+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}'_{11} & \overline{\mathbf{S}'_{11}} & \mathbf{S}'_{12} & \dots & \overline{\mathbf{S}'_{1,M+1}} & \mathbf{S}'_{1,M+1} \\ \mathbf{S}'_{21} & \mathbf{S}'_{22} & \mathbf{S}'_{22} & \dots & \mathbf{S}'_{2,M+1} & \mathbf{S}'_{2,M+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{S}'_{M'1} & \overline{\mathbf{S}'_{M'2}} & \mathbf{S}'_{M'2} & \dots & \overline{\mathbf{S}'_{M',M+1}} & \mathbf{S}'_{M',M+1} \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

У такий спосіб з матриці (2.50) отримуємо матрицю $\mathbf{S}'_{M'M}$, яка відповідає розбиттю (2.45). Аналогічно, з матриці $\mathbf{S}'_{M'+1,M}$ і поділу рядків, відповідно до (2.46), отримуємо матрицю

$$\mathbf{S}'_{M'+1,M} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}'_{11} & \mathbf{S}'_{12} & \dots & \mathbf{S}'_{1,M+1} \\ \hline \mathbf{S}'_{21} & \mathbf{S}'_{22} & \dots & \mathbf{S}'_{2,M+1} \\ \hline \mathbf{S}'_{21} & \mathbf{S}'_{22} & \dots & \mathbf{S}'_{2,M+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline \mathbf{S}'_{M'+1,M} & \mathbf{S}'_{M'+1,2} & \dots & \mathbf{S}'_{M'+1,M} \\ \hline \mathbf{S}'_{M'+1,M} & \mathbf{S}'_{M'+1,2} & \dots & \mathbf{S}'_{M'+1,M} \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Матриці $\mathbf{S}'_{M'M}$ і $\mathbf{S}'_{M'M}$ мають таку саму вимірність, що й матриця $\mathbf{S}'_{M'M}$.

Подальші процедури ґрунтуються на таких співвідношеннях:

$$\mathbf{S}_{M'M} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{P}; \quad \mathbf{S}'_{M'M} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{P}; \quad \mathbf{S}^2_{M'M} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{P}, \quad (2.52)$$

які впливають з виразів (2.42) – (2.44) [209].

Доведено [107], що на основі співвідношень (2.52) можна визначити матриці $\mathbf{F}, \mathbf{N}, \mathbf{G}, \mathbf{C}$ тільки в тому разі, коли

$$\text{rank} \mathbf{S}'_{M'M} = \text{rank} \mathbf{S}'_{M',M+1} = \text{rank} \mathbf{S}'_{M'+1,M} \quad (2.53)$$

Алгоритм визначення шуканих матриць $\mathbf{F}, \mathbf{N}, \mathbf{G}, \mathbf{C}$, тобто процедуру ідентифікації макромоделі виду (2.32), можна подати у вигляді такої послідовності кроків:

1. Будуємо на основі послідовності (2.33) модифіковану матрицю Ганкеля $\mathbf{S}_{M'M}$, ранг якої дорівнює n .
2. Здійснюємо розклад побудованої матриці такого виду:

$$\mathbf{S}'_{M'M} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{P}, \quad (2.53)$$

де $\dim \mathbf{P} = n \times (2^M - 1)$; $\dim \mathbf{Q} = (2^M - 1) \times n$.

3. На основі $\mathbf{S}'_{M'M}$ будуємо матриці $\mathbf{S}'_{M'M}$, $\mathbf{S}'_{M'M}$.
4. Обчислюємо матриці білінійної макромоделі згідно з формулами:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^T)^{-1} \cdot \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{S}'_{M'M} \cdot \mathbf{P}^T (\mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^T)^{-1}; \quad (2.54)$$

$$\mathbf{G} = (\mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{Q})^{-1} \cdot \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{S}'_{MM} \cdot \mathbf{P}^T (\mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^T)^{-1}, \quad (2.55)$$

де \mathbf{G} – перший стовпець матриці \mathbf{P} , \mathbf{C} – перший рядок матриці \mathbf{Q} .

Отримана у такий спосіб макромодель характеризується мінімальною вимірністю простору стану, яка дорівнює n .

У теорії систем відомі результати щодо реалізації дискретних макромоделей нелінійних систем загальнішого вигляду, зокрема, з більшою кількістю входів і виходів [201]. Спільною рисою цих алгоритмів є громіздкість обчислювальних процедур. Однак цей недолік суттєво компенсується універсальністю процедур ідентифікації, які не залежать від фізичної природи досліджуваних елементів і типів сигналів, які для цього використовуються.

2.5. Процедура побудови дискретних макромоделей з використанням оптимізації

З нашого погляду найзручнішою математичною формою дискретної макромоделі є дискретне рівняння стану у вигляді (1.22). Прийнята форма дискретних рівнянь стану з чітко вираженою лінійною частиною дозволяє у процесі побудови макромоделей використовувати стандартні процедури теорії динамічних систем, зокрема алгоритм Хо-Калмана, доповнений оптимізаційними процедурами [10, 35, 51, 121, 124].

У даному разі найзручнішою апроксимацією нелінійної функції $\Phi(\cdot)$ є білінійна форма вигляду:

$$\mathbf{x}_i = \Phi_i(\cdot) = \mathbf{x}^T \mathbf{M}_i \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{x}^T \mathbf{N}_i \bar{\mathbf{v}}, \quad (2.56)$$

де нижній індекс i визначає кількість елементів відповідного вектора та кількість матриць. Верхній індекс, який визначає кількість дискрет змінних, тут не вказаний.

Суть запропонованого підходу для побудови макромоделей виду (1.22) полягає у тому, що задається певна множина дискрет $\{\tilde{\mathbf{v}}_i^{(k)}, \tilde{\mathbf{y}}_i^{(k)}\}$, де $\tilde{\mathbf{v}}_i^{(k)}$ -

дискретне значення i -го вектора вхідних сигналів, а $\tilde{\mathbf{y}}_i^{(k)}$ - відповідний дискретний відгук на цей сигнал. Цю множину можна отримати як експериментальним шляхом, так і шляхом комп'ютерного моделювання на фізико-топологічному рівні. Максимальне значення i у цих виразах може змінюватись від 1 до деякого N , залежно від властивостей модельованого об'єкту. Процедура побудови макромоделі полягає у визначенні оптимізаційним шляхом параметрів системи (1.22), які б забезпечували співвідношення отриманих в процесі макромоделювання координат процесу, і відомих значень вхідних і вихідних сигналів таким чином:

$$\tilde{\mathbf{v}}_i^{(k)} = \bar{\mathbf{v}}_i^{(k)}; \|\tilde{\mathbf{y}}_i^{(k)} - \mathbf{y}_i^{(k)}\| < \delta, \quad (2.57)$$

з додатковою вимогою мінімізації середньоквадратичної відстані між множинами $\{\tilde{\mathbf{y}}_i^{(k)}\}$ і $\{\bar{\mathbf{y}}_i^{(k)}\}$, яка визначається для всіх можливих комбінацій індексів k та i . Таким чином, згідно з співвідношеннями (2.57) свідомо передбачається, що отримана макромодель не є абсолютно точною, що є цілком природньо хоча б тому, що задані значення $\tilde{\mathbf{y}}_i^{(k)}$ завжди визначається з певною похибкою. Прийняте припущення дозволить надалі значно спростити вираз для шуканої макромоделі, зокрема понизити її порядок і спростити вираз нелінійного доданка.

Деталізуємо процедуру побудови дискретної макромоделі у формі (1.22) деякого елемента електротехнічної системи. На першому етапі, виходячи з множини $\{\tilde{\mathbf{y}}^{(k)}\}$, отриманих за малих значень чи приростів вхідних дій $\{\tilde{\mathbf{v}}^{(k)}\}$, знаходимо матриці $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ з рівняння (1.23). Для цього, використовуючи алгоритм Хо–Калмана, здійснимо сингулярний розклад матриці Ганкеля, складеної з елементів множини $\{\tilde{\mathbf{y}}^{(k)}\}$ у вигляді співвідношення (2.26). Важливим моментом під час здійснення сингулярного розкладу матриці Γ є зменшення кількості ненульових елементів матриці Λ , оскільки саме ця кількість визначає порядок будованої макромоделі. У багатьох алгоритмах така мінімізація не передбачена й зумовлює появу паразитних малих сталих часу,

що надалі суттєво утруднює розрахунок відповідних електротехнічних систем. Тому для вирішення цієї задачі пропонується застосовувати оптимізаційні процедури, які б дозволили мінімізувати число r за умови гарантування заданої точності відтворення перехідного процесу макромоделлю. Далі визначають матриці F, G, C на основі співвідношень (2.30) та (2.31).

Подальшим етапом побудови макромоделі є ідентифікація параметрів, які визначають нелінійну частину. Для цього спочатку вибирається форма запису нелінійного доданка у рівнянні (1.22) з відповідними коефіцієнтами. Щоб визначити ці коефіцієнти, використовувалась множина вихідних дискрет $\{\tilde{y}^{(k)}\}$, отримана в результаті дії великих вхідних сигналів, на основі якої будувалась надлишкова система рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів, які знаходились шляхом оптимізації, починаючи від нульових значень. Функцією мети в даному разі є середньоквадратичне відхилення значень кривих модельованого перехідного процесу від заданого.

Якщо вид нелінійності в досліджуваному об'єкті є невідомий, то в такому разі вид апроксимаційного виразу доцільно вибрати з погляду алгоритму ідентифікації. Зазначимо, що для вибраної форми дискретних рівнянь (1.22) можна застосувати декілька алгоритмів ідентифікації, які однозначно визначають алгоритм апроксимації нелінійної частини, зокрема удосконалений алгоритм Ісідори для білінійної апроксимації [209]:

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = F\bar{x}^{(k)} + \sum_{i=1}^r G_i(\bar{v}^{(k)})^i + N_1\bar{x}^{(k)} \cdot N_2\bar{v}^{(k)} \\ \bar{y}^{(k+1)} = C\bar{x}^{(k+1)} + D\bar{v}^{(k+1)} \end{cases}, \quad (2.58)$$

де N_1, N_2, G_i ($i = \overline{1, r}$) – матриці коефіцієнтів відповідних розмірів.

З іншого боку, ефективною є апроксимація нелінійностей степеневим рядом. Проте для такого способу апроксимації нелінійностей досі невідомий універсальний алгоритм безпосередньої ідентифікації параметрів макромоделі.

Алгоритм ідентифікації коефіцієнтів макромоделі вибирається з урахуванням згаданих вище залежностей. Оскільки алгоритм ідентифікації

може накладати суттєві обмеження на форму представлення макромоделі та спосіб апроксимації нелінійностей, які в свою чергу, повинні забезпечити можливість достатньо точного описання модельованого об'єкта, то можна стверджувати, що алгоритм ідентифікації залежить від модельованого об'єкта. Аналогічна залежність виникає і через наявний інформаційний масив: алгоритм повинен бути застосовним для ідентифікації коефіцієнтів макромоделі конкретного об'єкта з урахуванням обмежень на множину перехідних характеристик.

Іншими словами, модельований об'єкт визначає множину алгоритмів ідентифікації, які можуть бути застосовані для побудови його макромоделі. Задачі синтезу, зазвичай, є некоректними в сенсі Тихонова [142]. Незначні похибки обчислень зумовлюють значні похибки в отриманих результатах. Це, зокрема, характерно для доволі часто використовуюваного алгоритму Хо-Калмана [48], в якому можуть з'являються невластиві елементи вектора \vec{x} .

Альтернативою є використання оптимізаційного підходу до ідентифікації параметрів макромоделі. Ідентифікація макромоделі є тим етапом, на якому фактично здійснюється перевірка ефективності алгоритму ідентифікації для вирішення конкретної задачі, а також перевірка придатності вибраної форми представлення макромоделі та способу апроксимації нелінійностей для описання вибраного набору вхідних даних. Критеріями оцінювання тут виступають:

- об'єм обчислень, який необхідний для ідентифікації макромоделі;
- отримана точність відтворення набору вихідних даних.

Слід також зазначити, що на цьому етапі аналізується лише точність відтворення вихідних даних і не враховується адекватність макромоделі щодо нових збурень.

Перевірка адекватності макромоделі виконується з використанням додаткових даних про модельований об'єкт, які не використовувалися для ідентифікації макромоделі. Такий етап обов'язковий під час моделювання нелінійних елементів, оскільки для них не існує гарантії точного відтворення

моделлю перехідних процесів, що відбуваються в модельованому об'єкті й зумовлених іншими збуреннями ніж ті, які використовувалися під час ідентифікації макромоделі.

Суть оптимізаційної ідентифікації макромоделей полягає в наступному. Розглянемо деякий об'єкт, для якого будується макромодель у формі (1.22) чи якійсь іншій формі, яка описується деяким набором невідомих параметрів [270]. І нехай ми володіємо набором його перехідних характеристик $\{v_i^{(k)}; y_i^{(k)}\}$, де k – номер дискрети, i – номер характеристики. Уведемо функцію мети, що відображає похибку, з якою будована макромодель відтворює поведінку модельованого об'єкта. У найпростішому разі це може бути середньоквадратичне відхилення:

$$Q(\vec{\lambda}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \sum_k (\vec{y}_i^{(k)} - \bar{y}_i^{(k)})^2}, \quad (2.59)$$

де $\vec{y}_i^{(k)}$ – відгук об'єкта, розрахований за допомогою будованої макромоделі, $\vec{\lambda}$ – набір параметрів макромоделі.

Під час побудови макромоделі в формі (1.22) вектор $\vec{\lambda}$ включатиме елементи матриць **F**, **G**, **C**, **D** і коефіцієнти вектор-функції Φ . Оптимальним набором коефіцієнтів макромоделі буде такий набір $\vec{\lambda}^*$, за якого функція (2.59) досягає мінімуму. Таким чином ідентифікація коефіцієнтів макромоделі зводиться до знаходження глобального мінімуму цієї функції.

Такий підхід є придатним для ідентифікації макромоделей у будь-якій формі представлення й за будь-якого способу апроксимації нелінійностей. Крім того він не накладає особливих вимог щодо інформації, на основі якої виконується ідентифікація макромоделі. Це дає змогу ефективно використовувати оптимізаційний підхід як універсальний алгоритм під час ідентифікації параметрів динамічних макромоделей.

Зазначимо, що в якості оптимізаційних алгоритмів застосовуються як детерміновані, так і недетерміновані методи оптимізації [3, 20, 88, 89, 125, 135]. Серед детермінованих методів слід згадати метод градієнтного спуску, метод

Ньютона, метод важкої кульки, метод покоординатного спуску, метод обертання координат (Розенброка), метод Недлера-Міда. В якості оптимізаційних підходів для розв'язання оптимізаційних задач знайшли своє застосування такі стохастичні методи оптимізації як метод хаотичного пошуку [288], алгоритми з парною пробою чи перерахунком, метод випадкового спуску, метод хаотичного пошуку зі змінним законом розподілу, а також методи напрямної сфери та прямого конуса Растрігіна [91]. Серед згаданих методів найкращі властивості має метод прямого конуса Растрігіна з погляду розв'язування багатоекстремальних задач. Саме тому він знайшов найширше застосування під час вирішення багатоекстремальних задач [116, 119]. Оптимізаційний підхід для побудови макромоделей володіє як перевагами, так і певними недоліками відносно прямих методів ідентифікації, розглянутих в розд. 2.1-2.4. Недоліком оптимізаційного підходу можна вважати складність обчислювальної задачі під час обробки великої кількості вхідної інформації та потенційну можливість отримати неадекватну модель. У випадку отримання неадекватної моделі її побудова може бути здійснена повторно шляхом додання додаткових масивів даних, які не використовувались раніше у вигляді базового набору перехідних характеристик.

У зв'язку з цим пропонується здійснювати процедуру побудови макромоделей електричних кіл та ЕТС на основі алгоритму, показаного на Рис. 2.1. Перевагами цього алгоритму є його універсальність як щодо модельованих об'єктів, так і форми представлення макромоделі, можливість використання будь-яких масивів даних про модельований об'єкт за умови, що їх кількість є достатньою для опису модельованого об'єкту.

В процесі побудови макромоделі можна використовувати різноманітні дані про досліджуваний об'єкт: це можуть бути як масиви перехідних характеристик отримані під час математичного чи комп'ютерного експерименту, так і паспортні дані, які можна ввести у функцію мети (2.59) із різними ваговими коефіцієнтами, базуючись на принципах багатокритеріальної оптимізації.

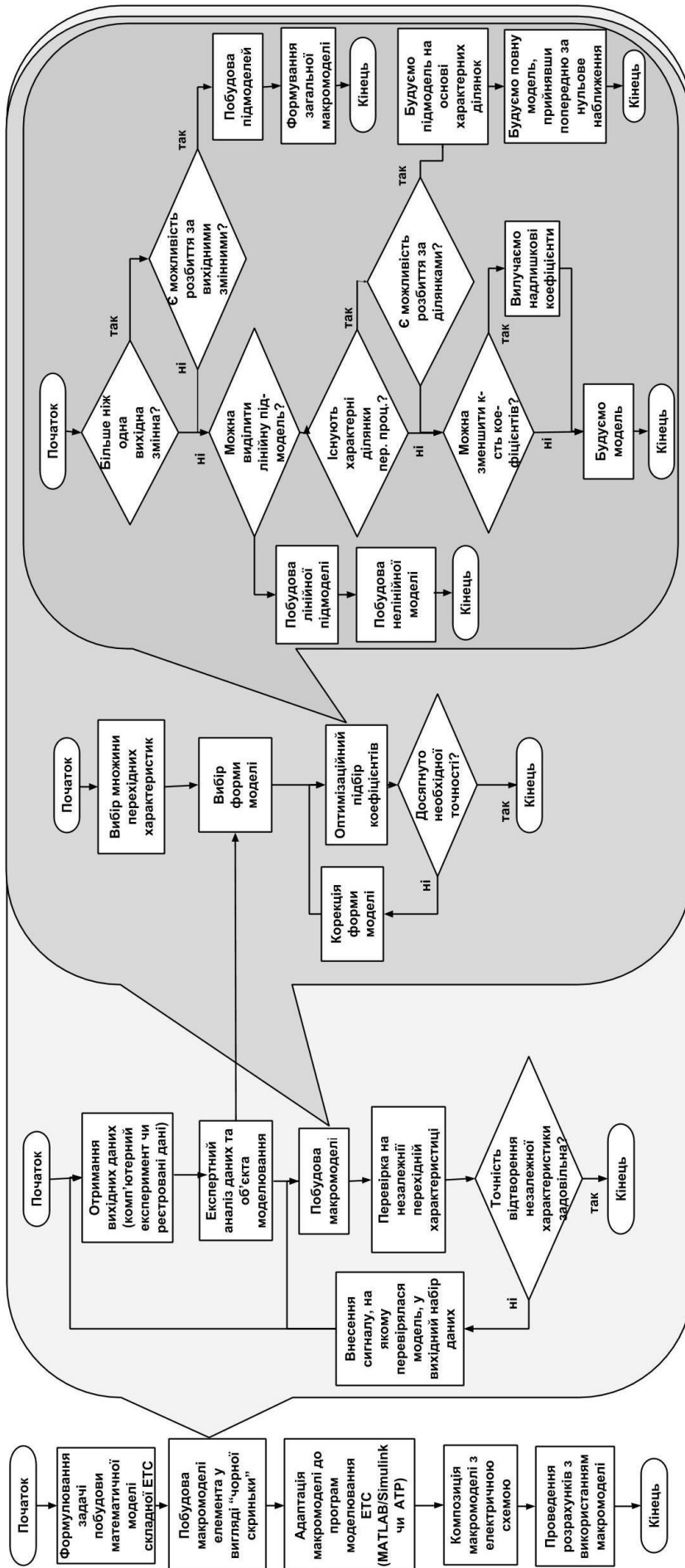


Рис. 2.1. Удосконалений алгоритм побудови математичних моделей ЕТС на основі макромоделей у вигляді "чорної скриньки"

Складність оптимізаційної задачі зумовлює необхідність введення додаткових кроків у процес її побудови з метою її спрощення. Ним може бути використання діакоптичного підходу, що передбачає розбиття процесу побудови на окремі складові, відображені в алгоритмі з рис. 2.1. Основними підходами спрощення є:

- 1) первинна побудова лінійної макромоделі у вигляді (1.22), яка може використовуватись як алгоритмом Хо-Калмана, так і за допомогою алгоритмів оптимізації; подальше уточнення моделі введенням коефіцієнтів, які не входили до лінійної підмоделі; фіксація отриманих коефіцієнтів лінійної частини та її надбудова коефіцієнтами нелінійної частини;
- 2) розбиття за вихідними змінними;
- 3) вилучення надлишкових коефіцієнтів з макромоделі;
- 4) виконання побудови за характерними ділянками перехідних характеристик чи їх видами;
- 5) використання експертного аналізу для вибору форми макромоделі та базових перехідних характеристик;
- 6) пришвидшення побудови макромоделі шляхом застосування паралельних обчислень.

На основі застосування експертного аналізу на первинному етапі постановки задачі побудови макромоделі здійснюється аналіз апріорних даних, вибір структури та форми макромоделі. Подальші етапи передбачають оптимізаційний підбір коефіцієнтів, уточнення моделі та її верифікацію.

2.6. Особливості моделювання елементів електротехнічних систем на основі діакоптики та макромодельовання

Основною проблемою, яка виникає під час побудови макромоделей елементів електротехнічних систем є велика вимірність оптимізаційної задачі, яка 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 [275]. Таким чином, процес розрахунку повинен бути розподіленим на етапи.

Ідею діакоптичного підходу до розрахунку складних систем запропонував Г. Крон [57, 151]. Пізніше ця ідея була деталізована й розвинута стосовно електричних кіл Г. Пуховим під назвою “метод підсхем” [90, 151]. Діакоптика динамічних кіл (чи, умовно, динамічна діакоптика) як окремий розділ теорії електричних кіл передбачає розгляд динамічних процесів у колах шляхом їхнього розбиття на частини, які розглядають окремо. До останнього часу [151] домінувальними були два підходи. Перший базується на застосуванні алгоритмів стаціонарної діакоптики з використанням відомих формальних представлень L -і C -елементів на кожному часовому кроці інтегрування h наближеними дискретними резистивними схемними моделями з наступним розрахунком отриманих резистивних схем частинами. У другому відомому підході, певний внесок у розроблення якого стосовно розрахунку перехідних процесів зроблено у [92, 93, 125], використовується ідея формування рівнянь стану для кожної підсистеми окремо, причому вплив решти підсхем враховується на кожному кроці інтегрування h фіктивними джерелами, параметри яких визначаються станом усього кола в попередній момент часу.

Суть діакоптичних методів розрахунку динамічних режимів електричних кіл полягає у тому, що окремі підсхеми навантажені джерелами струму чи напруги, які 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.

Обидва згадані підходи дозволяють врахувати інерційні властивості підсхем непрямим способом, оскільки кожний цикл розрахунку (з визначенням усіх змінних стану кола) включає аналіз підсхем лише на одному кроці інтегрування. Використання сучасних програмних комплексів вимагає розроблення принципово нового підходу, у якому властивості пам'яті динамічних підсистем враховуються безпосередньо. Таким чином, необхідно

вирішити проблему автономних процесів у підсистемах, тобто за перехідними процесами в окремих підсхемах без врахування впливу з боку сусідніх підсистем, на довільному інтервалі часу $H=th$ (де t – довільне ціле число) та розрахувати перехідний процес усього кола.

Зокрема, це стосується методів забезпечення стійкості діакоптичних процедур розрахунку динамічних режимів і критеріїв вибору кроку окремих підсхем й схеми в цілому.

Для реалізації діакоптичного підходу на схемному рівні математична модель системи повинна мати певні властивості, які дозволяють розділити змінні та рівняння на відповідні групи. Складові частини такої математичної моделі – це рівняння елементів систем у вигляді

$$F_{(i)}(\mathbf{x}_{(i)}, \mathbf{v}_{(i)}) = 0, \quad (2.60)$$

$$\mathbf{y}_{(i)} = \mathbf{f}_{(i)}(\mathbf{x}_{(i)}, \mathbf{v}_{(i)}) \quad (2.61)$$

і рівняння зв'язків

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{X}) = 0, \quad (2.62)$$

де $\mathbf{v}_{(i)}, \mathbf{y}_{(i)}$ - підвектори, складені зі зовнішніх змінних багатополусних елементів, $F_{(i)}(\mathbf{x}_{(i)}, \mathbf{v}_{(i)})$ - деяка сукупність алгебро-диференціальних чи різницевих співвідношень, які є математичною макромоделлю елемента, $\mathbf{f}_{(i)}(\mathbf{x}_{(i)}, \mathbf{v}_{(i)})$, $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{X})$ - вектор-функції відповідного розміру, \mathbf{X} – вектор, який формується із зовнішніх змінних ЕТС, \mathbf{x} – вектор, який формується із внутрішніх змінних ЕТС.

Для схемної інтерпретації взаємозв'язків окремих елементів використовують додаткові керовані джерела струму і напруги, які під'єднують до зовнішніх вузлів окремої частини системи [257]. Такі джерела будемо називати фіктивними. Поділ електричного кола досліджуваної системи на частини можливий двома способами. В першому разі її розбиття здійснюється шляхом розщеплення вузлів, наприклад, як це показано на рис. 2.2.

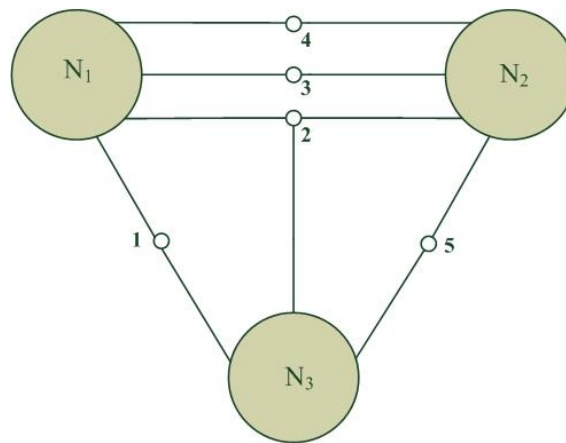


Рис. 2.2. Схема поділу ЕТС на частини розщепленням вузлів

Для такого розбиття кількість входів і місця під'єднання фіктивних джерел визначаються деревом багатополюсника [9, 107], при цьому типи джерел визначаються прийнятою формою макромоделі даного елемента і можуть бути довільними, як це показано на рис. 2. 3.

З урахуванням таких фіктивних джерел процедура формування рівнянь (2.60) і (2.61) не складає труднощів. Зазвичай, вектор \mathbf{v} буде складатись зі струмів фіктивних джерел струму (ФДС) і напруг фіктивних джерел напруги (ФДН), а вектор $\mathbf{y}_{(i)}$ – з напруг на ФДС і струмів ФДН відповідно.

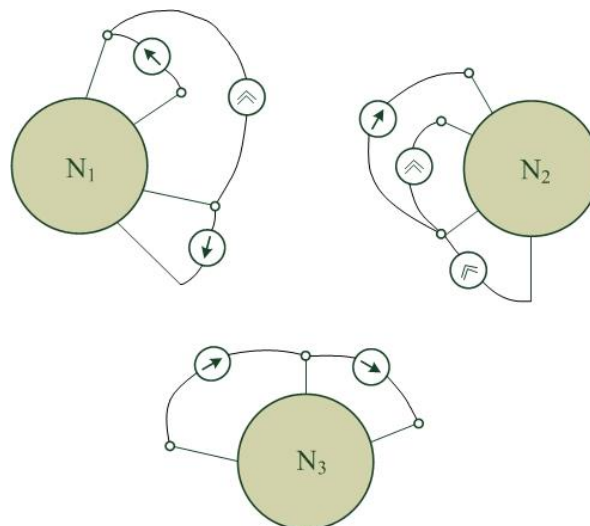


Рис. 2.3. Вибір типів фіктивних джерел для під'єднання підсхем

У другому випадку під час розділення схеми на частини шляхом розриву віток взаємний зв'язок між підсхемами відображається за допомогою фіктивних джерел напруги, які під'єднують між точками розриву відповідно до

рис. 2.4, що призводить до ускладнення процедури формування рівнянь зв'язку.

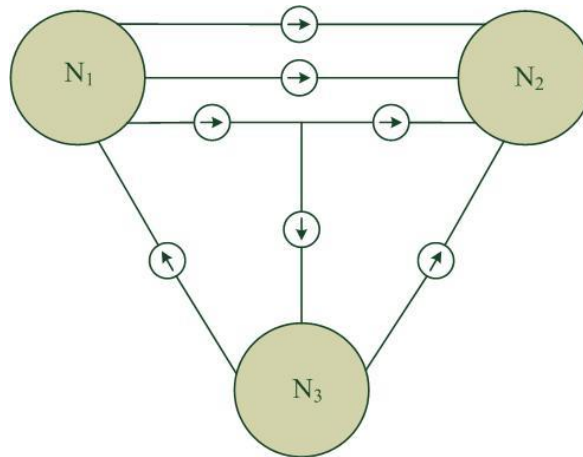


Рис. 2.4. Приклад поділу схеми за вітками.

Розглянемо процедуру формування рівнянь зв'язку для першого способу під'єднання фіктивних джерел. Рівняння зв'язків складаються з двох типів співвідношень – топологічних залежностей і залежностей типу (2.61). Для формування топологічних залежностей користуються графом (рис 2.5), складеним з дерев багатополісників, що відображають окремі частини системи.

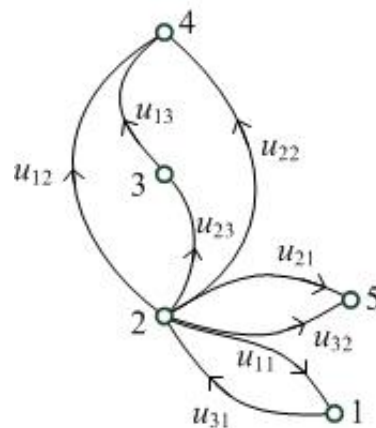


Рис. 2. 5. Граф, який відображає топологічні залежності зовнішніх змінних

Цей граф назвемо графом підсистем. Він близький до графа фіктивних джерел, але на відміну від останнього є мінімальним, що унеможливорює виродження.

Позначення віток графа на рис. 2.4 відповідає незалежним зовнішнім

змінним підсистем, причому перша цифра в індексі відповідає номеру елемента. Запишемо топологічні співвідношення для такого графа:

$$\Pi \mathbf{i} = 0, \Gamma \mathbf{u} = 0, \quad (2.63)$$

які можна подати у вигляді одного рівняння

$$\mathbf{TX} = 0. \quad (2.64)$$

Тут вектор

$$\mathbf{X}^T = [\mathbf{X}_{(1)}^T; \mathbf{X}_{(2)}^T; \dots; \mathbf{X}_{(M)}^T]. \quad (2.65)$$

Кількість рівнянь у системі (2.63) в два рази менша розміру вектора зовнішніх змінних X . Для того, щоб отримати систему рівнянь зв'язків, визначену відносно зовнішніх змінних, необхідно доповнити рівняння (2.63) додатковими рівняннями зв'язку з підвекторами. Відповідно, рівняння зв'язку підсхем є системою алгебричних рівнянь, у загальному нелінійних, яку можна записати так:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}_{(1)}(\mathbf{x}_{(1)}; \mathbf{V}_{(1)}) - \mathbf{y}_{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{g}_{(M)}(\mathbf{x}_{(M)}; \mathbf{V}_{(M)}) - \mathbf{y}_{(M)} \\ \mathbf{TX} \end{bmatrix} = 0. \quad (2.66)$$

Зазначимо, що вибір незалежних змінних для запису рівнянь підсистем у діакоптичному підході не має суттєвого значення і для кожного елемента він може бути своїм.

Потрібно зазначити, що вдалий вибір типів фіктивних джерел суттєво визначає характер обчислювального процесу під час розрахунку динамічних режимів системи.

Важливо зазначити, що діакоптичний підхід є зручним для реалізації обчислень динамічних режимів електричних кіл на багатопроцесорних комп'ютерних засобах, а розроблення методики моделювання динамічних процесів в магнітоелектричних колах на основі дікоптики та

макромодельовання актуальною та досліджуваною проблемою [147, 246, 267, 276, 281].

У той же час слід звернути увагу на можливу нестійкість обчислювальних діакоптичних процедур, зумовлену певним запізненням зовнішніх змінних. Усунути цей недолік можна шляхом:

- апроксимації внутрішніх змінних макромоделей (підсхем), якщо крок дискретизації макромоделі є більший за мінімальний крок обчислень аналізованої схеми;

- вибору оптимального методу дискретизації макромоделі, яким є, на нашу думку, метод трапецій;

- використання для узгодження макромоделей (підсхем) неідеальних джерел струму та напруги.

Зазначені рекомендації отримано на основі аналізу числових експериментів, здійснених із використанням макромоделей і математичних моделей, як у середовищі АТР, так і MATLAB/Simulink [173, 200], які будуть описані нижче в розд. 6.

Крім розглянутого способу застосування діакоптичного підходу на схемному рівні, можливим є його застосування на рівні математичних співвідношень, а також розбиття процесу побудови на етапи. Для спрощення процесу побудови найкраще здійснювати такі кроки (вони можуть здійснюватися як незалежно один від одного, так і в комплексі) [121, 122, 125]:

- 1) побудову лінійної моделі з наступним доповненням нелінійною частиною;

- 2) розбиття за вхідними змінними;

- 3) вилучення з оптимізаційного процесу надлишкових коефіцієнтів;

- 4) розбиття за режимами, дані яких використані для побудови макромоделі та характерними ділянками перехідних характеристик;

- 5) використання уточнювальних підмоделей;

- 6) масштабування за умови значного розкиду порядків зовнішніх змінних.

Зазначені способи дозволяють спростити процедуру побудови нелінійної макромоделі та можуть бути адаптованими для розрахунку на одно- та багатопроцесорних машинах.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто класичні методи побудови макромоделей, алгоритми побудови лінійних неперервних макромоделей на основі частотних та часових характеристик.

2. Розглянуто процедуру побудови дискретних лінійних та нелінійних макромоделей у вигляді “чорної скриньки” у формі дискретних рівнянь стану.

3. Розглянуто особливості застосування діакоптичних процедур на схемному рівні та у вигляді математичних співвідношень для покращення процедури макромодельовання складових електротехнічних систем.

4. Удосконалено алгоритм створення математичних макромоделей складних електричних кіл та ЕТС у формі дискретних рівнянь у вигляді “чорної скриньки” з використанням експертного аналізу та розбиттям процесу побудови на етапи.

РОЗДІЛ 3

ІНТЕГРАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І МАКРОМОДЕЛЕЙ В СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

3.1. Порівняльний аналіз комп'ютерних програм моделювання перехідних процесів електротехнічних систем

Математичне та комп'ютерне моделювання динамічних режимів та перехідних процесів ЕТС, їх швидкий аналіз з врахуванням перспективи усунення небажаних наслідків, є основним засобом досліджень під час проектування, дослідження та експлуатації електротехнічних об'єктів. З метою відтворення динаміки режимів і процесів необхідно використовувати сучасні комп'ютерні середовища, які передбачають дослідження перехідних процесів електроенергетичних систем та електромеханічних перетворювачів [17, 19, 29, 33, 34, 45, 101, 197, 280].

В Україні, і за кордоном відбувається інтенсивне розроблення засобів для цифрового та математичного моделювання перехідних процесів електричних кіл і систем. Найбільш поширеними й широкоживаними програмами аналізу перехідних процесів є програми типу EMTP такі як: ATP, EMTP, MicroTran, PSCAD, NETOMAC та з іншими принципами функціонування (CAPE, SIMSEN, Paladin Software, MATLAB/Simulink тощо), орієнтовані для використання на однопроцесорних машинах [167, 177, 184, 194, 196, 232, 234, 235, 283].

За останні роки стало досить складно покращувати можливості та характеристики обчислювальних машин з одним процесором через фізичні особливості, які накладають обмеження на розвиток обчислювальної техніки. У зв'язку з цим значно зросла увага до методів паралельного оброблення інформації та перспектив його застосування для удосконалення комп'ютерного моделювання складних електричних кіл [141, 176, 243, 274]. Це дозволило розробити спеціальні цифрові симулятори (пристрої моделювання), призначені для аналізу електричних кіл електротехнічних

систем і отримати вагомі результати в пришвидшенні процесу розрахунків. Динамічний аналіз є найпоширенішим способом моделювання електротехнічних систем. Проте, пристрої силової електроніки, електропересильні високої напруги постійного струму, статичні компенсатори реактивної потужності вимагають суттєвого розвитку й удосконалення методів моделювання динамічних режимів і перехідних процесів з метою подальшого забезпечення моніторингу та диспетчерського керування електротехнічними системами [1, 12, 50, 59, 64, 82, 87, 96, 97, 99, 113, 126, 154, 156].

Наявні комп'ютерні та програмні засоби не завжди можуть розв'язати задачі, пов'язані з великою вимірністю досліджуваних електротехнічних систем, і, зазвичай, це пов'язано із затримками та неузгодженостями комп'ютерного часу і тривалого аналізу їх динамічних режимів. Окрім цього, спостерігаються також зростаючі вимоги до адекватності й точності цифрового моделювання електромагнітних перехідних процесів у реальному часі [17, 126–132, 242]. Створено цифрові пристрої моделювання на основі цифрових сигнальних DSP-процесорів, які показали адекватні результати моделювання та високу швидкодію. Проте, під час експлуатації таких пристроїв виявлено обмеження в працездатності, оперативності, гнучкості та застосовності до різних видів ЕТС. У зв'язку з цим виникла необхідність аналізу поділу електротехнічних систем на підсистеми з метою подальшого їх аналізу засобами паралельного оброблення інформації, розроблення відповідних паралельних алгоритмів, можливості й доцільності використання наявних комп'ютерних засобів для їх практичної реалізації.

Зараз для дослідження перехідних процесів в реальному часі використовуються цифрові мережеві аналізатори перехідних процесів (DTNA- Digital Transient Network Analysers). У нормальному робочому режимі такі пристрої повинні виконувати неперервні дії, необхідні для обчислення характеристик за часовий крок, менший ніж дійсний час, притаманний для даного процесу. За такої умови можна виконувати реальне

тестування устаткування, яке змінює симуляційну модель, і отримувати зворотній вплив на поведінку устаткування. Використання паралельного оброблення інформації є ключовим моментом для досягнення відповідної обчислювальної потужності, необхідної для розв'язування систем рівнянь в реальному часі [21, 23, 133, 156].

Аналіз, систематизація та класифікація програмних засобів і середовищ комп'ютерного моделювання перехідних процесів електротехнічних систем необхідна для вдалого вибору середовища з метою адаптації власних розроблених чи описаних у літературі моделей для подальшого вирішення поставленої конкретної практичної задачі [218].

Існує низка платформ, на базі яких розвиваються середовища та спеціальні моделюючі пристрої, призначені для аналізу електротехнічних систем. Кожна з таких платформ, як наприклад, MATLAB, EMTP, PSCAD/EMTDC, POWERSYS, PFLOW, RDTTS, Ptolemy, має свої переваги та недоліки і використовується для вирішення конкретних задач [167, 232].

Протягом останніх 30-ти років програма EMTP стала найбільш широко використовуваною програмою в промисловості [190, 191, 222]. На даний момент оновлене середовище EMTP-RV є кінцевим результатом згаданої програми, яке володіє покращеними обчислювальними можливостями. Програма створена з використанням мови програмування Fortran з Microsoft Visual Studio Environment, дозволяє застосовувати об'єктно-орієнтовані методи програмування та призначена для швидких розрахунків динамічних систем. Це передбачає використання спеціально виділених блоків пам'яті. Відкриті коди програми надають користувачу можливість використовувати ускладнені методи та розширювати бібліотеку моделей елементів електричних кіл та пристроїв електроніки. Програма володіє покращеними методами для аналізу нелінійних моделей, дає швидку збіжність процесу інтегрування, не містить топологічних обмежень на структуру схеми, дозволяє створення та аналіз великих та надвеликих мереж, і, як, наслідок, підмоделей з довільним рівнем ієрархії.

Перспективним є RTDS Simulator (Real-Time Digital Simulator – цифровий симулятор в реальному часі), розроблений дослідним центром HVDC Manitoba Hydro. Це цифровий апаратно-програмний комплекс, який може виконувати повне моделювання перехідних режимів (електромагнітних та електромеханічних) електротехнічних систем на основі алгоритмів, закладених в середовища типу EMTP (ATP, PSCAD), які самостійно не використовуються для аналізу процесів в реальному режимі часу. RTDS Simulator володіє перевагами устаткування, що використовується для паралельного оброблення інформації і містить спеціальні-модулі-процесори. RTDS Simulator володіє програмою з графічним інтерфейсом, яка передбачає використання окремих модулів для оброблення інформації, включає численні моделі елементів ЕТС та систем керування для відтворення окремих тестових випадків та експлуатаційних режимів. Програма створена на основі мови JAVA і підтримує різні обчислювальні платформи, включаючи персональні комп'ютери.

Середовища ATP [161, 170, 181], Power Systems Analysis Framework (PSAF) і PSCAD/EMTDC також широко застосовуються для аналізу перехідних процесів ЕТС. Середовища володіють бібліотеками моделей, методами та алгоритмами розрахунку, мають певні можливості їх розширення та перспективи використання, які будуть розглянуті нижче.

Програмне забезпечення, призначене для аналізу електротехнічних систем, можна поділити на два основних класи: комерційні комп'ютерні програми та програми, орієнтовані на освітні заходи чи дослідницькі потреби. Ціла низка комерційних комп'ютерних середовищ (PSS/E [237], Power Factory [188], ETAP [194], CAPE [177], CYME [184], NEPLAN [230] тощо) перевірені практикою та є ефективними у їх застосуванні. Проте, не зважаючи на їх повноту, ці програми можуть стати надто громіздкими для дослідницьких чи освітніх потреб. Більш важливою проблемою є те, що ці програми є закритими, тобто не дозволяють проводити зміну їх початкових кодів та додавати нові алгоритми. Під час наукових досліджень гнучкість

програми, можливість доповнення та швидкість створення моделі з її допомогою є не менш важливими аспектами, ніж швидкодія під час виконання розрахунків. З іншого боку, існує низка відкритих програм, які можуть використовуватись саме для аналізу електротехнічних систем. У табл. 3.1 подано перелік вільно поширюваних безкоштовних і комерційних програмних середовищ, застосованих для аналізу динамічних режимів ЕТС.

UWPFLOW – засіб досліджень, який був створений для розрахунку локальних біфуркацій досліджуваної динамічної системи, які виникають через сингулярності якобіана її математичної моделі. Програма дозволяє генерувати низку вихідних файлів, придатних для наступного аналізу, тангенційні вектори, власні вектори матриць, якобіани, власні вектори в точках біфуркацій, виконувати розрахунки перетоків потужностей для різних рівнів навантаження, показники стабільності напруги тощо [167, 197].

Voltage Stability Toolbox (VST) – нестабільність напруги в електротехнічних системах є складною проблемою під час конструювання, експлуатації та керування електроенергетичними системами. Вказане середовище призначене для аналізу самого явища та механізму нестабільності напруги і є потужним засобом вирішення цієї проблеми. Програма Voltage Stability Toolbox (VST) розроблена в Центрі електроенергетики Університету Дрекселя, США (Center for Electric Power Engineering, Drexel University) і поєднує обчислювальні та аналітичні можливості теорії біфуркацій, символічні перетворення та графічні можливості середовища MATLAB і його пакетів інструментів. VST може використовуватися для аналізу стабільності напруги та надати інформацію для планування, ефективної експлуатації та керування ЕТС.

SPS (SimPowerSystems) – програма дозволяє створювати еквівалентну модель у просторі змінних стану електричної схеми, яка попередньо будується за допомогою самого ж SimPowerSystems. Програма розраховує матриці **A**, **B**, **C**, **D** системи рівнянь у просторі змінних стану. Поведінка

нелінійних елементів відтворюється за допомогою джерел струму, значення параметрів яких отримують через напруги самих нелінійних елементів.

Таблиця 3.1. Програми аналізу динамічних режимів ЕТС

Вільно поширювані програми	Ліцензійні програми
UWPFLOW	CYME (CYME INTERNATIONAL INC. USA-Canada)
Voltage Stability Toolbox (VST) - PC/Unix Version	PSS/E (Power Technologies, INC. Canada)
SPS (SimPowerSystems)	EuroStag (Tractebel, EDF Electric France Belgium - France)
PSAT (Power system Analysis Tool)	Simpow (STRI from ABB.)
PSAP (Power System Analysis Program)	PSCAD (Manitoba HVDC Research Centre Inc. Canada)
PST (Power System Toolbox)	DigSilent PowerFactory (DigSILENT GmbH Germany)
PAT (Power Analysis Toolbox)	PowerWorld (PowerWorld Corporation - Canada)
MATPOWER	ASPEN
MATEMTP (Matlab Electromagnetic Transient Program)	EMTP-RV (TransEnergie Technologies Hydro- Quebec group)
EST (Educational Simulation Tool)	MATLAB/ SIMULINK
ATP (Alternative Transient Program)	EMTP96 (DCG/EPRI EMTP User)
PCFLO and PCFLOH	NEPLAN (BCP-Suiza)
Intelligent Systems in Power Systems	CAPE (Electrocon - USA)
Powertech:	SKM POWER TOOLS (SKM Systems Analysis, Inc. USA)
PSAT - PowerFlow & Short circuit Analysis Tool	RTDS Simulator (RTDS Technologies Inc. Canada)
VSAT - Voltage Security Assessment Tool	ETAP (Operation Technologies, Inc. USA)
TSAT - Transient Security Assessment Tool	EDSA (EDSA Micro Corporation USA)
SSAT - Small Signal Analysis Tool	SPARD Power (Energy Computer System, Inc.)
CDT - Control Design ToolBox	CDEGS (SES – USA)
	ERACS - Power Systems Analysis Software (ERA Technology Ltd. UK)
	ELEKS Dakar

Вхідною інформацією, яка міститься у векторі v є значення джерел напруги та струму чи джерел струму, які відтворюють нелінійні елементи. Виходами системи, яка міститься у векторі u є значення напруги та струмів і напруги на нелінійних елементах [167].

Програми **PSAP** (Power System Analysis Program) та **PSAT** (Power system Analysis Tool) призначені для розрахунку перетоків потужностей. Програми **PST** (Power System Toolbox), **PAT** (Power Analysis Toolbox) та **MATPOWER** (аналіз перетоків потужностей) створені саме для аналізу ЕЕС з використанням основних функцій і пакетів інструментів з MATLAB/SIMULINK. **MATEMTP** (Matlab Electromagnetic Transient Program) є спеціальною програмою для перетворення моделей з середовища MATLAB до EMTP.

Програма **EST** (Educational Simulation Tool) призначена для освітніх потреб, використовується для надання студентам основних знань про поведінку ЕТС.

Програма **ATP** є найбільш широко застосованою з метою аналізу електротехнічних і електромеханічних систем довільної складності та систем керування у їх структурі для дослідження перехідних процесів електромагнітної та електромеханічної природи. Програма має розширені можливості моделювання, графічної візуалізації та додаткові функції [161]. Безумовною перевагою цієї програми є її безкоштовність та можливість отримання ліцензії за умови реєстрації науковця як користувача із поданням мінімальної особистої інформації.

Програми **PCFLO** та **PCFLOH** є засобами, призначеними для аналізу перерозподілу навантаження (наприклад, розрахунок втрат потужності на кожній лінії чи трансформаторі), мають можливості аналізу коротких замикань та спектрального аналізу, містить велику кількість числових методів аналізу. PCFLOH є спрощеною версією PCFLO зі спеціальним інтерфейсом для вивчення гармонічного складу.

Пакет програм, який об'єднується в рамках програмного комплексу

Powertech є лідером серед засобів, які дозволяють виконувати оцінку динамічної стійкості ЕЕС. Програма може використовуватись як для початкового моделювання під час конструювання електротехнічних систем, так і для аналізу умов, наближених до реального часу. Іншим програмним комплексом є **СУМЕ** [184], який забезпечує аналіз параметрів режимів і процесів ЕЕС. З метою оптимізації та покращання якості функціонування електропостачальних систем застосовують програму **PSS/E Optimal Flow**, розрахунки за допомогою якої дозволяють мінімізувати витрати палива, втрати активної та реактивної потужності тощо.

Програма **Eurostag** дозволяє користувачу створювати нові моделі за допомогою спеціального пре-процесора з набором графічних інструментів і піктограм [167]. Кожна модель відображається за допомогою графічної схеми, яка називається “макроблоком” з використанням значної кількості елементарних блоків математичних операцій. Користувачу не потрібно використовувати мови FORTRAN, C чи C++ для програмування моделей нових елементів.

Середовище **Simpow** є середовищем з високим ступенем інтеграції для симулювання електротехнічних систем, яке придатне для моделювання мереж різного типу, проте основним його завданням є динамічне моделювання в часовій і частотній областях. Алгоритми моделювання та подальшого аналізу надають можливості ефективного дослідження, планування, оновлення й експлуатації електричних мереж для виробництва електроенергії, її пересилання та постачання. Середовище може використовуватись сталеплавильними, нафтовидобувними, хімічними та іншими підприємствами для вирішення задач їх електропостачання, а також університетами та лабораторіями для навчальних і наукових потреб.

Програма **PSCAD** є швидкою програмою-симулятором для розроблення та верифікації усіх типів ЕТС і широко застосовується для аналізу якості енергії, пристроїв силової електроніки, генерування та пересилання електроенергії [239]. Програма об'єднує типові для ЕМТР

модулі, містить покращені засоби введення вхідних даних і візуалізації результатів досліджень.

DigSilent Power Factory застосовується для аналізу промислових підприємств і енергосистем [188]. Це інтегрований інтерактивний програмний засіб, який використовується для аналізу та керування з метою оптимізації планування й експлуатації. Іншим інтерактивним програмним комплексом є **PowerWorld Simulator**, який має потужне ядро для розрахунку складних систем (до 100000 приєднань) і відрізняється простим і зручним візуальним інтерфейсом і може використовуватися фахівцями інших галузей, які не мають технічної освіти, для планування й аналізу поведінки ЕТС [236].

У промисловості використовується програма **ASPEN**, яка через комп'ютер може взаємодіяти з установками для аналізу можливих коротких замикань у системі чи з метою релейного захисту, відрізняється високою швидкістю та можливістю прийняття практичних інженерних рішень [279].

Програма **EMTP-RV** є кінцевим результатом виконання проекту "EMTP Restructuring Project", який виконувався компанією DCG у 1998 з метою модернізації програми **EMTP96**. EMTP-RV має потужне обчислювальне ядро з новим графічним інтерфейсом, цей пакет є складною комп'ютерною програмою для симулювання перехідних процесів у багатофазних електроенергетичних системах. Цей пакет призначений для моделювання електромагнітних, електромеханічних систем і систем керування, вирізняється широким розмаїттям обчислювальних можливостей, включаючи аналіз електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів, які тривають від мікро- до декількох секунд (перехідні процеси під час удару блискавки, моніторинг ізоляції, крутильні коливання валу, застосування вузлів силової електроніки у електроенергетичних системах).

PALADIN [234] й **ETAP** [194] є промислово-орієнтованими програмами з найширшими можливостями порівняльного аналізу для конструювання, симулювання, перевірки умов функціонування генерувальних і електропостачальних систем. ETAP Real-Time є однією з

можливостей цього пакету, яке повністю інтегрується в промислову систему, може використовуватись в реальному часі та забезпечує її моніторинг, оптимізує процес її функціонування та дозволяє зменшити втрати. Програма PALADIN дозволяє досліджувати ustalені режими та перехідні процеси трифазних і однофазних систем змінного струму, систем постійного струму, систем з AC/DC перетворювачами [194, 234].

Таким чином комп'ютерні програми, описані вище, в основному задовольняють потреби промислових підприємств. Для подальшої наукової роботи та розв'язання поставлених задач актуальним стає вибір високоефективного й доступного засобу математичного моделювання перехідних процесів ЕТС і розроблення математичних моделей елементів ЕТС та їх адаптація до сучасних середовищ симулювання, оскільки моделі елементів ЕТС, які вбудовані в бібліотеки елементів розглянутих середовищ, не забезпечують можливості адекватного врахування усіх схемних, режимних і параметричних особливостей чи вирішення конкретної прикладної задачі.

Успішні спроби розроблення програмного забезпечення для прикладних і наукових досліджень електричних мереж і систем здійснюється і в Україні. Слід згадати цифровий комплекс REgime для моделювання електромеханічних і електромагнітних процесів в електричних мережах будь-якої конфігурації з електромагнітними пристроями, пристроями керування, синхронними і асинхронними двигунами, включаючи їх системи управління, пристроїв захисту і автоматики. Комплекс REgime дозволяє виконувати розрахунок процесів в діапазоні від горіння дуги і відновлення напруги вимикачів до процесів пуску і самозапуску електродвигунів (запропонований науковцями Національного університету "Львівська політехніка"), описаний у [241]. Моделювання в цьому середовищі здійснюється на основі розрахункових схем, сформованих у спеціальному графічному редакторі. Для формування більшості схем електротехнічних пристроїв і систем захисту передбачено базовий набір графічних елементів, а також односторонні і взаємні зв'язки між ними. Крім взаємних індуктивностей використовуються моделі керованих динамічних і

статичних зв'язків, розроблені для моделювання електричних машин. Автори розробили нові ефективні методи формування та розв'язання рівнянь, що забезпечують значну швидкодію і моделювання в режимі реального часу.

Комплекс **ЕЛЕКС ДАКАР** призначений для розрахунку й аналізу усталених нормальних, граничних і післяаварійних режимів електричних мереж напругою 0,4÷1150 кВ, електромеханічних перехідних процесів (аналіз стійкості) електроенергетичних систем з урахуванням дії пристроїв автоматики, реакції теплосилового устаткування електричних станцій. У складі інформаційного забезпечення комплексу є інформаційна база даних (ІБД) і програмні засоби (ПЗ) роботи з нею. Інформаційна база складається з даних про електричну схему мережі та її режими, устаткування енергосистеми та нормативно-довідникову інформацію [37]. Комплекс надає можливість отримувати інформацію про режими функціонування електричної мережі на основі даних пристроїв телеметрії. Для цього здійснюється оброблення і верифікація результатів телевимірів, розв'язується задача оцінювання стану режиму електричної мережі для відтворення її поточного режиму функціонування. Це дозволяє імітувати режими функціонування мережі для прийняття рішень в процесі диспетчерського керування на підставі результатів аналізу усталених режимів, дослідження статичної та динамічної стійкості. Програмний комплекс дозволяє здійснювати розрахунок та аналіз усталених режимів методом компенсувальних ЕРС (покращення зумовленості матриці Якобі, повузлова лінеаризація методом Ньютона). Характерною особливістю цього методу є збалансованість електричного режиму на кожній ітерації. Здійснюється контроль за збіжністю і, у разі порушення, фіксується найближчий до заданого режим. Метод дозволяє проводити розрахунки нормальних, граничних і післяаварійних режимів з врахуванням і без урахування зміни частоти. В **ДАКАР** реалізовані функції базових пристроїв автоматики, а також методика розрахунку довготривалих електромеханічних перехідних процесів. Комплекс дозволяє здійснювати дослідження статичної та динамічної стійкості ЕЕС та проводити комплексне дослідження режимів і

процесів об'єднаних ЕЕС.

3.2. Особливості, моделі й алгоритми комп'ютерних програм для моделювання електротехнічних систем

Застосування розглянутих систем моделювання перехідних процесів (АТР, ЕМТР, NETOMAC, EDSA, PSCAD тощо) в електроенергетичних системах супроводжується значними труднощами під час моделювання електромагнітних апаратів і електричних машин із урахуванням схемних, режимних і параметричних особливостей їх нелінійних характеристик.

Особливістю цих програм є те, що вони орієнтовані на аналіз електротехнічних систем, математичні моделі яких будують з ідеальних чи спрощених дво- чи багатополюсних елементів. Бібліотеки цих програм містять обмежену кількість моделей елементів, а засоби програмування та створення власних моделей елементів (наприклад, в програмі АТР) потребує значних зусиль і часу [167]. Наявні математичні моделі електромагнітних апаратів не завжди придатні для їх безпосереднього використання у сучасних програмних засобах аналізу процесів електротехнічних систем. Під час моделювання елементи електротехнічних систем описують на підставі аналізу фізичних і конструкційних властивостей об'єкту, тобто його внутрішніх параметрів. Перевагами цього підходу є точність і універсальність, однак його застосування до елементів складної структури є утрудненим. Тому кращим підходом є застосування моделей елементів у вигляді “чорної скриньки” (макромоделей), які будують на підставі залежностей тільки зовнішніх змінних стану об'єкту [110, 112]. Математичні макромоделі також складно піддаються безпосередній адаптації до згаданих вище середовищ, тому пошук нових шляхів їх застосування під час комп'ютерного моделювання та створення власного програмного забезпечення з їх використанням є актуальною задачею.

Створення власної програми розрахунку вимагає попереднього аналізу основних алгоритмів, структурних особливостей, бібліотеки математичних

моделей типових елементів електричних кіл, електротехнічних систем та електромеханічних перетворювачів, властивостей графічного інтерфейсу та можливості подальшого оброблення результатів.

В якості прикладу розглянемо властивості двох потужних засобів дослідження електротехнічних систем – програми ATP (світового стандарту комп'ютерного моделювання) та середовища MATLAB/Simulink, а саме пакету інструментів SimPowerSystem Blockset. Порівняльна характеристика цих двох середовищ [24, 25, 161, 210, 216] як альтернативних засобів для аналізу перехідних процесів ЕТС та з погляду можливостей реалізації макромделей із використанням вбудованих засобів програмування наведена у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Порівняльна характеристика середовищ MATLAB/SIMULINK і ATP/EMTP

	MATLAB/Simulink	ATP/EMTP
Загальне призначення	Одна з найпотужніших універсальних математичних систем, унікальна колекція реалізацій сучасних числових методів, містить: мову програмування, орієнтовану на математичні розрахунки; розширений набір матричних і спеціальних математичних функцій.	Спеціалізована програма
Спеціальне призначення а) моделювання електротехнічних і електроенергетичних систем	У комплексі SimPowerSystem Blockset системи MATLAB є спеціальні засоби для електро-, радіотехнічних та електротехнічних розрахунків (операції із комплексними числами, матрицями, векторами і поліномами, оброблення даних, аналіз сигналів та цифрова фільтрація), оброблення зображень, реалізація нейронних мереж, спеціальний пакет для аналізу ЕЕС.	Спеціалізована система моделювання, призначена для аналізу електротехнічних, електроенергетичних і електромеханічних систем.
Структура	MATLAB® - ефективна мова для	Складається з програми-

	<p>технічних розрахунків, яка об'єднує обчислення, візуалізацію та програмування в зручному для використання середовищі, де задачі та розв'язання виражаються в традиційному математичному вигляді.</p> <p>SIMULINK – пакет візуального моделювання динамічних систем є ядром інтерактивного комплексу, призначений для математичного моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем і пристроїв, представлених структурною схемою, яка називається моделлю. Має бібліотеку елементів і зручний графічний редактор структурних схем. Цінність Simulink полягає у відкритій для модифікації бібліотеці елементів. Вона містить:</p> <ul style="list-style-type: none"> • бібліотеку джерела сигналів з практично будь-якими часовими залежностями • лінійні та нелінійні перетворювачі з різноманітними формами передатних функцій; • інтегрувальні та диференціальні оператори; • бібліотеку дискретних елементів • бібліотеку неперервних елементів • бібліотеку нелінійних елементів; • бібліотеку математичних функцій; <p>CONTROL SYSTEM TOOLBOX (інструменти для моделювання систем керування)- є сукупністю алгоритмів для проектування</p>	<p>препроцесора з Windows-орієнтованим інтерфейсом для створення моделі досліджуваної ЕТС сполученням бібліотечних елементів і електромеханічних перетворювачів, процесора для моделювання на мовах Fortran, C++ і графічного пост-процесора для візуалізації результатів. За спеціальними командами можна викликати програму дослідження автоматичних систем керування елементів ЕТС.</p>
--	---	--

	<p>систем керування, дозволяє користувачеві використовувати як класичні, так і сучасні методи з теорії керування. Можна моделювати як неперервні, так і дискретні системи.</p> <p>Control System Toolbox є відкритим для розширення.</p> <p>OPTIMIZATION TOOLBOX (інструменти оптимізації) –</p> <ul style="list-style-type: none"> • Безумовна нелінійна мінімізація, • Умовна нелінійна мінімізація, включає проблеми досягнення мети, задачі міні-максу, • Квадратичне і лінійне програмування, • Системи нелінійних рівнянь, • Умовні лінійні найменші квадрати, • Розріджені та структуровані макрозадачі. <p>SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX (інструменти для ідентифікації систем). Створення спрощених моделей складних систем, набір інструментів для створення математичних моделей динамічних систем на підставі спостережуваних даних типу вхід-вихід</p> <p>SimPowerSystem Blockset (інструменти для аналізу ЕЕС, ЕТС і електромеханічних систем)</p>	
<p>Особливості аналізу ЕТС</p>	<p>Електротехнічну систему можна проаналізувати двома способами:</p> <ul style="list-style-type: none"> - скласти електричну схему з елементів бібліотеки SimPowerSystem Blockset і провести симулювання за допомогою Simulink. Проміжні файли (текстовий опис 	<p>Електротехнічну систему можна аналізувати двома способами:</p> <ul style="list-style-type: none"> - скласти електричну схему з готових елементів АТР/ЕМТР за допомогою програми ATPDraw. Є можливість перегляду проміжних даних

	<p>електричної схеми не проглядається). Результат отримують у графічному чи текстовому вигляді при використанні відповідних масивів запису даних у файл. Можна створити свій оператор і внести його в бібліотеку SimPowerSystem Blockset;</p> <p>- створити власну модель ЕТС за допомогою програмних засобів MATLAB на підставі власної математичної моделі шляхом аналізу диф. р-нь з використанням вбудованих математичних операцій. Є можливість налагодження програми, перегляду результатів і виведення графіків за допомогою спеціальних команд. Засоби програмування та можливості створення власних моделей є ширшими, аніж в АТР/ЕМТР .</p>	<p>(текстового файлу опису електричної схеми та його редагування у будь-якому текстовому редакторі). Текстовий файл обробляється програмою Watcom АТР, після якої створюється новий файл з результатами моделювання, який аналізується за допомогою графічного пост-процесора PlotXY;</p> <p>- створити власну модель системи чи елемента за допомогою програмних засобів MODELS і внести їх у бібліотеку елементів</p> <p>Процедура аналізу та перегляду результатів така ж сама, як і у першому способі.</p>
<p>Бібліотеки елементів ЕЕС, ЕТС і електромеханічних систем</p>	<p>Бібліотека інструментів SimPowerSystem Blockset містить групи елементів відповідно до їх функціонального призначення:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Electrical Sources Library Block – бібліотека електричних джерел 2) Elements Library Blocks – бібліотека елементів навантаження. 3) Power Electronics Library Blocks – бібліотека елементів силової електроніки 4) Machines Library Blocks – бібліотека моделей електричних машин 5) Connectors Library Blocks – бібліотека елементів сполучення 6) Measurement Library Blocks – бібліотека засобів вимірювання 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Довільне сполучення R, L, C елементів, як окремо, так і в сполученні RLC (однофазне, 3–фазне – симетричне та несиметричне), індуктивності та ємності з початковими умовами, джерела різного типу; 2) Повітряні лінії електропередавання (транспоновані та нетранспоновані), кабелі з розподіленими й частото–залежними параметрами тощо; 3) Нелінійні та змінні в часі резистивні опори й індуктивності, керовані опори; 4) Елементи з нелінійністю: трансформатори

		(однофазний ідеальний, однофазний з урахуванням насичення, 3-фазні – різних схем сполучень з урахуванням насичення, обмежувачі перенапруг, електрична дуга); 5) Вимикачі; 6) Напівпровідникові вентиля (діоди, тиристори, симістори), керовані вимикачі; 7) Синхронні й асинхронні електричні машини;
Можливість розширення, доступність і відкритість	Відкрита, може бути розширеною. Більшість команд і функцій системи реалізовані у вигляді текстових m-файлів і файлів на мові C, причому усі файли доступні для модифікації. Користувач має можливість створювати не тільки окремі файли, але й бібліотеки файлів для реалізації специфічних задач.	Може бути доповнена створеними користувачем математичними моделями елементів за допомогою мови програмування MODELS.
Можливості систем	У систему MATLAB вбудовано ядро однієї з популярних систем символічної математики (комп'ютерної алгебри). Воно використовується пакетами розширення MATLAB Symbolic Math Toolbox і Extended Symbolic Math Toolbox, завдяки яким є використання символічних і аналітичних обчислень. В області реалізації числових методів доступні практично всі відомі числові методи розв'язування диференціальних і алгебричних рівнянь. В області програмування є більше 500 вбудованих функцій; застосування програм на мовах Fortran, C; автоматичне перекодування процедур MATLAB на мовах C і	Інтегрування методом трапецій, застосування підпрограм, написаних на мовах програмування Fortran та C++.

	С++; можливість об'єктно-орієнтованого програмування, широкі графічні можливості в двовимірній і тривимірній області.	
Інтеграція з іншими програмами	Інтегрується з такими широко використовуваними системами комп'ютерної математики, як Mathcad, Maple і Mathematica. Є тенденція до об'єднання математичних систем з сучасними текстовими процесорами (наприклад, MS Word, Excel), є можливість готувати документи в текстовому процесорі Word зі вставками у вигляді документів MATLAB і результатами обчислень, представленими у чисельному, табличному і графічному вигляді. Інтеграція з іншими системами є значною перевагою пакету порівняно з іншими математичними та технічними пакетами і популяризується його виробниками.	Протягом останніх років розроблені спроби інтеграції між пакетами MATLAB і EMTP, створено програму MatEMTP. У текстові редактори можна вставити результат аналізу системи у вигляді рисунку в одному з графічних форматів.
Вхідна мова	Система MATLAB має власну вхідну мову. Програма створюється у текстовому вигляді. Текст програми можна редагувати за допомогою будь-якого текстового редактора, але в програмі є власний редактор з можливістю налагодження.	Fortran
Документація з описом програми, наявна література	До програм MATLAB/Simulink додається багата на опис і демонстраційні приклади (для кожної команди, елементу, та інженерних систем) документація англійською мовою. У роботі допомагають перехресні зв'язки між командами, елементами та блоками з можливістю пошуку за списком.	До програми додається детальна документація англійською мовою. Мало демонстраційних прикладів, але також є допоміжна документація до програми та можливість пошуку за алфавітним списком. Вільних публікацій-підручників немає.

	Документація може замінити підручник чи довідник, як з математики так і засобів програмування на MATLAB. Є значна кількість посібників російською й українською мовами.	Схеми досліджуваних різними авторами систем без пояснення алгоритму реалізації можуть бути знайдені у відповідних публікаціях IEEE Transactions
--	---	---

Усі описані вище середовища мають свою сферу застосування, володіють спеціальними бібліотеками елементів і мають можливість розширення. На сучасному етапі для дослідження ЕТС і ЕЕС у реальному часі ставиться задача їх швидкого розрахунку, яка може бути вирішена кількома шляхами.

Першим способом є удосконалення алгоритмів розрахунку таких систем і розширення бібліотек елементів ЕТС і електромеханічних перетворювачів, а другим – реалізація програм і алгоритмів на паралельних обчислювальних структурах. Описані вище програми є орієнтовані на застосування однопроцесорних обчислювальних машин, а їхнє пришвидшення досягається за рахунок збільшення швидкодії процесора й удосконалення алгоритмів моделювання та моделей елементів.

Розглянемо більш детально основні характеристики програми АТР та мови програмування MODELS, які застосовані у даній роботі.

АТР (Альтернативна програма дослідження перехідних процесів) є універсальною програмою для цифрового симулювання перехідних процесів як електромагнітної, так і електромеханічної природи, яка набула свого розвитку як альтернативна версія програми ЕМТР (Electromagnetic Transient Program). Програма АТР дозволяє моделювати складні мережі та системи керування довільної структури, має розширені засоби та додаткові можливості і призначена для дослідження проблеми аналізу перехідних процесів та усталених режимів багатофазних енергосистем. АТР/ЕМТР об'єднує велику кількість моделей електричних апаратів, включаючи лінійні елементи, лінії електропередавання, трансформатори, синхронні генератори, двигуни, синусоїдальні джерела ЕРС і струмів, інші типи джерел, вимикачі, діоди,

тиристри, обмежувачі перенапруги, нелінійні елементи та П-подібні схеми. Програма дозволяє моделювати системи керування (збудники генераторів, системи керування тиристорами тощо), описувати велику кількість лінійних і нелінійних елементів систем, які потрібні для моделювання різного класу ЕТС. Програма придатна для моделювання систем із змінним навантаженням і розрахунку перехідних процесів. На початку свого розвитку програма ЕМТР була обмежена у своїх можливостях, проте її постійний розвиток і розроблення комп'ютерних засобів призвели до створення високо потужного та легко змінюваного засобу моделювання. Водночас це є і недоліком програми – вона складається із окремих підмодулів, створених в різний час, взаємодія між якими є утрудненою. Реальне АТР/ЕМТР симулювання залежить від точності як наявних у бібліотеці програми, так і власноручно створених моделей, а також від досвіду інтерпретації отриманих результатів.

Моделі часто включають частотно-залежні втрати та інші параметри, які не можуть бути розробленими безпосередньо з паспортних даних. Дослідження за допомогою програми забезпечує розуміння процесів з фізичного погляду і якісне відтворення кривих процесів за допомогою вбудованого в програму графічного редактора ATPDraw та подальшого аналізу отриманого електричного кола за допомогою програми-процесора Watcom ATP.

АТР має широкі можливості моделювання та додаткові можливості аналізу ЕТС крім дослідження перехідних процесів. Засіб моделювання електричних систем і мереж АТР (добре розроблена й буде розвиватись надалі для моделювання одно- і багатофазних ЕТС, дозволяє здійснювати розрахунок напруги і струмів трифазних систем. Вона також може бути використана для моделювання високочастотних перехідних процесів, а також для досліджень х коротких замикань. АТР підтримує широке розмаїття елементів електричних мереж, лінійних і нелінійних опорів і математичних методів для проектування моделей електричних мереж.

Призначення функціонування програми:

– в основному для інтегрування диференціальних рівнянь в часовій

області використовується формула трапецій;

- можливість спряження з інтерфейсом програмних модулів TACS (Аналіз перехідних процесів систем керування) і MODELS (мова симулювання) дозволяє моделювання систем керування й елементів з нелінійними характеристиками (дуга та коронний розряд);

- можливість досліджень симетричних і несиметричних збурень (короткі замикання, будь-які перемикавання, включаючи комутацію вентилів);

- для розрахунку частотної характеристики електричних мереж з використанням символічного методу (підпрограма FREQUENCY SCAN);

- для здійснення гармонічного аналізу (підпрограма HARMONIC FREQUENCY SCAN);

- для моделювання динамічних систем і систем керування з використанням TACS за допомогою MODELS.

Програма містить моделі таких елементів:

- довільного сполучення зосереджених R, L, C елементів (кожен як окремо, так і в комплексі *RLC* (однофазне, трифазне – симетричне та несиметричне, індуктивності та ємності з початковими умовами);

- лінії електропередавання (транспоновані та нетранспоновані), кабелі з розподіленими і частотно-залежними параметрами, повітряні лінії тощо;

- нелінійні опори й індуктивності, змінні в часі опори, TACS/MODELS керовані опори;

- елементи з нелінійністю: трансформатори (однофазний ідеальний, однофазний з насиченням, трифазні з насиченням різних типів сполучень), обмежувачі перенапруги, електрична дуга;

- звичайні вимикачі, залежні від часу та напруги вимикачі, статистичне перемикавання (метод Монте-Карло);

- вентиля (діоди, тиристори, двоспрямовані тиристори), TACS/MODELS керовані вимикачі;

- джерела різного типу.

– електричні машини: синхронна трифазна машина, універсальна модель машини, генератори, асинхронна машина;

– створені користувачем моделі елементів за допомогою MODELS.

Також можна використовувати моделі таких елементів:

– різні типи керованих резисторів;

– статичні та динамічні опори дуги (Static and Dynamic Arc Resistances);

– компоненти для описання насичення та гістерезису трансформаторів (*Saturation with Hysteresis*);

– метал-оксидні варистори (*MOV (Metal Oxide Varistor)*).

Максимальна кількість елементів, які можуть бути змодельованими за допомогою ATP/EMTP є такою:

– вузли – 6000;

– вітки – 10000;

– вимикачі – 1200;

– джерела – 900;

– нелінійні елементи – 2250;

– синхронні машини – 90.

Програма містить інтегровані модулі-підпрограми, які були написані різними користувачами з метою вирішення тієї чи іншої задачі, в більшій мірі це стосувалось визачення параметрів окремих елементів (трансформаторів, повітряних та кабельних ліній) з метою покращення точності розрахунків та підвищення адекватності моделей як окремих елементів, так і систем в цілому. Зв'язок між окремими модулями програми [161] показано на рис. 3.1.

TACS (*Transient Alternative Control System* – Альтернативна система керування перехідними процесами) – модуль для дослідження систем керування в часовій області. Система керування представляється у вигляді блок-схем. TACS може використовуватись для моделювання:

– HVDC засобів керування;

– систем збудження синхронних машин;

- силової електроніки та приводів;
- електричних дуг (вимикачі та дуги короткого замикання).

Інтерфейс між електричною мережею та TACS встановлюється за допомогою методу вузлових напруг, струмів увімкнення, стану вимикача, змінного в часі опоры, різниці потенціалів і джерел струму.

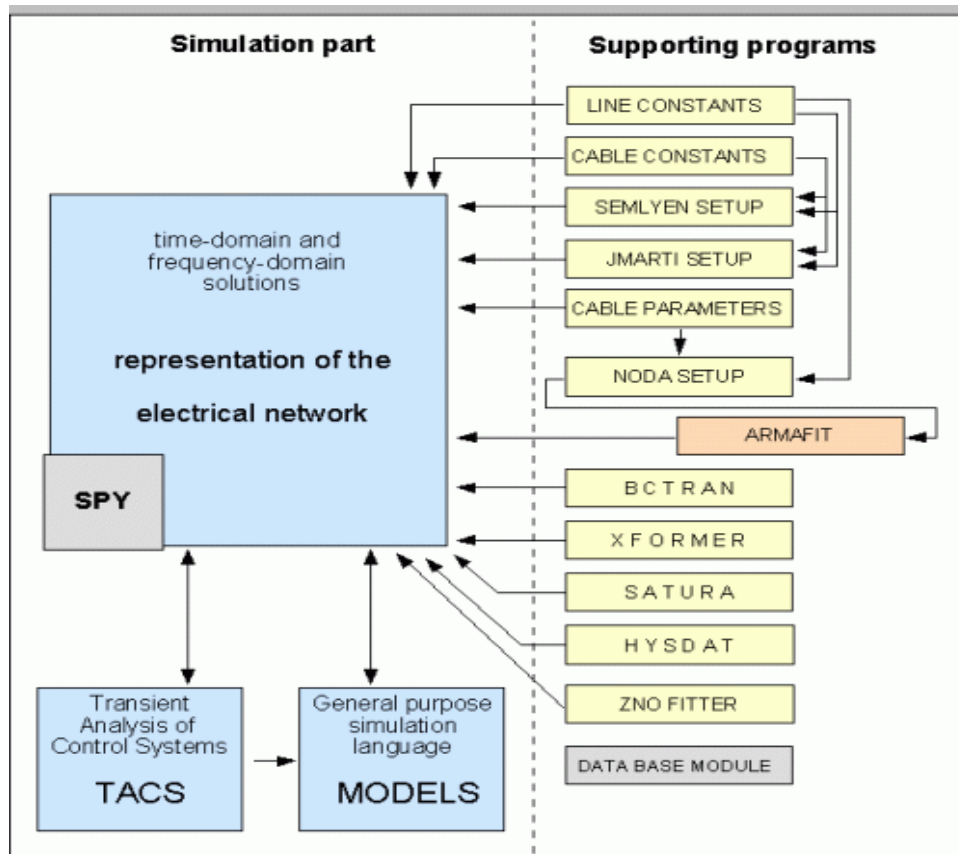


Рис. 3.1. Інтегровані модулі програми ATP/EMTP

MODELS в ATP – універсальна мова, з широкими можливостями інструментальних засобів моделювання для представлення та вивчення різних часових систем. MODELS дозволяє здійснювати опис технічних елементів загального призначення, яка підтримується множиною засобів симулювання для представлення та вивчення систем, змінних в часі та орієнтована на моделювання складних задач в часовій області і використання в якості інструменту для описання динамічних режимів складних фізичних систем [192].

Опис кожної моделі здійснюється у вільному форматі, за допомогою локальних ключових слів. MODELS в ATP дозволяють описувати довільно

сконструйовані користувачем елементи керування та кіл, забезпечуючи простий інтерфейс для приєднання інших програм/моделей до АТР.

У програмі моделювання та симулювання АТР мова MODELS може використовуватись для описання функціонування елементів електричних кіл та елементів довільних систем керування, генерування сигналів чи аналізу експериментальних вимірювань, отриманих при дослідженні кіл. Крім цього вона придатна для використання в якості інтерфейсу між АТР та іншими програмами. Як програмний інструмент загального призначення, MODELS може використовуватись для оброблення результатів симулювання як у часовій, так і частотній областях.

Метою застосування мови MODELS у програмі АТР є вирішення чотирьох важливих задач:

- 1) отримання інструменту для розроблення моделей кіл та елементів керування, які не можуть бути легко сформованими за допомогою бібліотеки моделей електроенергетичних та електромеханічних елементів, доступних в АТР;
- 2) володіння гнучкою повноцінною мовою програмування без потреби взаємодії з АТР на програмному рівні;
- 3) спроможність опису не тільки процесу функціонування елементів, а й встановлення їх початкового стану (початкових умов та передісторії) при будь-якому необхідному рівні деталізації;
- 4) мати стандартний програмний інтерфейс з програмою АТР, визначений на модельному рівні у параметрах напруг, струмів і сигналів керування на противагу інтерфейсу, який визначається на програмному рівні у вигляді змінних, загальних блоків та підпрограм АТР. Це робить можливим приєднання зовнішніх програм до АТР для моделювання елементів, доступу до вимірювань, чи взаємодії з апаратурою без знання програмування внутрішніх операцій програми АТР і потреби модифікації її внутрішніх кодів. На перший погляд використання мови MODELS є складною задачею. Проте вона може бути розділена на декілька простіших частин.

Структура мови MODELS є простою, схожою на структуру інших мов

програмування, наприклад, Pascal. Мова характеризується невеликою кількістю команд, які легко запам'ятовуються. Немає ніяких правил форматування, які б ускладнювали її використання, і кожна конструкція вводиться за допомогою команди опису. Основний модуль називається моделлю. Модель складається з: процедур, які описують, як вона працює, елементів, які несуть інформацію про стан та історію функціонування, та обмінюються даними з іншими процедурами і директив, які впливають на роботу моделі при симулюванні. Елементи, які несуть інформацію про стан, можуть бути як постійними, так і змінними, можуть бути введені як зсередини моделі (типи CONST і VAR), так і ззовні моделі (типи DATA і INPUT).

Для кожної моделі можуть бути визначені дві стандартні процедури. Процедура ініціалізації (INIT) описує початкові умови функціонування моделі перед початком симулювання. Процедура виконання (EXEC) описує, оновлюються та модифікується робота моделі в кожен наступний момент моделювання. Можуть бути введені додаткові процедури для описання дії моделі та доступу до значень власних змінних моделі.

Директиви моделювання включають: керування величиною часового кроку, який використовується при моделюванні, вибору методу інтерполяції для визначення вхідних величин на внутрішніх підкроках, присвоєння хронологічних виразів, які описують значення деяких зі змінних моделі до початку моделювання, розподіл спеціальної пам'яті, призначеної для попередніх значень змінних, згаданих в моделі за допомогою використання функції затримки *delay()*.

Модель вивчається незалежно від директив і місцезнаходження її використання. Можуть використовуватись численні приклади тієї ж самої моделі з підтримкою її індивідуальної робочої точки й історії.

Користувачі, які застосовують мови програмування для розроблення моделей елементів електротехнічних систем з можливістю створення побудови бібліотеки елементів, мають потребу у гнучкому та достатньо потужному засобі описання. Ті, хто час від часу застосовують мови для представлення

компонентів чи обчислювального процесу, наприклад, хотіли б, щоб такі засоби були б простими настільки, що при роботі з ними виникає відчуття знайомості. Використання методів мови програмування задовольняє обидві вимоги. У цьому відношенні мова MODELS характеризується такими можливостями:

- звичайний синтаксис для використання змінних, матриць, виразів, і функцій;
- використання різних типів змінних, параметрів утримання, модифікованих відповідно до процедури моделі (змінні можуть бути числовими і логічними, у формі скаляра або масиву);
- множина попередньо визначених числових та логічних функцій; додаткові функції можуть бути описаними користувачем у формі параметричних виразів, переліку точок та зовнішньо програмованих функцій;
- використання умов та циклів (наприклад if, while, for тощо) для структуризації виконання послідовності процедур;
- використання коментарів у тексті опису, як допоміжний засіб при створенні моделей та самодокументованих процедур;
- використання як завгодно довгих назв для полегшення самодокументування;
- індивідуальна область для позначення кожної моделі з наданням кожному користувачеві можливості пов'язати значимі назви зі змінними, які використовуються в описі без ризику виникнення конфлікту з назвами, використаними у інших частинах симулювання;
- відокремлення описання моделі від її використання у симулюванні;
- використання множини значень одного й того ж елемента, з різними параметрами, різними вхідними даними, та різними директивами симулювання;
- механізмом для поділу описання великого елемента на менші частини з метою зменшення складності моделі, явної ідентифікації інтерфейсу та режимів, простішого тестування й використання масштабування для розроблення моделей;
- можливість визначення режиму, який можливий тільки при виконанні певних умов, наприклад, для ініціалізації, чи виявленні труднощів симулювання та помилок.

MODELS відрізняється від інших звичайних мов програмування двома особливостями. Перша – це множина операцій та функцій, які потрібні для представлення систем, змінних в часі:

- час автоматично зростає під час симулювання;
- окремі типи моделей систем автоматично коректують свою роботу відповідно до зростання часу симулювання;
- значення змінних є стійкими протягом усього часу моделювання і утримують своє значення до моменту його зміни;
- вирази можуть бути описаними як універсальні функції часу t , дозволяючи чітке символічне представлення; наприклад, значення коливного сигналу може легко бути описаним за допомогою виразу $A*\sin(\omega*t)$, де A і ω визначені в іншому місці моделі; цей вираз автоматично приймає відповідне значення при різному часі симулювання;
- доступний ряд визначених функцій, включаючи часові інтеграли, часові похідні, диференційні рівняння, які описують залежності в часі, функції Лапласа, z – перетворення, звертання до минулих чи передбачених значень змінної.

Іншим аспектом є те, що MODELS автоматично керує зберіганням та відновленням попередніх значень змінних моделі, якщо це потрібно під час виконання симулювання. Залежні від часу функції мови також мають прямий доступ до попередніх значень змінних, якщо це потрібно для обчислень.

Нижче перераховані деякі аспекти, які пояснюють, коли використання MODELS може бути корисним і потрібним при створенні моделі:

- коли потрібно зробити послідовне нарощення різних частин модельованої системи, маючи за основу вже готові окремі елементи-шаблони;
- коли потрібно включити в модель численні чи детальні аспекти функціонування деяких з елементів системи, наприклад представити термодинамічну характеристику елемента в поєднанні з електричною;
- коли необхідно включити опис елементів системи, які вже розроблені і доступні як окремі підпрограми, написані у інших програмах (наприклад, при

розробці нової моделі може бути використана модель, надана фірмою-виробником окремого елемента);

- коли потрібно розробити модель, яку важко представити засобами та моделями, наявними в ATP, а MODELS є алгоритмічною мовою описання, яка надає можливість програмування моделей відсутніх в ній елементів;
- коли необхідне виконання симулювання елемента одночасно з рештою електричного кола, уникаючи затримок симулювання.

Окрім зазначених вище, програма ATP дозволяє використовувати такі підпрограми-модулі:

– обчислення електричних параметрів повітряних ліній та кабелів за допомогою програмних модулів *LINE CONSTANTS*, *CABLE CONSTANTS* і *CABLE PARAMETERS*;

– генерування вхідних даних моделей частотно-залежних ліній (моделі ліній *Semlyen*, *Marti*, *Noda*);

– обчислення даних для моделей трансформаторів (*XFORMER*, *BCTRAN*).

Програми *EMTP* і *ATP* внутрішньо побудовані за допомогою мови *FORTRAN*, і містять типові фортран-структури, фортран-цикли та велику кількість спеціальних функцій. Вхідні та вихідні дані формуються у вигляді текстових файлів, які обробляються спеціальними програмами-конверторами. Програма є симулятором перехідних процесів силових систем на основі аналізу вузлових рівнянь. На основі інтегрування методом трапецій елементи системи лінеаризуються на кроці інтегрування для формування рівнянь еквівалентної системи у методі вузлових напруг.

Структура звичайного симулювання за допомогою програми ATP/EMTP виглядає таким чином. Модельована система розбивається на електричну підсистему, перемикальні кола та систему керування. Електричні підсистеми та перемикальні кола, представлені в ATP/EMTP за допомогою таких перемикальних пристроїв як діоди, тиристори та керовані в часі перемикачі, змодельовані як ідеальні пристрої, що використовуються для симулювання

системи керування окремо. Основні проблеми при моделюванні, які виникають при використанні програми ATP/EMTP:

- чисельна стійкість;
- точність.

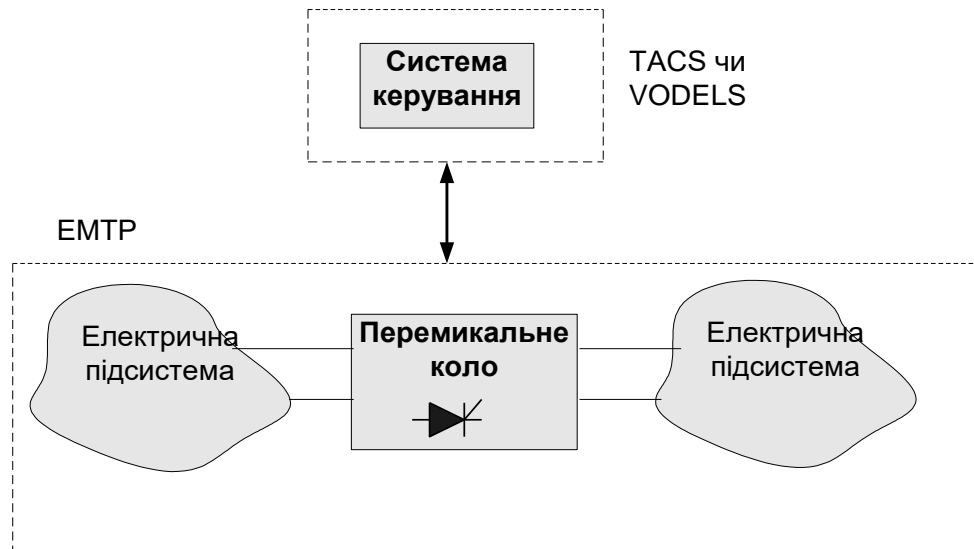


Рис. 3.2. Поділ модельованої системи на частини у середовищі ATP

Недоліки використання програми ATP полягають в тому, що інтегрування методом трапецій з фіксованим часовим кроком має труднощі при наявності розривів. Чисельні коливання виникають при розривах на перемикальних операціях та увімкненні джерел. Крім того, окреме симулювання *EMTP* і *TACS* чи *MODELS* вводить затримку на один крок між ними. Саме при цій затримці на один крок може виникнути чисельна неточність чи нестійкість. Було реалізовано багато стійких алгоритмів і методів розв'язку без затримок для успішної реалізації з усуненням похибок на програмному рівні.

Програма *ATP/EMTP* містить таку підпрограму як *SPY*, яка надає можливість вести інтерактивну роботу та спостереження і керування, підтримує перетворення параметрів систем у вхідний формат *ATP/EMTP*.

Недоліки програми:

- фіксований часовий крок *ATP/EMTP* спричиняє похибки під час дослідження комутаційних процесів та може спричинити нестійкість обчислювального процесу;

– між розв'язанням диференційних рівнянь системи керування (в програмі *TACS*) та рівняннями системи виникають небажані часові затримки;

– оскільки первинно система була сконструйована для представлення систем з аналоговим керуванням, то виникають певні обмеження під час моделювання сучасних цифрових систем керування; частково така новіша версія програми *EMTP* як *ATP* та її підпрограма *MODELS* вирішує проблеми моделювання цифрових систем керування та навіть зменшує деякі з часових затримок між керуванням і розв'язанням рівнянь системи; більшість користувачів використовує *TACS* для того, щоб забезпечити сумісність своїх даних з іншими *EMTP* версіями і підпрограмами.

3. 3. Засоби моделювання електротехнічних систем і їхня реалізація на одно- та багатопроцесорних комп'ютерах

На даний час для моделювання ЕТС у реальному часі застосовується Real Time Digital Simulator, чи RTDS, який має сучасні технології для надійного, швидкого й ефективного моделювання електроенергетичних елементів і мереж. Комплекс RTDS Simulator є повністю цифровим симулятором електромагнітних перехідних процесів, який може виконувати цифрове моделювання електротехнічних систем на основі алгоритмів, закладених у середовища типу EMTP (*ATP*, *PSCAD*), які не використовуються для аналізу процесів у реальному часі. RTDS Simulator володіє перевагами, які використовуються для паралельного оброблення інформації й містить спеціальні-модулі-процесори. RTDS Simulator має програму з графічним інтерфейсом, яка передбачає використання окремих модулів для оброблення інформації і включає численні моделі елементів ЕТС і систем керування для відтворення окремих тестових випадків й експлуатаційних режимів. RTDS використовує спеціалізовані обчислювальні машини для виконання паралельного оброблення інформації - цифрові сигнальні процесори DSP. Ця система дозволяє проводити тестування у замкненому циклі, під час якого застосовується апаратна частина, що в свою

чергу взаємодіє з комп'ютерною моделлю, як це показано на рис. 3.3. Зростання обчислювальної потужності комп'ютерів сприяє розвитку систем, які працюватимуть у реальному часі та будуть використовувати саме паралельні комп'ютери.

Перший комерційний RTDS пристрій моделювання був створений у 1991 році компанією RTDS Technologies. Конструкційно RTDS під'єднувався до контролера HVDC (пристрої високої напруги постійного струму) та підсилювачів для створення зв'язку між цифровою та аналоговою частинами [144].

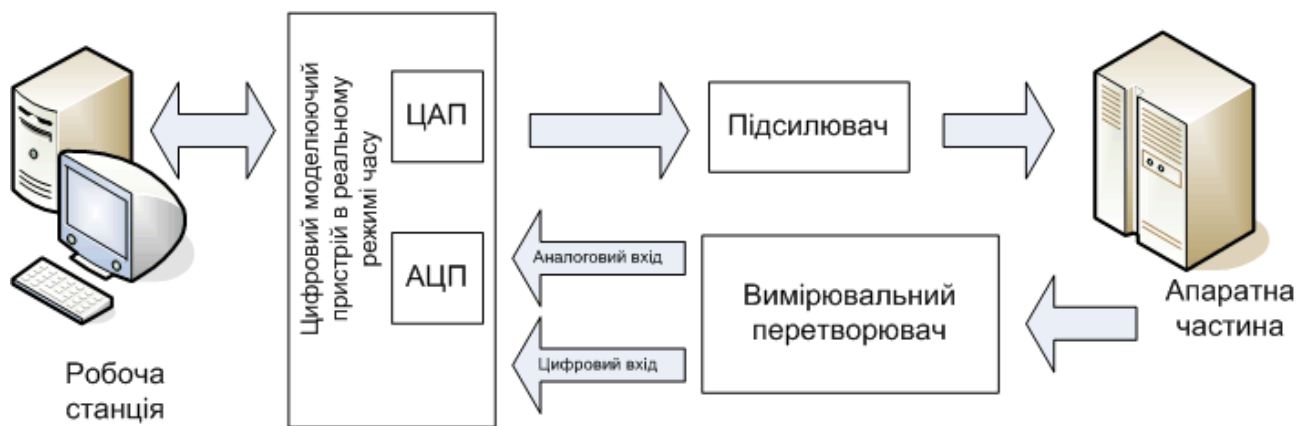


Рис. 3.3. Схема цифрового пристрою моделювання RTDS.

Останні досягнення зробили можливим здійснення моделювання ЕТС у реальному часі з використанням тільки цифрових технологій. RTDS пристрій може працювати з чи без спеціалізованого інтерфейсу користувача, що дозволяє виконувати спостереження за устаткуванням і виконувати тисячі тестувань без втручання оператора. У такому разі симулятор надає звіти про реакцію устаткування під час кожного тестового випробування.

Моделювання за допомогою RTDS передбачає використання двох програмних засобів, а саме бібліотеки моделей і компіляторів PSCAD, а також спеціального графічного інтерфейсу користувача. Моделі програми PSCAD дозволяють користувачу створити графічне зображення досліджуваної ЕТС традиційно у вигляді сполучених піктограм (елементи, шини, системи керування) відповідно до функціональної схеми. Програма PSCAD орієнтована на використання в комплексі з RTDS і є окремим

програмним продуктом. Коли модель досліджуваної система вже створена та введені відповідні параметри, компілятор генерує коди нижчого рівня для здійснення моделювання програмними засобами RTDS, визначаються функції кожної процесорної карти для кожного симулювання та кожного процесора DSP відповідно до сконструйованої схеми та наявної апаратної частини RTDS. Найчастіше RTDS пристрої використовують для моделювання захисних реле та тестування систем керування.

Альтернативою є цифрові мережеві аналізатори перехідних процесів DTNA, які можуть виконувати тестування в реальному часі на стандартному багатопроцесорному комп'ютері. Їхня робота в реальному часі вимагає створення інтерфейсу між апаратною частиною фізичного устаткування та програмним забезпеченням.

Взаємодія між фізичним устаткуванням під час тестування та модельованою ЕТС виконується на кожному часовому кроці. Для зменшення часу моделювання застосовують спеціальні програми, орієнтовані на багатопроцесорні комп'ютери. Загальна структура цифрового мережевого аналізатора перехідних процесів DTNA зображена на рис. 3. 4.

Аналізатор такого типу будується з використанням стандартного паралельного комп'ютера HP-CONVEX, внутрішня архітектура якого дозволяє повний обмін інформацією між різними процесорами. Це збільшує потужність обчислень відповідно до кількості процесорів, на відміну від інших комп'ютерів, які можуть досягнути фізичних обмежень через перекриття шин.

В якості програмного забезпечення використовується ЕМТР-орієнтована програма ARENE (Real-Time Digital Electromagnetic Transient Power Simulator), створена корпорацією Electricite de France (EDF), яка є потужним і зручним засобом для аналізу електричних систем і точного тестування устаткування в темпі процесу [167, 196].

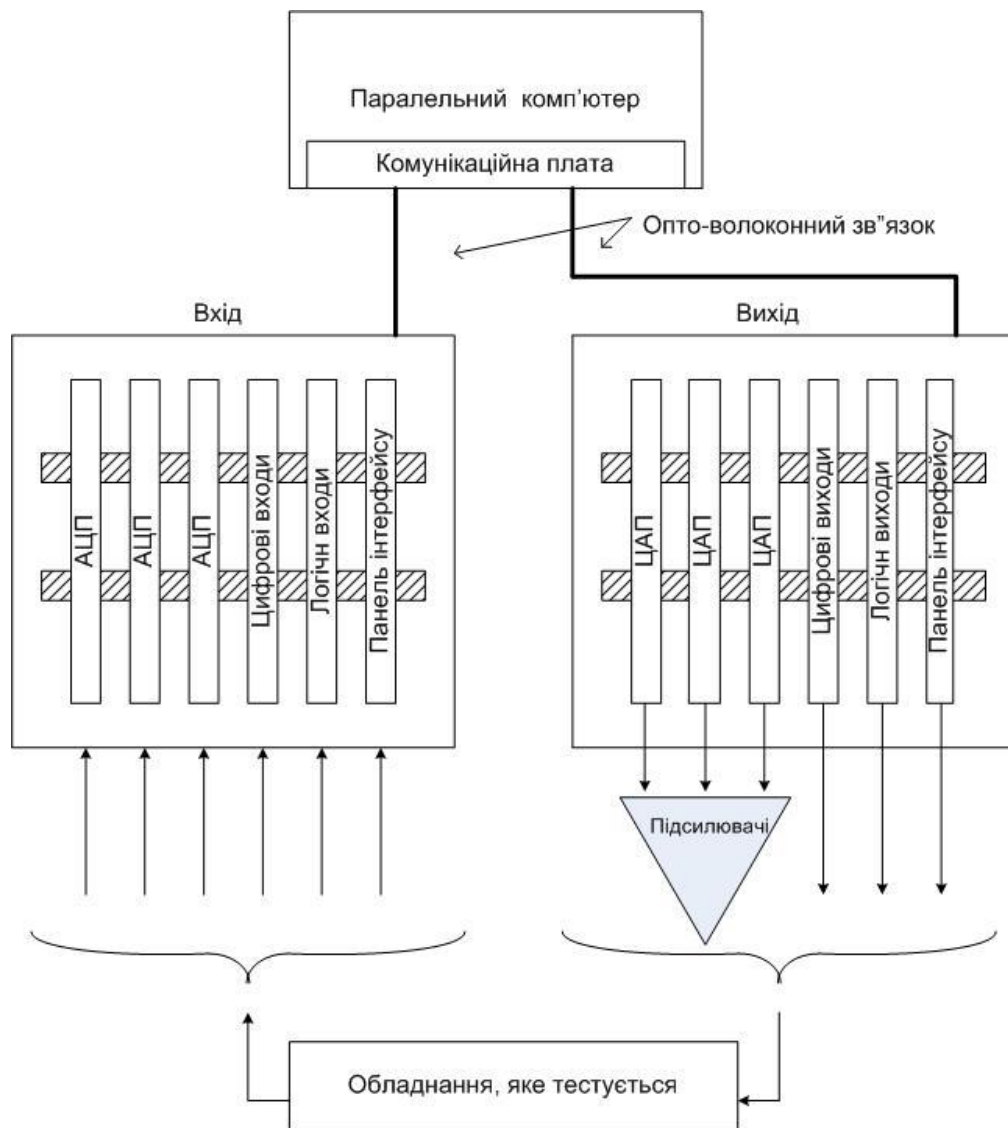


Рис.3. 4. Структура цифрового мережевого аналізатора для дослідження перехідних процесів.

Таким чином, прогрес, який характерний для цифрового паралельного оброблення інформації, може бути реальним підґрунтям для розрахунку та моделювання ЕТС у реальному часі, що дозволить виконувати тестування систем керування та захисту. Наявні RTDS пристрої потенційно можуть дозволити моделювання ЕТС довільної структури та складності.

Створення програмного забезпечення на основі паралельних комп'ютерів для моделювання в реальному часі на основі паралельних алгоритмів й удосконалених моделей і макромоделей елементів ЕТС замість

розглянутих засобів в перспективі може бути ефективним і економічно доцільним способом вирішення поставлених задач.

3.4. Моделі і макромоделі елементів електротехнічних систем

Під час розрахунку перехідних процесів, визначення струмів короткого замикання чи вирішення низки інших задач, велика увага надається заміні складної ЕТС еквівалентними математичними моделями, коли первинна математична модель, що описує поведінку досліджуваної системи перетворюється на простішу, але зі збереженими основними властивостями. Тут можуть використовуватись класичні математичні моделі у вигляді диференційних рівнянь у повних та частинних похідних, алгебричних рівнянь, чи альтернативні їм схемні та математичні макромоделі [54, 112].

Типовими елементами ЕТС, які потребують створення математичних моделей і макромоделей є: джерела живлення, силові трансформатори й автотрансформатори, лінії електропередачі, елементи навантаження, вимикачі, елементи захисту. Під час створення моделі складної ЕТС іноді виникає потреба в створенні моделі окремої частини такої системи чи комплексу її елементів-складових. Математичне моделювання перехідних процесів ЕТС доволі часто вимагає детального моделювання тільки окремої частини самої системи. Еквівалентні моделі можна використати для описання тих частин системи, для яких детальне моделювання не потрібне. Мета такого дослідження – зменшити складність системи та її вимірність, а також час моделювання зі збереженням адекватності моделювання. Існує декілька методів для отримання еквівалентних моделей окремих складових складної електроенергетичної системи [215, 226, 227]. У загальному випадку такі моделі можна вважати багатополосними частотно-залежними еквівалентними моделями ЕТС чи їх частин [226].

Генератори. Найскладнішим елементом ЕТС, який визначає її поведінку в перехідних процесах, є синхронний генератор. Основою відомих у технічній літературі методів розрахунку електромагнітних процесів у синхронних

турбогенераторах (СТГ) здебільшого є заступні схеми, які використовують у класичних методиках проектування електричних машин [40, 43]. У динамічних і аномальних режимах СТГ високої адекватності результатів математичних експериментів можна досягти лише на підставі використання польових моделей. Вони можуть застосовуватись і для визначення параметрів, які використовують під час складання заступних схем. Проміжний стан щодо складності та точності займає математична модель СТГ, яка дає змогу розрахувати магнітне поле машини на підставі використання розгалуженої заступної схеми магнітопроводу статора, а масивний ротор еквівалентується двома взаємно ортогональними контурами, параметри яких знаходять шляхом розв'язування польової задачі.

Електромагнітні процеси в явнопольсних синхронних машинах здебільшого розглядаються в ортогональних d, q координатних осях [139, 144], що дає змогу розглядати їхні симетричні динамічні режими з достатньою для практики точністю. Однак, для розрахунку несиметричних і аварійних режимів, а також за наявності в контурах напівпровідникових вентилів необхідно застосовувати фізичні координати, що суттєво збільшує обсяг обчислень.

Існує значна кількість робіт з побудови оптимальної за складністю математичної моделі генератора, яка б адекватно відтворювала фізичні явища в роторі генератора за умови незначних витрат машинного часу. В [115, 266] розглянуто побудову моделей неявнопольсних синхронних генераторів з їх подальшим використанням для моделювання систем електропересилання.

За результатами досліджень та порівнянь з натурним експериментом встановлено, що найпростіша математична модель генератора для аналізу електромеханічних перехідних процесів повинна містити не менше ніж два демпферних контури по поперечній осі та одного по повздовжній осі. В [47] описано математичні моделі у вигляді багатоконтурних заступних схем. Найбільшою проблемою під час побудови таких моделей є визначення параметрів, для визначення яких необхідно проводити спеціальні експерименти. У багатьох працях синхронні машини подано у вигляді

заступних схем, параметри яких визначаються переважно на підставі експериментальних даних.

Спроби врахування насичення магнітопроводу на підставі теорії електромагнітних кіл, метод електромагнітного розрахунку усталених режимів і перехідних процесів, придатний для аналізу синхронних машин, наведено в працях [143, 144]. Проблеми моделювання асинхронних машин висвітлено в [49, 55]. З метою врахування усіх процесів, притаманних синхронним та асинхронним машинам, доцільно використовувати макромоделювання у вигляді “чорної скриньки”, описаного у розд. 1. Приклади практичної побудови макромоделі СТГ у вигляді “чорної скриньки” описано у [116], а електричних машин, включаючи асинхронні двигуни – у [111, 174, 175, 273].

Силові трансформатори. Формування моделей трансформаторів для аналізу режимів і процесів є складною задачею, яка зумовлюється:

- необхідністю врахування електричних параметрів, таких як власні індуктивності, ємності відносно землі, міжфазні та міжвиткові ємності, а також активні опори, які враховують втрати в обвитках і осерді;
- залежністю індуктивностей і активних опорів від частоти вхідної напруги під час перехідних процесів;
- залежністю індуктивностей, особливо взаємних, від магнітного насичення осердя;
- різнотипністю виконання трансформаторів (кількість фаз і обвиток, способи їх сполучення, конструкції осердя).

Вагомий доробок у галузі побудови математичних моделей трансформаторів здійснено авторами праць [6, 30, 46, 140, 167, 168, 172, 185-187], де розглянуто всі важливі фізичні явища, які слід враховувати під час моделювання трансформаторів, а саме: вихрові струми, гістерезис, взаємну індуктивність між обвитками й індуктивності розсіяння. Розроблено низку моделей трансформаторів, проте все ще не існує таких моделей, які б адекватно відображали їхні режими та процеси в широкому діапазоні частот і були достатньо простими й придатними для дослідження в програмах моделювання

електромагнітних процесів електротехнічних систем. З погляду використання наявних даних про досліджуваний об'єкт, моделі трансформаторів також можна розглядати як моделі, побудовані у вигляді “білої”, “сірої” та “чорної” скриньок.

Адекватне представлення силового трансформатора в широкому частотному діапазоні є складною задачею, незважаючи на його порівняно просту конструкцію. Більшість праць спрямовано на розроблення моделей, придатних для використання з метою комп'ютерного моделювання. Можна виділити такі підходи до математичного моделювання силових трансформаторів:

- моделі, створені з використанням власних і взаємних індуктивностей;
- моделі, створені з використанням індуктивностей розсіювання;
- моделі, створені на підставі принципу дуальності;
- моделі, на базі експериментальних вимірювань;
- моделі, які ґрунтуються на аналізі електромагнітного поля.

Проблеми моделювання перехідних процесів трансформатора можна вирішити, поділивши магнітний потік на робочий і власного й взаємного розсіювання [78, 83]. Моделі, створені з використанням власних і взаємних індуктивностей розсіювання, наведено в [189, 207, 223, 284, 285]. Такі ж принципи побудови можуть бути застосовані для моделювання багатофазних багатообмоткових трансформаторів [172, 291]. Описані моделі адекватно відображають індуктивності розсіювання трансформаторів (з навантаженням чи під час короткого замикання), проте не дають змоги коректно врахувати процеси в магнітопроводі. Нелінійні процеси в металевих осердях можна врахувати за умови приєднання нелінійних індуктивностей до затискачів обвиток трансформатора. Моделі такого типу вбудовано в програми моделювання електротехнічних систем типу ЕМТР [189].

У працях [178, 186] наведено достатньо повний перелік моделей трансформаторів з аналізом способів їх створення та можливості їх застосування для дослідження низькочастотних і високочастотних процесів.

Варто зазначити, що ці математичні моделі трансформаторів, створені для дослідження низькочастотних процесів електричних систем, є спрощеними.

Загальні засади основаного на принципі підходу дуальності між електричними та магнітними колами викладено в [179] й узагальнено в [248]. Із застосуванням цього методу можна коректно подати процеси, які відбуваються у залізному осерді. Пізніше цей підхід було застосовано для моделювання процесів з глибоким насиченням [168]. Загалом цей підхід придатний для створення моделей, достатньо точних для низькочастотних перехідних процесів і перехідних процесів з повільними фронтами [178].

Для обчислення параметрів трансформаторів також застосовують підхід з використанням методів аналізу електромагнітного поля. Метод скінченних елементів є найпридатнішим числовим методом для вирішення польових проблем, проте моделі такого типу складно використовувати в програмах аналізу перехідних процесів у зв'язку з тривалим часом симулювання.

Існує велика кількість моделей високочастотних трансформаторів, отриманих на базі експериментальних вимірювань [187, 225], недоліком яких є їхня достовірність тільки для тих трансформаторів, які використано для експериментальних вимірювань. Праці [180, 214, 224, 225] стосуються моделей для аналізу високочастотних процесів трифазних трансформаторів. У [225] наведено модель, створену за допомогою еквівалентної схеми, яка відображає частотну характеристику трансформатора на його затискачах. У [180] описано спрощену модель трансформатора, створену на підставі класичної T-подібної заступної схеми. Ця модель адекватна для високочастотних процесів, оскільки ураховує міжвиткові ємності та короткозамкнені вітки, представлені у вигляді R–L частотно-залежних еквівалентних схем.

Параметри трансформаторів є нелінійними і частотно-залежними. Основними причинами виникнення нелінійностей у металевих осердях є явища насичення та гістерезису. Однією з головних причин частотної залежності параметрів трансформаторів є вихрові струми. У [185] запропоновано різні підходи до моделювання гістерезису. У [225] описано способи врахування

впливу вихрових струмів. Моделі трансформаторів, які враховують явище ферорезонансу та частотну залежність параметрів трансформатора, наведено в [224], а моделі, які враховують насичення магнітопроводу, гістерезис і втрати потужності від вихрових струмів – в [186]. У зв'язку з наявністю повної інформації описані моделі можна вважати моделями у вигляді “білої” скриньки.

У [158] описано побудову моделі трансформатора у вигляді “сірої” скриньки, у якій деякі параметри трансформатора замінюються штучно обчисленими залежностями. Зокрема, визначення індуктивностей здійснюється за допомогою функції розподілу Вейбулла. Макромоделі у вигляді “чорної скриньки” у формі дискретних рівнянь стану створено та досліджено у [108, 264, 265]. В [193] розроблено високочастотну макромодель трансформатора у вигляді “чорної скриньки” у вигляді чотиріполюсника на основі частотно-залежних характеристик для дослідження грозових перенапруг.

Повітряні та кабельні лінії. Для повітряних і кабельних ліній розроблено два типи моделей у часовій області [6, 181, 228, 290]:

- моделі із зосередженими параметрами, які створюються на підставі заступної схеми зі зосередженими параметрами, значення яких розраховано на певній частоті;

- моделі з розподіленими параметрами, які поділяються на дві підгрупи: моделі зі сталими параметрами та моделі з частото залежними параметрами.

Перший тип моделей придатний для розрахунку усталених режимів, хоча він також може використовуватись для моделювання перехідних процесів у околі тієї частоти, для якої визначено параметри моделі. Проте найточнішими моделями для розрахунку перехідних процесів є ті, які враховують розподілені параметри та їхню частотну залежність.

У значній кількості робіт проаналізовано процеси з урахуванням частотно-залежних параметрів повітряних і кабельних ліній, призначених для комп'ютерного моделювання [181, 198, 199, 249]. Більшість моделей призначені для аналізу рівняння довгої лінії з використанням розв'язку у часовій області. Найповнішими для дослідження перехідних процесів

повітряних ліній електропередачі в часовій області є моделі, наведені в [162, 163]. У [221] запропоновано модель у вигляді П-подібних ланок і метод для визначення їхньої кількості залежно від досліджуваного діапазону частот і бажаної точності. У [182, 183] створено модель багатофазної лінії електропередачі апроксимацією скінченними різницями хвильових рівнянь у частинних похідних. Модель реалізовано в середовищі АТР.

У [199, 253] розглянуто моделі лінії з урахуванням геометричних розмірів ліній. Для моделювання грозових перенапруг із використанням програм аналізу електромагнітних перехідних процесів запропоновано моделі, наведені в [183, 208, 219]. Також активні й індуктивні опори проводів довгих ліній залежать від поверхневого ефекту. Це явище ґрунтується на витісненні струму до зовнішніх шарів провідника й залежить від частоти зміни магнітного потоку. Вплив поверхневого ефекту на індуктивні опори фазних проводів і грозозахисних тросів за практично використовуваних геометричних характеристик цих провідників і частот є незначним і тому ним доволі часто нехтують.

Сяйво є джерелом послаблення й спотворення коливань і перенапруг у повітряних лініях. Це явище та його врахування під час аналізу перехідних процесів досліджено у працях [157, 220, 240]. Вплив сяйва на обмеження комутаційних перенапруг, а також їхнє математичне моделювання є дуже складним і до кінця ще не вивченим явищем. Розрахунковий аналітичний метод, який дає змогу врахувати вплив сяйва на амплітуду перенапруг, запропонував Г. Н. Александров [6]. Дослідження, виконані ним, показали, що отримані таким способом результати занижені через надмірні спрощення. Фізичне моделювання, чи альтернативне застосування підходу макромоделювання, які дають змогу враховувати результати натурних експериментів, можуть створити необхідні передумови для дослідження цього явища та побудови макромоделей ліній з урахуванням сяйва.

Формують рівняння для аналізу перехідних процесів кабельних ліній і методи їх розв'язання так само як і для повітряних ліній. Однак велике розмаїття конструкцій кабелів ускладнює розроблення єдиної моделі, яка могла

б представити кабелі різних типів. У [163] наведено метод формування матриць імпедансів і провідностей для одножильного коаксіального і трубних кабелів. Запропонований метод можна використати для оцінювання матриці параметрів еквівалентних П-подібних заступних схем кабелів з метою розрахунку усталеного режиму на одній частоті, але він непридатний також для аналізу перехідних процесів. У праці [221] наведено математичну модель, у якій враховано частотну залежність параметрів кабелю. Модель ефективна для моделювання перехідних процесів у широкому частотному діапазоні.

Універсальна модель, яка придатна для дослідження перехідних процесів повітряних і кабельних ліній, наведена в [228].

Описані вище моделі ліній електропересилання враховують геометричні розміри провідників та їх взаємне розташування. Такі складові ліній електропересилання, як опори, істотно впливають на перебіг перехідних процесів, особливо під час блискавки. Для створення математичних моделей неоднорідних ліній електропересилання необхідно враховувати вплив опор і опорів уземлення. Під час вивчення блискавки опори представляють як хвильовий опір з відповідною їй і попередньо вирахованою сталою поширення хвилі. Врахування блискавки під час вивчення перехідних процесів за допомогою сучасних комп'ютерних середовищ розглянуто у моделях лінії з опорами, представлених у [287].

Математичні моделі елементів вузлів навантаження. Від шин нижчої напруги трансформаторів підстанцій через повітряні та кабельні лінії здійснюється живлення побутових і промислових споживачів електричної енергії. Значна частина промислового навантаження припадає на асинхронні та синхронні двигуни. Електричні двигуни під час аналізу перехідних процесів враховуються за допомогою їх еквівалентних заступних схем.

За необхідності навантаження можна врахувати детальніше, методика його математичного моделювання наведена в [53, 86]. Найпростішою і найчастіше вживаною статичною моделлю навантаження є модель у вигляді

лінійної провідності, яка розраховується за потужністю та напругою у вибраному початковому режимі .

3.5. Еквівалентні моделі складних електротехнічних систем

Для моделювання складної електротехнічної системи, особливо з метою вивчення перехідних процесів в комутаційних та аварійних режимах, остання повинна бути представлена у вигляді детальної заступної схеми, яка відповідає електричному колу, відповідному її структурі. Такі схемні вимоги відповідають моделюванню низько-частотних перехідних процесів. Детальне представлення електротехнічної системи в повному обсязі не є ефективним і практично недоцільним способом розв'язання задачі комп'ютерного моделювання їх динамічних режимів з погляду складності результативної обчислювальної задачі та необхідності застосування комп'ютерних засобів з великою швидкістю та можливістю паралельних обчислень. У загальному лише відносно мала частина реальної системи потребує деталізованого моделювання в той час, коли решта електричних кіл складових елементів може бути представлена відповідною еквівалентною моделлю. Тим не менше, застосування відповідних еквівалентних схем із параметрами, визначеними для основної частоти на основі дослідів короткого замикання, може бути неадекватним для моделювання перехідних процесів у зв'язку з присутністю частотозалежних елементів.

В той ж самий час, потреба у адекватному відтворенні високочастотних збурень буде вимагати використання малого кроку моделювання. Поєднання малого кроку інтегрування та складності моделі системи накладає жорсткі вимоги на комп'ютерні ресурси, особливо це стосується швидкодії центральних процесорів (CPU) та об'єму задіяної для обчислень оперативної пам'яті. Ще більше задача ускладнюється, якщо система містить велику кількість елементів із розподіленими параметрами (лінії електропередавання та підземні кабелі). Одним із способів зменшення витрат обчислювальних ресурсів є заміна частин системи обчислювальною ефективною моделлю.

Під час моделювання великовимірних електротехнічних систем за допомогою комп'ютерних програм моделювання перехідних процесів звичайною практикою є поділ системи на так звану "область вивчення", де відбувається перехідний процес та "зовнішню систему", яка вміщує решту елементів електричного кола з метою зменшення обчислювальної складності. Досить часто в процесі моделювання генератори, як було згадано вище, замінюють джерелами напруги промислової частоти. Таке спрощення унеможливорює аналіз електромеханічних низькочастотних перехідних процесів з одного боку, а з іншого дозволяє здійснювати моделювання грозових та комутаційних перенапруг.

У випадках застосування пристроїв силової електроніки для зменшення низько-частотних електромеханічних коливань, високочастотна еквівалентна модель буде неадекватною. У зв'язку з цим виникає потреба розроблення відповідної методики з метою визначення динамічних еквівалентних моделей для адекватного представлення як низько-, так і високочастотних перехідних процесів [166]. Адекватність такої моделі залежатиме від виду динамічного режиму, який підлягає моделюванню. Це зумовлює необхідність побудови трьох видів моделей-еквівалентів з метою:

- 1) дослідження високочастотних перехідних процесів, у яких вимагається коректне моделювання ліній електропересилання для врахування частото-залежних ефектів;
- 2) моделювання низькочастотних електромеханічних коливань, де лінії електропересилання моделюють у вигляді імпедансів зі сталим числовим значенням;
- 3) досліджень з врахуванням субсинхронних коливань.

Саме з цих міркувань окремо розробляють високо-, низькочастотні та широкосмугові моделі-еквіваленти складних електротехнічних систем [215, 226, 227].

При побудові високочастотних еквівалентних моделей їх формують як частото-залежні багатополосні еквіваленти у вигляді "чорної скриньки", які

базуються на використанні дробово-раціональних функцій, відомі як частото-залежні мережеві еквіваленти (FDNE - Frequency Dependent Network Equivalents). Частотно-залежна провідність моделюється за допомогою схемної моделі із зосередженими параметрами чи математичної моделі у вигляді дробово-раціональної функції. Такі моделі піддаються адаптації до середовищ типу ЕМТР за допомогою еквівалентної заступної схеми із зосередженими параметрами чи математичної моделі у вигляді рекурсивної згортки [278].

Традиційно моделі формують у частотній області із використанням поняття електричної провідності. Для перетворення дробово-раціональної функції у провідності використовують апроксимацію на основі згладжувальних поліномів чи зміщення полюсів у визначеному частотному діапазоні. В разі отримання пасивного електричного кола така модель забезпечує стійкість моделювання динамічних режимів системи. Таке моделювання, яке передбачає лінійність досліджуваного кола на основі електричної провідності, визначає зв'язок між напругою \mathbf{V} та струмом \mathbf{I} на полюсах еквівалентної моделі у вигляді:

$$\mathbf{YV} = \mathbf{I} \quad (3.1)$$

Далі, у разі побудови еквівалента складної електротехнічної системи вище згаданого виду за допомогою моделі низького порядку відносно виводів системи визначають вхідні збурення у вигляді змінних $\{\lambda_i(t)\}$ (напруги або струми), та вихідні змінні $\{\psi_i(t)\}$ (струми та напруги) відповідно з $i, j = 1..P$ кількістю полюсів. Якщо підсистема є лінійною стаціонарною системою, вона може бути замінена відповідним математичним співвідношенням, яке повинно якомога точніше відтворювати реакцію “вхід-вихід” складного електричного кола. Математично, співвідношення між входами та виходами цього багатополюсника описують у вигляді інтегралу згортки:

$$\psi_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{ij}(t - \tau) \lambda_j(\tau) d\tau \quad (3.2),$$

де $\lambda_j(\tau)$ – збурення на j -тому виводі багатополюсника, $\psi_{ij}(t)$ – вихідний відгук на j -тому виводі при входньому збуренні $\lambda_j(t)$, $h_{ij}(t)$ – імпульсна реакція елемента (i, j) .

Рівняння (3.1) перетворюють у частотну область за допомогою рівняння (3.2), вважаючи, що $s = \sigma + j\omega$ є оператором Лапласа, а H_{ij} – імпульсна передатна функція, причому

$$\psi_{ij}(s) = H_{ij}(s)\Lambda_j(s) . \quad (3.3)$$

Далі отриманий еквівалент складної системи (3.3) представляють у вигляді дробово-раціональної функції $\mathbf{H}(s)$ зі звичайними полюсами $\{p_n\}$ матрицями лишків $\{\mathbf{R}_n\}$ у вигляді:

$$\mathbf{H}(s) \cong \sum_{n=1}^N \frac{\mathbf{R}_n}{s - p_n} + \mathbf{R}_0 . \quad (3.4)$$

Після цього формуються провідності у вигляді співвідношення $\mathbf{H} = \mathbf{Y}$, яке пов'язує входню напругу та відповідні струми у вигляді:

$$\mathbf{i}(s) = \mathbf{Y}(s)\mathbf{v}(s) . \quad (3.5)$$

Ідентифікацію виразу (3.4) здійснюють у часовій області на основі співвідношення (3.2) з даними (вхідними та вихідними відгуками), обчисленими за допомогою програмних симуляторів. Збурення $\lambda_j(t)$ (напруги) прикладають до зовнішніх виводів досліджуваного об'єкту (тут $j = 1..P$ - кількість полюсів багатополюсника зі спостереженням відгуків ψ_{ij} струмів на тих самих виводах). У результаті отримують матрицю відгуків $\psi(t)$ та матрицю збурень $\lambda(t)$ розміру $P \times P$, які використовують для визначення полюсів та лишків дробово-раціональної функції (3.4), і, зазвичай, визначення математичного опису цього мережевого еквівалента.

Під час програмної реалізації вираз (3.5) вводять в програми типу ЕМТР з використанням схеми зі зосередженими параметрами, джерел струму й

еквівалентної схеми Нортон, як це показано на рис. 3. 3.

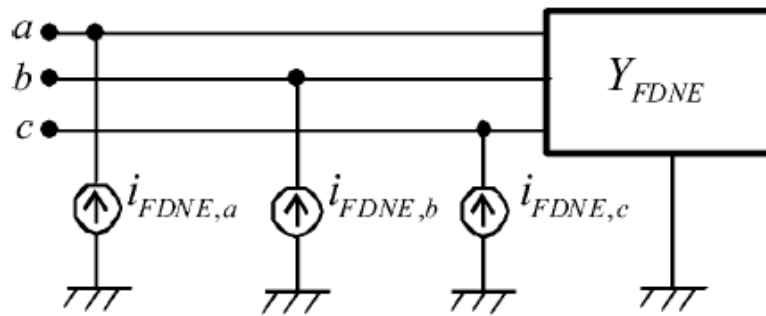


Рис.3. 3. Моделювання складного електричного кола за допомогою еквівалентного багатополісника

Застосування такого підходу дозволяє значно зменшити час моделювання та ресурси оперативної пам'яті, проте його практична реалізація зумовлює виникнення труднощів під час пошуку матриць полюсів та лишків функції $H(s)$, особливо за умови моделювання нелінійних систем.

Для побудови низькочастотних моделей в основному використовують такі підходи:

- 1) модальні методи, де зовнішня система подається наближеною лінійною моделлю;
- 2) когерентні методи, де групи когерентних генераторів замінюють їм еквівалентним;
- 3) методи на основі вимірювань чи моделювання, де параметри еквівалентної моделі визначаються на основі реакцій досліджуваної системи, і отримані шляхом натурального експерименту або комп'ютерного моделювання.

Модальні методи базуються на лінеаризованих моделях такого вигляду:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}. \quad (3.6)$$

Власні значення коефіцієнтів матриці системи \mathbf{A} надають інформацію про режими динамічної системи. У разі комплексно-спряжених власних значень ідентифікують коливні режими, а в разі дійсних значень – загасні чи

аперіодичні. Модальні методи досить часто використовують як допоміжні для когерентних методів з метою ідентифікації однакових груп генераторів.

У когерентних методах групування однорідних машин отримують шляхом аналізу відгуку системи на збурення. Еквівалент зовнішньої системи отримують за допомогою заміни кожної такої групи машин однією великою машиною. На відміну від модальних методів, цей підхід зводить фізичні моделі генераторів в одну еквівалентну форму, причому еквівалентні моделі генераторів є нелінійними. Когерентні методи містять такі етапи:

- 1) ідентифікацію груп когерентних генераторів;
- 2) агрегування шин генераторів;
- 3) агрегування моделей генераторів та пов'язаних з ними систем керування;
- 4) усунення шин навантаження.

Методи побудови еквівалентних моделей на основі вимірювань та моделювання базуються на основі результатів вимірювань, отриманих під час натурного експерименту чи шляхом комп'ютерного моделювання на основі деталізованих математичних моделей, вбудованих у комп'ютерні середовища моделювання перехідних процесів. З метою визначення параметрів моделей-еквівалентів використовують методи ідентифікації з теорії динамічних систем. У [289] ідентифікація параметрів виконується за допомогою алгоритму найменших квадратів з адаптацією величини часового кроку. До початку моделювання коефіцієнти моделі замінюють початковими наближеннями. Початкова система піддається повторній ідентифікації до моменту, коли штрафна функція досягає мінімуму та ідентифікуються усі параметри системи. Схожа методика застосована в [211, 212, 278], де основні зусилля направлені на пошук найкращих значень вектора коефіцієнтів, який мінімізує похибку. Він визначається як квадратична функція відхилень різниць між вимірними та змодельованими масивами даних осцилограм перехідних процесів.

На відміну від високо- та низькочастотних еквівалентних моделей, які є адекватними у визначеному частотному діапазоні, широкосмугові еквівалентні

моделі відтворюють поведінку зовнішньої системи в довільному діапазоні частот, від електромеханічних 0-2 Гц до електромагнітних 10-100 кГц. Такі моделі реалізують на RTDS симуляторах, в основі функціонування яких закладено моделювання на паралельних обчислювальних засобах.

Як альтернативний засіб математичного описання електричних кіл, систем та їх елементів доцільно застосовувати дискретне рівняння стану. Такі моделі зручні для комп'ютерного моделювання, не мають жодних обмежень стосовно модельованих елементів, не вимагають дотримання умов фізичної реалізації, як це характерно для традиційних заступних схем. Експериментальні дані, необхідні для побудови дискретних математичних макромоделей, можна отримати як шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою деталізованих математичних моделей досліджуваних елементів у сучасних програмних пакетах, так і натурним експериментом за допомогою реєстраційних комплексів. Важливим є й те, що і нині існують надійні методи ідентифікації структури і параметрів таких моделей на основі відомих перехідних характеристик, отриманих як експериментально, так і розрахунково.

3.6. Проблеми і засади побудови математичних макромоделей елементів електротехнічних систем

Сучасні електроенергетичні об'єкти належать до класу складних динамічних систем, які містять велику кількість елементів із жорсткими взаємозв'язками. Крім традиційних для електричних кіл і мереж структурних складових, вони можуть містити елементи, які також є доволі складними об'єктами. Наприклад, певні електротехнічні комплекси чи установки, електроенергетичні агрегати або й цілі електричні станції, трансформаторні підстанції, системи керування тощо. Таке агрегування у багатьох випадках є допустимим і доцільним, що істотно спрощує подальший аналіз процесів у ЕТС.

Створення ефективних математичних моделей, призначених для аналізу перехідних процесів з метою дослідження ЕЕС та їх елементів і сьогодні

залишається актуальною й перспективною науковою проблемою. Розвиток сучасних комп'ютерних систем, їх математичного, програмного й системного забезпечення створив сприятливі умови для розроблення нових ефективних методів аналізу режимів і процесів складних ЕТС і відповідних моделей їх елементів [10, 50, 96, 195]. Шляхи вирішення даної проблеми також запропоновано нами у [26-28, 263, 268].

Побудова математичних моделей складних ЕТС, своєю чергою, потребує створення математичних моделей таких типових елементів:

- джерела живлення (синхронних і асинхронних генераторів електричних станцій та інших нетрадиційних джерел);
- силові трансформатори та автотрансформатори, моделі яких можна використати для дослідження високочастотних та низькочастотних перехідних процесів з врахуванням вихрових струмів, гістерезису, взаємної індуктивності між обвитками, індуктивностей розсіяння тощо;
- ліній електропередавання, моделі яких можуть бути із зосередженими чи розподіленими параметрами та врахуванням їх частотної залежності;
- елементів вузлів навантаження тощо.

Згадані елементи ЕТС мають низку специфічних властивостей, які суттєво впливають на особливості побудови їх математичних деталізованих моделей чи макромоделей [47, 78, 79, 82, 84, 85, 89, 137, 152, 153, 188, 192]. На нашу думку [257-259], основна специфіка полягає в тому що:

- під час моделювання елементів ЕТС через їх великі геометричні розміри потрібно враховувати польові ефекти;
- значна частина елементів ЕТС є електромеханічними, що зумовлює необхідність описання їх стану різнотипними змінними (електричними та механічними), а це, своєю чергою, викликає істотний розкид сталих часу їх математичних моделей;
- на параметри елементів ЕТС можуть істотно впливати зовнішні фактори (атмосферні, топографічні тощо), дію яких складно змоделювати на основі детермінованого підходу;

- струми та напруги у типових елементах під час комутацій, перехідних процесів чи аварійних режимів можуть досягати великих значень, що утруднює проведення експериментальних досліджень;
- вплив зовнішніх факторів на параметри елементів ЕТС в багатьох випадках унеможлиблює абсолютну повторюваність експерименту з метою реєстрації перехідних характеристик.

Зазначені вище особливості елементів ЕТС зумовлюють певну специфіку процедури побудови макромоделей [257-259, 262, 263]. Це стосується насамперед вибору зовнішніх (вхідних чи вихідних) змінних модельованого елемента. Ними можуть бути не тільки миттєві значення струмів і напруг, але й швидкості обертання, механічні моменти, частота, амплітудні значення квазіперіодичних струмів і напруг.

Для ефективної побудови макромоделей та їх високої адекватності потрібно звертати значну увагу на спосіб отримання апріорної інформації, необхідної для побудови макромоделей. Це здійснюють за допомогою натурального експерименту або комп'ютерним симулюванням на підставі повної (зазвичай, польової чи деталізованої) математичної моделі об'єкта. Перший шлях для ЕТС має суттєві обмеження, зумовлені тим, що потрібні виміри значень векторів $\vec{v}(t)$ і $\vec{y}(t)$ необхідно фіксувати в нормальному режимі функціонування ЕТС. Тобто збурення, що зумовлюють перехідні процеси, можуть бути викликані певними комутаціями, які не спричиняють вихід ЕТС за межі робочих режимів. Такий фактор дещо змінює описану вище процедуру ідентифікації параметрів макромоделі. Зокрема, не завжди вдається розділити процес ідентифікації параметрів лінійної та нелінійної частин макромоделі. Найчастіше доцільно розділити процеси ідентифікації лінійної та нелінійної частин макромоделі на окремі процедури ідентифікації, що призводить до суттєвого утруднення обчислювальної задачі. Однак завдяки використанню діакоптического підходу до реалізації оптимізаційних процедур нами практично реалізовано ідентифікацію параметрів макромоделей ЕТС [92, 262, 257].

Щодо дії випадкових факторів (обрив проводів, коротке замикання тощо)

на стан ЕТС, то врахування їх цілком можливе за умови хоча б одноразової фіксації зумовлених ними впливів на змінні, які описують перехідні процеси в ній. Звичайно, у цьому разі як змінні можна використовувати миттєві значення струмів і напруг.

Ще одним аспектом, який ускладнює побудову макромоделей елементів ЕТС, є істотний взаємний вплив між різними полюсами динамічного багатополісника, який відображає модельований об'єкт. Тобто, якщо на одному з полюсів з'явилося збурення, то на усіх інших полюсах також спостерігатиметься значний відгук на нього. При цьому реакція на усіх полюсах здебільшого різна. Для побудови макромоделі такого об'єкта за принципом “чорної скриньки” формується складна функція мети. Тоді у задачі оптимізаційної побудови макромоделей виникають довгі та круті яри невідомої форми, локальні мінімуми тощо.

Треба також згадати і про складність проведення експериментів на електроенергетичних об'єктах, а це здебільшого зумовлює те, що побудова макромоделі відбувається на основі фактично наявних, а не бажаних даних. У такому разі ми не можемо розраховувати на перехідні характеристики, в яких збурення подається лише на один з полюсів досліджуваного об'єкта та фіксується на інших, а можемо отримати дані, зареєстровані у разі виникнення збурення одночасно на усіх вхідних полюсах. Крім того, для трифазних елементів, якими є елементи ЕЕС, було б добре також мати асиметричні експерименти для кожної з фаз, а така інформація також здебільшого відсутня.

Одним з прикладів експериментальних даних, на основі яких можна створювати макромоделі реальних електроенергетичних об'єктів, є інформація про аварії на них, зокрема зареєстровані апаратно-програмними комплексами різного функціонального призначення під загальною назвою “РЕГІНА” [121-124]. Застосування інформаційної технології синхронізованих вимірювань з використанням сигналів GPS відкриває принципово нові можливості для реєстрації динамічних характеристик ОЕС України та побудови макромоделей елементів, що експлуатуються саме в Україні з перспективою їх подальшої

адаптації до відповідних програмних комплексів комп'ютерного моделювання режимів і процесів ЕЕС. Використання макромоделей елементів та складових ЕЕС у формі “вхід–вихід”, створених на підставі реальних даних, отриманих під час натурних експериментів чи реєстрованих нормальних й аварійних режимів, надає нові можливості для швидкого моделювання ЕЕС у реальному часі [120].

Якщо апріорна інформація генерується за допомогою математичного моделювання (другий запропонований спосіб), то труднощі в її отриманні зумовлені складнощами побудови деталізованих моделей конкретних елементів та особливостями застосування й комп'ютерної реалізації вибраного математичного апарату. З врахуванням сучасних можливостей комп'ютерної техніки й обчислювальної математики такий підхід можна використовувати для побудови макромоделей електротехнічних систем і окремих елементів, таких як трансформатори, вимикачі, розрядники, лінії електропередавання низької напруги, вузли навантаження тощо.

Окрім цього, актуальною проблемою є недоступність потрібної інформації, яка міститься у формулярах заводів-виробників з метою її використання для побудови детальних математичних моделей окремих елементів ЕТС. Це зумовлює доцільність створення макромоделей конкретних елементів на підставі перехідних характеристик, отриманих за допомогою натурального експерименту.

Традиційно комп'ютерний аналіз перехідних процесів ЕТС здійснюють у кілька етапів:

- 1) створення заступної схеми електричних і магнітних кіл досліджуваного об'єкта чи системи;
- 2) формування рівнянь електромагнітного стану на підставі певних заступних схем електричних і магнітних кіл (математична модель);
- 3) створення цифрової моделі написанням комп'ютерної програми за допомогою мов програмування чи розробленням імітаційної моделі засобами спеціальних середовищ моделювання;

4) дослідження перехідних процесів на підставі розроблених моделей.

Електричну схему досліджуваного об'єкта можна дослідити за допомогою використання спеціалізованих програмних засобів, таких як EMTP, PSCAD, пакета SimPower System Blockset тощо. У такому разі користувачу не потрібно створювати власну модель, проте низка важливих особливостей модельованого об'єкта може бути втрачена.

Математичну модель досліджуваного об'єкта у вигляді рівнянь електромагнітного стану можна промодельовувати за допомогою середовищ імітаційного моделювання, наприклад, таких як MATLAB/Simulink чи MathCAD [57, 78], чи створенням власної цифрової моделі, як показано нами у [26, 256, 260]. У такому разі перспективним напрямом розроблення ефективних цифрових математичних моделей ЕТС є застосування декомпозиції, діакоптики та макромоделювання та їх реалізація на багатопроцесорних ЕОМ [144].

Створення нових ефективних математичних моделей елементів електротехнічних систем для прогнозування їх часових характеристик у сучасних комп'ютерних середовищах потребує вирішення таких суперечливих проблем:

- 1) формування адекватних моделей, які дають змогу враховувати вплив суттєво нелінійних характеристик елементів електромагнітних кіл, що зумовлює ускладнення моделей на схемному рівні;
- 2) максимально можливе спрощення моделей для пришвидшення комп'ютерного моделювання режимів досліджуваних ЕТС;
- 3) врахування усіх окремих елементів досліджуваного об'єкта чи їх агрегування з подальшим ускладненням при створенні комплексної моделі.

Однак уже відбулися істотні зміни щодо математичного моделювання, які можуть суттєво вплинути на застосування традиційних підходів до розрахунку динамічних режимів електричних кіл, і, зокрема, ЕТС. Це стосується насамперед використання дискретних математичних моделей для відображення процесів у динамічних системах [5, 41, 87, 101].

Математичні макромоделі в формі змінних стану зручні для комп'ютерного моделювання, не мають жодних обмежень стосовно модельованих елементів, не вимагають дотримання умов фізичної реалізації, як це характерно для традиційних заступних схем, а наявні методи ідентифікації структури і параметрів таких моделей на основі відомих перехідних характеристик, отриманих як експериментально, так і розрахунково уможливають їх побудову.

Однак названі вище дискретні математичні моделі певною мірою є незручними для розрахунку динамічних режимів електричних кіл класичними методами, такими як методи вузлових напруг чи контурних струмів, особливо за їх комп'ютерної реалізації. Це зумовлено такими причинами:

- 1) змінні, що описують стан електричного кола, є дискретними;
- 2) у дискретні моделі не входять традиційні поняття опору і провідності;
- 3) опис багатополюсних елементів здійснюється у вигляді дискретних рівнянь стану.

Методика макромоделювання дає змогу вилучити із математичної моделі досліджуваної системи низку змінних, які на певному етапі нецікаві для дослідника, що в результаті істотно спрощує саму модель і пришвидшує обчислення. Зменшує час обчислень для цього випадку і відсутність етапу дискретизації, обов'язкового за традиційного підходу. У разі використання макромоделей перспективним є діакоптичний підхід, що дає змогу аналізувати неоднорідні електричні кола, які можуть містити елементи як із зосередженими, так із розподіленими параметрами, а також цифрові.

Окрім того, діакоптичний підхід уможливує реалізацію обчислень на паралельних комп'ютерних засобах [210, 214, 276], що дозволяє реалізувати режим обчислень у реальному масштабі часу для складних ЕТС і тим самим прогнозувати їх поведінку.

Висновки до розділу 3

1. Здійснено критичний аналіз сучасних комп'ютерних програм моделювання перехідних процесів електротехнічних систем на одно- та

багатопроцесорних комп'ютерах, що дозволило вибрати комп'ютерні програми для моделювання перехідних процесів та подальшої адаптації створених макромоделей .

2. Здійснено аналіз відомих математичних і комп'ютерних моделей й макромоделей як електротехнічних систем, так і окремих їхніх елементів.

3. Описано особливості побудови математичних моделей та макромоделей елементів електротехнічних систем, що дозволило вибрати оптимальні способи їх побудови.

РОЗДІЛ 4

АПРІОРНА ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

4.1. Види та форми апріорної інформації для побудови макромоделей ЕТС на основі експериментальних даних

Підготовлення й розв'язання задач моделювання та макромодельовання систем за допомогою сучасної обчислювальної техніки [73] є доволі складним процесом, який доцільно розділити на такі етапи:

- 1) постановка задачі й дослідження процесу, що підлягає вивченню, виділення якісних і кількісних ознак досліджуваного об'єкту на підставі експертного аналізу;
- 2) вибір і обґрунтування показників якості досліджуваного процесу;
- 3) визначення характеристик випадкового процесу (початкових даних) і діапазону їхньої зміни;
- 4) обґрунтування необхідної точності одержуваних результатів;
- 5) формалізація процесу та вибір способу побудови моделі визначеного виду (динамічної, статистичної, імітаційної чи макромоделі);
- 6) створення алгоритму моделювання;
- 7) побудова комп'ютерної програми (цифрової моделі) та її налаштування;
- 8) розв'язання поставленої задачі на комп'ютері згідно з мультिवаріантним фізичним чи імітаційним експериментом;
- 9) аналіз одержаних результатів, висновки та рекомендації.

В окремих випадках складність об'єкту не дозволяє не тільки побудувати його математичну модель, але й надати достатньо повне її описання. Перспективним тут є виокремлення найскладнішої для математичного описання частини об'єкту в модель іншого типу (імітаційну чи описову). Тоді модель реалізують, з одного боку, на базі апарату диференціальних чи алгебричних рівнянь з подальшим застосуванням засобів обчислювальної техніки, а з іншого – є реальна частина об'єкту, яка повинна бути відтворена

альтернативною моделлю, наприклад за допомогою нейронних мереж, нечіткої логіки чи макромоделлю. Це значно розширює можливості та підвищує достовірність результатів моделювання. Для цього необхідно вибрати методіку оцінювання наявної інформації про досліджуваний об'єкт, описання адекватності моделі й отриманих результатів, а також автоматизувати як процеси одержання, так і оброблення результатів під час комп'ютерного експерименту [44].

Інформація про будь-який об'єкт є достатньо абстрактним поняттям, що може набувати різного значення залежно від контексту та мети її оброблення. Під час збору доступних для вимірювання чи емпіричного описання характеристик об'єкту, користувач може отримати узагальнені дані, які можна систематизувати залежно від їх виду, появи, системності, повноти та достовірності (рис. 4.1), а також виду макромоделі, яка повинна бути побудована чи мети, якої прагне досягнути дослідник.

Процедура обробки інформації та подання її у формі, придатній для побудови макромоделей передбачає виконання таких послідовних кроків [146]:

- 1) збір даних на основі натурального чи математичного експерименту у формі, достатньо повній для побудови макромоделі;
- 2) формалізація даних (запис масивів даних у однаковій формі);
- 3) фільтрація даних з метою усунення невідповідних даних чи їх прорідження;
- 4) сортування даних (впорядкування за ознакою схожості з використанням теорії подібності чи за типом режиму);
- 5) зберігання та надсилання в робочу область програмного забезпечення для побудови макромоделі.

Будь-який етап побудови математичної моделі чи макромоделі та вирішення проблеми пошуку оптимального розв'язання поставленої задачі не матиме змісту без достовірної вхідної інформації. Без достовірної інформації навіть найточніші обчислювальні методи не дають оптимального розв'язку [146].

Коректна систематизація отриманої інформації на основі експертного аналізу є ключовим моментом під час вибору форми математичної макромоделі та методу, придатного для її побудови.

У разі можливості безпосередньої реєстрації інформацію можна розглядати як детерміновану, а у разі конструювання моделі об'єкту, аналогів якого не існує, доступна інформація матиме стохастичний характер. Зазвичай під час розгляду електротехнічних елементів з метою побудови моделі в формі "вхід-вихід" сигнали, які несуть інформацію про об'єкт, реєструються як струми та напруги вхідних і вихідних полюсів багатополісника у вигляді якого представлено об'єкт.

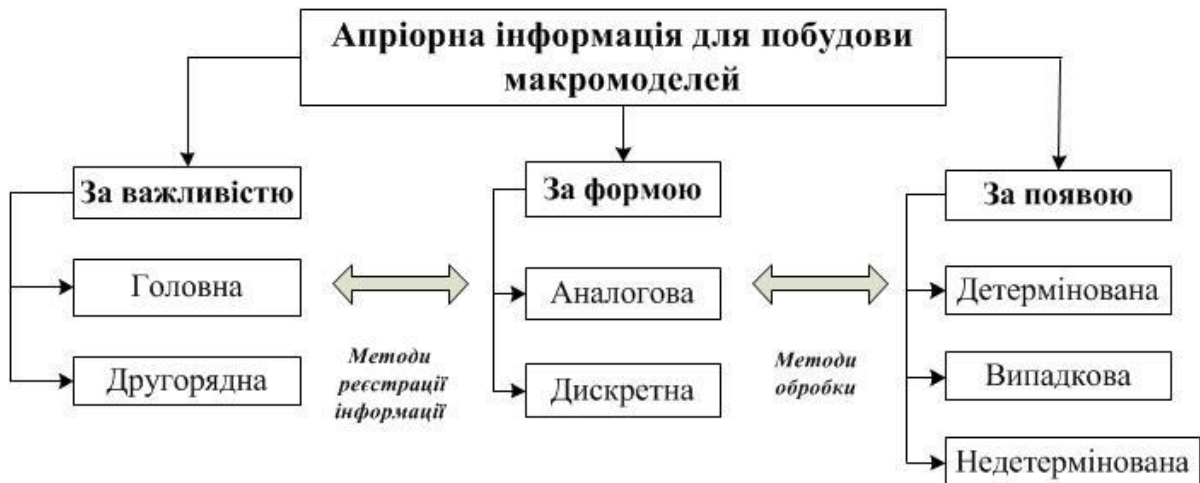


Рис. 4.1. Види апріорної інформації як основа для побудови макромоделі

Якщо наявною є тільки така інформація, то модель будують у вигляді "чорної скриньки", в разі додаткової інформації про структуру об'єкту матимемо "сіру скриньку". Якщо ж модель будують за умови повної інформації про структуру та параметри об'єкту, матимемо білу скриньку. Дискретні та неперервні макромоделі елементів електротехнічних систем можуть бути створені з використанням перехідних характеристик, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою математичних моделей на основі заступних схем чи отриманих шляхом реєстрації даних апаратно-вимірювальними комплексами SCADA. З погляду класичної теорії лінійних динамічних систем ця інформація про об'єкт є достатньою для побудови його математичної моделі.

Окрім цього, кількість і види апріорної інформації, необхідної для побудови математичних моделей та макромоделей, визначаються базовими засадами теорії інформації [138]. А саме:

- 1) інформація може існувати лише за наявності систем керування;
- 2) інформація в різних формах запису може зберігатись і передаватись тільки на матеріальних носіях;
- 3) інформація може вимірюватись кількісно та мати ідеальний характер.

Основна інформація, яка використовувалась для побудови макромоделей, подається в символній, текстовій і графічній формах. У разі побудови макромоделі у вигляді "чорної скриньки" використовують дані в текстовій формі (масиви даних, отриманих під час експерименту на детальних математичних моделях, чи зареєстрованих відповідними апаратно-вимірювальними комплексами) та графічній. Якщо інформація подається лише в графічній формі (осцилограми перехідних процесів), вона потребує наступного оброблення (оцифрування та фільтрації). У разі побудови моделі у вигляді "сірої скриньки" деяка додаткова інформація наявна в символній формі чи має описово-емпіричний характер. Коли будують модель у вигляді "білої скриньки", то використовують усі види даних для повноти моделі.

Первинною інформацією для побудови макромоделей здебільшого виступає набір перехідних характеристик, тобто відображення вхідних збурень у реакції модельованого об'єкта. Для дискретного випадку таку множину відображень можна записати так: $\{\vec{v}_i^{(k)}\} \rightarrow \{\vec{y}_i^{(k)}\}$, де i - номер збурення, k - номер дискрети.

Інформацію, на основі якої буде будуватися макромоделі слід формувати з урахуванням таких обмежень:

- 1) вибрана форма представлення макромоделі здебільшого визначає і форму представлення вхідних даних (наприклад, якщо динамічна макромоделі будуватиметься в дискретній формі, то й перехідні характеристики слід формувати в дискретному вигляді);

- 2) вибраний алгоритм ідентифікації коефіцієнтів макромоделі, за деякими винятками, чітко визначає тип збурень, що зумовлюють перехідні процеси (наприклад, може виникнути вимога, щоб збурення подавалося лише на один вхід модельованого об'єкта, та визначення форми збурювального сигналу);
- 3) об'єкт моделювання доволі часто накладає свої обмеження щодо можливих перехідних процесів, які в подальшому використовуються для побудови його моделі (таким чином виникають обмеження на процедуру ідентифікації макромоделі та на форму апроксимації нелінійностей);
- 4) ускладнення форми нелінійності зумовлює збільшення кількості наборів перехідних характеристик, необхідних для побудови макромоделі;
- 5) інформація повинна бути достатньо повною, тобто описувати всі характеристики модельованого об'єкта, які повинні відобразитися будованою макромоделлю згідно з її планованим використанням (у протилежному разі отримана макромодель не буде коректно відтворювати поведінку модельованого об'єкта).

Форма представлення макромоделі здебільшого визначається такими факторами:

- самим об'єктом моделювання, який визначає зокрема порядок моделі (залежно від форми моделі це може бути певна кількість диференційних рівнянь; розмір вектора змінних стану; кількість попередніх дискрет вхідних даних, які враховуються під час розрахунку наступної дискрети тощо);
- його планованим використанням, яке визначає форму моделі (дискретна чи неперервна, система рівнянь чи рівняння в формі вхід-вихід);
- наявністю алгоритму ідентифікації макромоделі та його застосовністю для конкретного випадку.

4.2. Апаратно-програмні комплекси реєстрації експериментальної інформації для побудови макромоделей електротехнічних систем і їх елементів

У даний час тривають активні науково-практичні дослідні роботи зі створення методів і засобів контролю, діагностики стану та прогнозування

поведінки основного електротехнічного устаткування [128]. Вже розроблені прилади та системи спеціального призначення, які дозволяють здійснювати дослідження та вимірювання в темпі процесу з покращеною чутливістю вимірювальної апаратури та підвищеною точністю. Вони здійснюють вимірювання заданого набору технологічних параметрів (температури активних елементів конструкції, електричних параметрів у нормальних і аварійних режимах, механічних вібрацій тощо). Такі системи дозволяють проводити комплексне оцінювання технічного стану, прогнозування залишкового ресурсу та вдосконалення систем керування електротехнічного устаткування (ремонт, оновлення чи заміна частин), а також здійснювати ремонтні роботи на основі оцінювання фактичного стану устаткування.

В усьому світі застосовують системи SCADA (система оперативного контролю та збору даних Supervisory Control and Data Acquisition) – спеціальні комплекси з програмним забезпеченням, призначені для розроблення чи забезпечення функціонування в реальному часі систем збирання, оброблення, відображення й архівування інформації про об'єкт спостереження чи керування [1, 250]. Системи SCADA встановлюються на комп'ютери й для зв'язку з об'єктом. Для цього використовують драйвери введення-виведення та спеціальні протоколи обміну інформацією. Вони призначені для вирішення таких основних задач:

- обміну даними з пристроями зв'язку з об'єктом, тобто з промисловими контролерами та платами введення-виведення в реальному часі через драйвери;
- оброблення інформації в реальному часі;
- логічного керування;
- відображення інформації на екрані монітора в зручній для людини формі;
- наповнення бази даних реального часу з технологічною інформацією;
- аварійна сигналізація та керування повідомленнями про аварію;
- підготовки та генерування звітів про перебіг технологічного процесу;
- здійснення мережевої взаємодії між персональними комп'ютерами на

які встановлено системи SCADA;

- забезпечення зв'язку зі зовнішніми пристроями чи програмами (системами керування базами даних, електронними таблицями, текстовими процесорами тощо).

SCADA – реєструвальні комплекси, зазвичай, містять такі підсистеми:

- драйвери чи сервери введення-виведення – програми, які забезпечують зв'язок SCADA з промисловими контролерами, лічильниками, АЦП й іншими пристроями введення-виведення інформації;

- систему реального часу – програму, яка забезпечує оброблення даних в межах заданого часового циклу з урахуванням пріоритетів;

- інтерфейс "людина-машина" – інструмент, який надає дані про перебіг процесу людині-оператору, що дозволяє здійснювати контроль і керування процесом;

- програму-редактор для розроблення інтерфейсу "людина-машина";

- систему логічного керування;

- базу даних реального часу;

- систему керування тривогами – програму, яка забезпечує створення звітів про технологічні події, їх розпізнавання як нормальні, попереджувальні чи аварійні, а також оброблення подій оператором чи комп'ютером;

- генератор звітів про технологічні події;

- зовнішні інтерфейси для обміну даними між SCADA й іншими засобами.

В Україні відомі такі сучасні системи реєстрації, контролю та діагностування як: інформаційно-діагностичний комплекс "Регіна" [126], "Регіна-Ч" [132] і система "Електросила-Ракурс" й інші. На даний час використовуються системи автоматики, які орієнтовані на розширені обсяги інформації про стан устаткування, що контролюється, в тому числі технології синхронних векторних вимірювань (WAMS) [129] і технології керування електропересильними в режимі "on-line" (WACS) поряд з принципово новими засобами – застосуванням гнучких пересилень змінного струму (ГПЗС) [123,

124]. Використання можливостей сучасних засобів реєстрації та пересилання інформації дозволить реалізувати в ОЕС України систему моніторингу режимів з використанням синхронізованих за часом вимірів кутів фазорів напруги в окремих вузлах ЕЕС, за якими визначаються режими та їхню допустимість [87, 127]. Розроблення, удосконалення та впровадження систем моніторингу поточних режимів ЕЕС ОЕС України дозволить швидко оцінювати режимну ситуацію та вживати необхідні заходи з метою запобігання й усунення аварійних ситуацій.

Як за кордоном, так і в Україні, метою впровадження сучасних систем моніторингу параметрів режимів і стану устаткування енергооб'єктів є виявлення загрози виникнення аварійних ситуацій і збереження працездатності устаткування, і, зазвичай, функціонування цілої енергосистеми кожної країни. В Україні для моніторингу ЕЕС створено й успішно використовуються апаратно-програмні комплекси різного функціонального призначення під загальною назвою “Регіна”. Вони призначені для реєстрації аналогових і дискретних сигналів, визначення місця ушкодження під час коротких замикань на ЛЕП; аналізу розвитку аварійних ситуацій, діагностування устаткування; проведення фазового та гармонійного аналізу сигналів, виділення симетричних складових у трифазних мережах змінної напруги; формування добової відомості режимів тощо [156].

На сучасному етапі комплекси “Регіна” мають найкращі технічні характеристики та показники функціонування в Україні, забезпечуючи високоточні синхронізовані за супутниковими сигналами єдиного часу вимірювання режимних параметрів. До сімейства комплексів “Регіна” належить і створений електровимірювальний реєструвальний прилад “Регіна-Ч”, який за своїми технічними характеристиками та функціональними можливостями не має аналогів в Україні і не лише знаходиться на рівні кращих світових взірців подібних приладів, що виготовляються провідними іноземними виробниками (RES-521 β version – розроблення фірми ABB, NCT2000 Type A – розроблення фірми Toshiba, PowerLog PL134 – розроблення фірми AENEA GmbH), а за

деякими показниками має суттєві переваги. Визначальною особливістю комплексу "Регіна-Ч, яка є надзвичайно важливою з погляду його подальшого використання як основного засобу збирання даних для побудови макромоделей ЕЕС України, їхніх окремих елементів чи складових, є застосування інформаційної технології синхронізованих вимірювань фазорів напруги з використанням сигналів GPS. Це відкриває принципово нові можливості для визначення динамічних властивостей ОЕС України та побудови макромоделей елементів, що експлуатуються саме в Україні з перспективою їх подальшої адаптації до відповідних програмних комплексів комп'ютерного моделювання режимів і процесів ЕЕС.

Використання макромоделей елементів і складових ЕТС у формі "вхід-вихід", створених на підставі реальних даних, отриманих під час натурних експериментів чи реєстрованих параметрів нормальних й аварійних режимів, надає нові можливості для швидкого прогнозування перебігу перехідних процесів і уможливить моделювання ЕТС у реальному часі [119].

Результати оброблення даних комплексу "Регіна" виводяться у вигляді, найбільш інформативному та зручному для обслуговувального персоналу (текстові повідомлення, графіки, таблиці, осцилограми тощо). За умов наявності текстових даних, які містять інформацію про часові відліки з певним кроком дискретизації та значеннями (миттєвими чи діючими) напруг і струмів на вході та виході об'єкта, який підлягає моделюванню, набори масивів даних з описом усталених, перехідних і аварійних режимів можуть бути використані для побудови дискретних математичних макромоделей у формі рівнянь стану з використанням концепції "чорної скриньки". Для цього дослідник повинен володіти даними об'єкту в формі "вхід-вихід" з фіксацією часового відліку, які надаються одним реєструвальним пристроєм. Якщо здійснюється моделювання об'єкту з фіксацією даних декількома реєстраторами (у разі віддаленості точок реєстрації напруг і струмів), то їхнє записування має синхронізуватися за допомогою сигналів точного часу від системи глобального позиціонування GPS. Завдяки саме таким перспективним властивостям з'явилися можливості

для розв'язання низки наукових і технічних завдань, які практично не вирішувалися, на підставі інформації про режими та процеси, від реєстраторів комплексів “Регіна-Ч”.

Серед найважливіших наукових задач, які вже можна вирішити, слід відзначити ретроспективний аналіз подій і режимів, уточнення та налаштування моделей, що стосуються динамічних характеристик енергооб'єктів, покращення якості результатів оцінювання стану енергооб'єктів тощо. Пристрої об'єктного рівня – комплекси “Регіна-Ч” – встановлено на низці електричних станцій і підстанцій. Основними компонентами комплексу “Регіна-Ч” є реєстратори сигналів (РС), які розподілені по об'єкту й утворюють нижній рівень. Верхній рівень комплексу утворює комп'ютер, де знаходиться сервер, модем і пристрій автозапуску.

Базовим елементом комплексів “Регіна-Ч” є реєстратор сигналів, який фіксує електричні сигнали змінного та постійного струму й напруги, а також дискретні потенційні сигнали чи сигнали типу “сухий контакт”. Комплекс “Регіна” може бути реалізований як у вигляді дворівневої архітектури (структура містить вимірювальні перетворювачі аналогових сигналів, модулі введення-виведення дискретних сигналів, обчислювальний модуль, ПЕОМ (сервер), модем і пристрій автозапуску) так і локальної мережі.

Якщо визначати склад основних технічних засобів системи збирання й оброблення інформації, що забезпечують одержання (реєстрацію) та пересилання інформації, то виділяють два рівні. Рівень об'єкту – один чи декілька РС з вимірювальними перетворювачами (ВП) для вимірювання миттєвих значень фазних струмів і напруг й розрахунку параметрів; комунікаційний сервер для збирання й архівації даних, які надходять від ВП, приймання сигналів точного часу від GPS-приймача, надання даних за запитами віддаленого комп'ютера, надання інтерфейсів для пересилання даних в *online* та *off-line* режимах; монітор для оперативної візуалізації зареєстрованих і розрахованих параметрів; пристрій гарантованого електроживлення для комплексу “Регіна-Ч”; комплект виробів (антена,

пристрій синхронізації та тощо) для приймання сигналів точного часу від GPS; локальна обчислювальна мережа, яка поєднує ВП й інші пристрої моніторингу нижнього рівня та сервер збирання даних. Системний рівень (рівень EO) – віддалений комп'ютер верхнього рівня (встановлюється в ДЦ ОЕС України, передбачено також встановлення і в ДЦ відповідних ЕС) для одержання інформації від комунікаційного серверу об'єктного рівня; програмне забезпечення комп'ютера верхнього рівня для приймання інформації від серверів комплексів “Регіна-Ч”.

До складу кожного РС у загальному входять – ВП, модуль уведення-виведення дискретних сигналів і обчислювальний модуль. Електроживлення кожного РС – 220 В може бути змінною чи постійною напругою. Реєстратор сигналів фіксує електричні сигнали змінного та постійного струму й напруги, а також дискретні сигнали типу “сухий контакт” чи потенціальні. Кількість необхідних реєстраторів РС_n визначається кількістю сигналів, що підлягають реєстрації й обробленню. Один РС передбачає реєстрацію до 32 аналогових сигналів. Сервер забезпечує зберігання в БД зареєстрованої й обробленої інформації та її пересилання іншим програмам, що безпосередньо не входять до складу комплексу “Регіна-Ч”, а також пересилання інформації на будь-які вищі рівні ієрархії керування (сервер комплексу “Регіна-Ч” може також формувати дані й для WEB серверу). Програми, яким може передавати інформацію сервер, можуть входити й до складу засобів автоматизованого робочого місця (АРМ) персоналу.

Завдяки описаним вище особливостям комплексу “Регіна-Ч”, його застосуванню як реєструвального комплексу в ЕЕС України, використання результатів, одержаних за його допомогою, є оптимальним вирішення поставленої задачі збирання реальних експлуатаційних характеристик і їх подальшого використання для практичної побудови макромоделей складних об'єктів ЕЕС, експлуатованих в Україні.

4.3. Експертний аналіз і його застосування для підготовки апіорної інформації з метою побудови макромоделей ЕТС і їхніх елементів

Ефективне й якісне дослідження динамічних режимів і процесів ЕТС і їхніх елементів передбачає попереднє експертне оцінювання властивостей і їх структурних особливостей з метою вибору раціонального методу побудови адекватної математичної моделі досліджуваного об'єкту. Результат моделювання значно залежить від адекватності початкової концептуальної (описової) моделі, від отриманого ступеня подібності описання реального об'єкту, кількості реалізацій моделі та багатьох інших факторів.

Під час побудови математичних моделей складних об'єктів необхідно виконати процедуру ідентифікації, тобто встановити тип досліджуваного об'єкту, його властивості та внутрішню структуру, а також вплив зовнішніх факторів на його еволюцію в часі. Часто досить складно виміряти зовнішні фактори, якісно та кількісно описати властивості об'єкту, врахувати вплив випадкових факторів та, зазвичай, сформулювати чіткі критерії, які повинні бути враховані чи яким повинна відповідати модель. У такому разі доцільним є застосування експертного аналізу (методу експертних оцінок), який би дозволив на підставі якісного оцінювання наявної інформації про досліджуваний об'єкт, власного досвіду дослідника й інтуїції сформулювати та вирішити задачу побудови адекватної математичної моделі на підставі несистематизованої, неповної та цілком достовірної апіорної інформації й нечітко окреслених властивостей об'єкту [217, 262].

Під час створення математичних макромоделей у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь змінних стану у вигляді (1.22) процес їхньої побудови базується на використанні перехідних характеристик досліджуваного об'єкту, зумовлених певними збуреннями. З погляду класичної теорії лінійних динамічних систем ця інформація про об'єкт є достатньою для побудови його математичної моделі. Однак в процесі створення математичних моделей нелінійних елементів складно вибрати вигляд нелінійної вектор-функції Φ , яка б доповнила лінійну модель і забезпечила високу точність

кінцевої макромоделі. Доволі часто характер нелінійностей у модельованому об'єкті невідомий, тому спосіб її апроксимації вибирається лише з урахуванням можливостей використовуваного алгоритму ідентифікації. У такому разі застосування підходу "сірої скриньки", тобто використання додаткової інформації про об'єкт, отриманої іншим способом, наприклад, під час якісного аналізу осцилограм перехідних процесів, чи з урахуванням фізичних аспектів, дозволив би спростити та пришвидшити процес оптимізаційної побудови макромоделі. Застосування ж підходу "білої скриньки" (відомі тип, внутрішня структура, властивості та параметри об'єкту), зазвичай, дозволяє вибрати структуру, вимірність лінійної частини макромоделі та вид степеневого поліному, які утворюють нелінійну функцію Φ .

Метод експертного аналізу (метод експертних оцінок, відомий як метод Делфі (Delphi Technique) – це спосіб прогнозування й оцінювання майбутніх результатів дій на основі прогнозів фахівців, який дозволяє оцінити досліджуване явище чи об'єкт у вигляді узагальненої думки фахівців у області досліджуваної проблеми [217, 231].

Відомі такі методи експертних оцінок:

- *метод асоціацій* – базується на вивченні об'єкту, подібного за своїми властивостями з іншим об'єктом;
- *метод парних (бінарних) порівнянь* – базується на співставленні експертом альтернативних варіантів, з яких необхідно вибрати найбажаніші;
- *метод векторів переваг* – експерт аналізує усю множину альтернативних варіантів і вибирає оптимальний;
- *метод фокальних об'єктів* – базується на перенесенні ознак випадково виявлених аналогів на досліджуваний об'єкт;
- *індивідуальне експертне опитування* – опитування у вигляді інтерв'ю чи у вигляді експертних оцінювань, яке передбачає спілкування дослідника з експертом, під час якої дослідник ставить експерту запитання, відповіді на які мають значення для досягнення програмних цілей. Аналіз експертних оцінювань передбачає індивідуальне заповнення експертом формуляру, за

результатами якого здійснюється всебічний аналіз проблемної ситуації та виявляються можливі шляхи її вирішення. Свої міркування експерт подає у вигляді окремого документу;

-*метод середньої точки* – формуються два альтернативних варіанти вирішення поставленої задачі, один з яких є менш вагомим. Експерту необхідно знайти третій альтернативний варіант, оцінювання якого знаходиться між значеннями першої та другої альтернативи.

На підставі експертного аналізу дослідник може отримати такі два види інформації [65]:

- про поодинокі причинно-наслідкові зв'язки досліджуваного об'єкта чи явища в конкретних умовах досліду, вузла збирання апріорної інформації й часу;

- про типові взаємозв'язки досліджуваних фізичних явищ і процесів. Таку інформацію здатні надати тільки експерти високого рівня, які глибоко обізнані з сутністю та закономірностями вказаних явищ за різних умов проведення математичного, фізичного експерименту чи натурних досліджень.

Експертний аналіз з погляду побудови математичної моделі (макромоделі) об'єкту електротехнічної, електроенергетичної чи електромеханічної системи, доцільно застосувати для вирішення таких задач:

1) виконання структурного аналізу – на основі фізичної структури досліджуваного об'єкту визначити структуру математичної моделі з використанням наявних математичних методів, що застосовується для вирішення схожих технічних задач;

2) виконання емпіричного аналізу – визначення структури та форми математичної моделі (макромоделі) на підставі аналізу апріорної інформації без прив'язування до структури фізичної моделі, тим більше, якщо вона є невідомою;

3) аналізу якості, а саме повноти та достовірності апріорної інформації про об'єкт і якісного оцінювання наявних перехідних характеристик й отримання відомостей про можливу фізичну структуру та властивості об'єкту;

4) оцінювання наслідків – можливості створення адекватної математичної моделі об'єкту та її подальшого використання;

5) оцінювання актуальності та доцільності побудови моделі саме цього об'єкту;

6) аналізу ресурсів (інтелектуальних, машинних, часових), необхідних для побудови моделі;

7) вибору оптимального варіанту та стратегії побудови моделі;

8) аналізу можливостей подальшого застосування розробленої моделі об'єкту.

Класичними є такі етапи експертного аналізу [60, 65, 217]:

1) постановка задачі побудови моделі. Метою етапу є структурування об'єкту та формулювання завдань аналізу;

2) постановка експертного аналізу, завданням якого є формалізоване описання процедури отримання експертних оцінок;

3) проведення експертного опитування й отримання оцінок;

4) оброблення експертних оцінок, метою якого є отримання узагальненого погляду на підставі множинних суджень експертів. Важливим кроком цього етапу є вибір коректної методики оброблення інформації;

5) інтерпретація результатів, метою якої є відповідь на те питання, заради якого проводилася вся робота. Визначальною задачею є трактування результатів відповідно до задуму, що спочатку був закладений у модель;

6) визначення результативного експертного оцінювання – результату колективної роботи експертів, які є точнішими за умови застосування спеціальних методів, наприклад багатокритеріального оцінювання тощо.

Методика експертного оцінювання для побудови математичних моделей електротехнічних систем різної природи має містити такі складові:

– сформовані критерії, що можуть усебічно характеризувати об'єкт, який підлягає експертному оцінюванню та подальшому моделюванню;

– володіти можливістю формування сукупності бажаних критеріїв, які є визначальними для кожної конкретної моделі;

- шкалу, з використанням якої оцінюється об'єкт за кожним з критеріїв;
- принципи вибору оптимального результату аналізу, за якими визначається загальна оцінка чи здійснюється порівняльне оцінювання альтернативних варіантів.

За необхідності застосування експертного аналізу найвагомішим є вирішення таких проблем:

- формування колективу експертів відповідного фаху;
- організації експертизи зі застосуванням відповідних творчих (мозкового штурму, інтуїтивного аналізу тощо) та математичних методів;
- отримання адекватної апріорної інформації;
- аналізу одержаних результатів.

Можна виокремити два протилежних (проте в певних випадках взаємодоповнювальних) підходи до макромодельовання, в яких може бути застосований експертний аналіз:

- формальний, призначений для абстрактного описання об'єктів з відтворенням усіх його якісних характеристик;
- евристичний – призначений для структурного впорядкування об'єктів предметної області та їхніх властивостей (рис. 4.2).

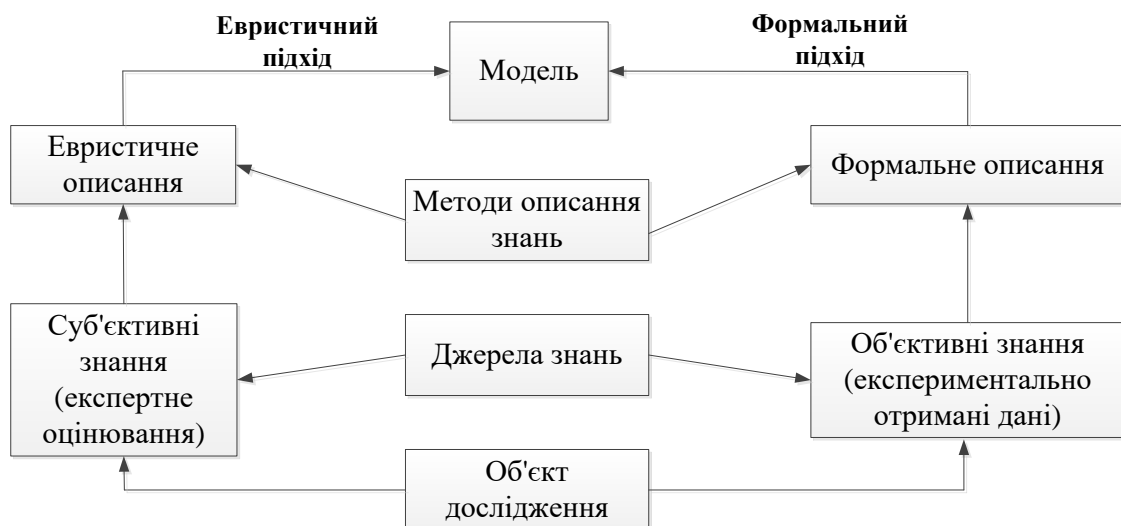


Рис. 4.2. Формальний і евристичний підходи до макромодельовання

Процедура побудови формальної моделі виглядає таким чином. У розгляд уводиться безліч змінних ζ , які є кількісними показниками аналізованих

властивостей об'єкта й довкілля. Такими змінними в теорії динамічних систем виступають, зазвичай, чотири компоненти:

$$\xi = (Y, X, U, V) \quad (4.1)$$

де Y – безліч виходів; X – безліч входів; U – безліч керованих входів; V – безліч некерованих входів (стан довкілля).

Наявні між властивостями й змінними об'єкту взаємозв'язки описуються засобами формальних мов, що визначають взаємозв'язки R_ζ на множині змінних ζ . У теорії систем такі взаємозв'язки описують рівняннями двох видів:

$$R_\zeta = (\Phi, \Psi), \quad (4.2)$$

де функція $\Phi = \Phi(X, U, V)$ описує вихід системи; $\Psi = \Psi(Y, U, V)$ - диференційні рівняння, що характеризують динаміку системи.

Сукупність змінних і зв'язків між ними утворює структуру формальної моделі

$$M = (\zeta, R_\zeta) \quad (4.3)$$

й описує поведінку об'єкта. Дослідження будь-якого явища, пов'язаного з конкретним об'єктом, полягає у розв'язанні рівнянь моделі з накладеними явними умовами й обмеженнями Ω , що визначають окремі випадки поведінки об'єкта та класифікують його основні стани. Експертний аналіз у цьому разі може бути використаний для прогнозування адекватності створеної моделі й областей її подальшого застосування.

Евристична модель будується тоді, коли неможливо сформулювати кількісні показники, виміряти їх безпосередньо чи посередньо, а також описати взаємозв'язки між ними через слабку вивченість об'єкта чи суттєву складність завдання. У такому разі використання експертного аналізу є тією науковою основою, що дозволить побудувати модель. З цього погляду макромоделі у вигляді "чорної скриньки" можна трактувати як евристичні моделі.

Зовні евристична модель відрізняється від формальної, перш за все, відсутністю змінних у явному вигляді. Для означення таких понять, як змінна,

характеристика, параметр, ознака, мета й критерій у евристичних моделях використовується один термін – фактор. Також характеристикою моделі може виступати деякий узагальнений показник (чинник), який об'єднує відразу кілька змінних, чи безрозмірна якісна характеристика, що взагалі не має фізичної природи. Фактор розглядається як самостійна величина чи як частина більш загального показника. Чинники можна класифікувати як кількісні (їх описують за допомогою чисел) і якісні, а також дискретні (з певним, найчастіше невеликою кількістю рівнів) і неперервні. Фактор розглядається як причина якогось явища чи події. У цьому разі фактор може відображати явну (безпосередньо впливає на подію), так і неявну (впливає опосередковано) причину. Змінні в евристичних моделях доцільно застосовувати тоді, коли необхідно класифікувати значну кількість факторів, що підлягають аналізу за ознаками, визначальними для перебігу процесу чи поведінки моделі. У такому разі розбиття факторів на групи збігається з поділом змінних на внутрішні, вхідні, вихідні чи керовані й некеровані. Визначення евристичної моделі починається з виділення множини факторів, які мають вплив на явище, яке досліджується, значення факторів визначається експертами, які їх оцінюють. Специфікою евристичного аналізу є здатність передбачити результат, не пояснюючи його.

Основною проблемою, яка є визначальною для одержання адекватних результатів макромодельовання зі застосуванням експертного аналізу є одержання адекватних відгуків (реакцій) досліджуваної електротехнічної системи для її інтерпретації як "чорної скриньки". Інформація про стан входів і виходів має бути синхронізованою й обробленою з використанням фільтрації шумів і прорідження даних й попередньо отриманою зі застосуванням сучасних методів вимірювання експертної інформації. Основними труднощами, які тут цьому виникають, є проблеми можливості описання експертної інформації, єдності вимірювань і адекватності.

Досить часто коефіцієнти матриць **F**, **G**, **C**, **D** макромоделі в формі змінних стану (1.22) не мають чіткої фізичної природи. Для встановлення їхньої

розмірності в системі SI необхідне застосування експертного аналізу, а також використання підходів "сірої" чи "білої" скриньки з формулюванням оцінок на підставі якісних критеріїв оцінювання перехідних процесів. Також слід зазначити, що якщо в математичних моделях (макромоделях) будуть присутні залежності більш високого порядку, ніж лінійні (макромодель буде доповнена нелінійною функцією Φ), то вимоги до якості апріорної інформації в разі застосування експертного аналізу є більш високими.

Одним із важливих аспектів застосування експертного аналізу є його використання в якості діагностичного засобу для визначення структури макромоделі на основі апріорної інформації, відомої про об'єкт. У разі, коли здійснюється побудова макромоделі у вигляді "чорної скриньки", тобто коли наявними є лише перехідні характеристики, отримані з полюсів досліджуваного об'єкту. На підставі аналізу осцилограм, отриманих під час перехідних процесів із застосуванням критеріїв їхнього оцінювання можна визначити деякі властивості об'єкту. Таким чином формулюється пряма задача експертного аналізу, суть якої полягає у спробі визначення форми та виду макромоделі й нелінійної вектор-функції для можливого спрощення її побудови [255].

Найважливішими характеристиками перехідних процесів (прямим оцінюванням якості перехідних процесів), що можуть бути використані для спрощення побудови макромоделей є такі: частота коливань, кількість коливань, час досягнення першого максимуму, час наростання перехідного процесу, декремент загасання перехідного процесу, логарифмічний декремент коливання, час перехідного процесу (час керування), коливність, установлена похибка системи, яка досліджується. Також додаткову інформацію про систему можна одержати, аналізуючи її характер, визначаючи їхню монотонність, аперіодичність чи коливність [14, 15].

Тому доцільно розглядати всю множину можливих чи спостережуваних реакцій досліджуваного об'єкта. І якщо всі вони можуть (чи не можуть) бути описані певним обмеженим набором характерних кривих, то на основі цього можна зробити висновки про:

- мінімальний порядок системи, тобто мінімальну кількість компонентів вектора змінних стану \vec{x} ;
- можливість (чи неможливість) наближено вважати об'єкт лінійним;
- на основі швидкості загасання коливань можна в першому наближенні знайти власні значення матриці \mathbf{F} ;
- якщо спостерігається чітка залежність між тим на який із входів подається збурення й характером перехідного процесу, то можна зробити деякі висновки про структуру матриць \mathbf{F} і \mathbf{G} . Аналогічно, якщо на різних виходах об'єкта спостерігаються різні за характером перехідні процеси, то можна частково визначити структуру матриць \mathbf{F} і \mathbf{C} .

Таким чином, аналіз якісного характеру перехідних процесів дозволяє виявити багато інформації про структуру та вимірність моделі, яку будуватиме дослідник. Незважаючи на доцільність застосування підходу "чорної скриньки" до макромодельовання, на практиці часто виявляється ефективним частковий відхід від цієї концепції й урахування фізичної суті процесів, що відбуваються в модельованому об'єкті. Іноді необхідно описати модельований об'єкт, виходячи з його будови, а саме врахувати найважливіші особливості будови об'єкта та відповідних взаємозв'язків між величинами для того, щоб спростити побудову макромоделі на основі експертного аналізу саме фізичних особливостей об'єкту. У більш загальному трактуванні врахування перебігу процесів у модельованому об'єкті дозволяє вибрати форму моделі у відповідності до реальних взаємозв'язків між величинами. Тому вдасться суттєво знизити кількість невідомих коефіцієнтів моделі й спростити її ідентифікацію. Важливою перевагою вибору форми моделі на основі аналізу перебігу процесів є також зниження ймовірності отримання неадекватної макромоделі, оскільки таким чином відкидається більшість фізично некоректних варіантів структури макромоделі.

Також нами сформульовано [255] й інший аспект використання експертного аналізу – описання проблеми його зворотного застосування для визначення (ідентифікації) виду досліджуваного об'єкту в разі його аналізу.

Базуючись на аналізі властивостей матриць і нелінійної вектор-функції, отриманих під час застосування оптимізаційних процедур для побудови макромоделі, якщо доступними є тільки перехідні характеристики, то можна спробувати ідентифікувати досліджуваний об'єкт, коли його тип є невідомим, чи встановити його основні властивості, що може бути важливим під час синтезу деякого електричного кола, яким можна було б замінити досліджуваний об'єкт.

Запропонована адаптація теорії експертного аналізу для побудови дискретних математичних моделей у вигляді "чорної скриньки" в дискретній формі змінних стану як на підставі критеріїв оцінювання перехідних процесів, так і фізичних властивостей системи, дозволяє спростити побудову макромоделі та процедуру її ідентифікації. Запропонований спосіб застосування експертного аналізу є важливим етапом створення макромоделей і їх наступного застосування як складових під час побудови математичних моделей складних електротехнічних систем.

За зміною параметрів, які необхідно розраховувати для прогнозування надійної роботи ЕТС розрізняють окремі підходи до моделювання чотирьох видів режимів, на основі аналізу яких може бути отримана апріорна інформація [112]:

1) нормальні усталені, коли значення параметрів режиму змінюються в межах, що відповідають нормальній роботі споживачів, що обумовлюється їх основними техніко-економічними характеристиками;

2) нормальні перехідні, що відповідають звичайним експлуатаційним змінам у ЕЕС (вмикання, вимикання, перемикування, зміна навантаження тощо), причому ці режими характеризуються швидкою і різкою зміною параметрів стану роботи деяких елементів ЕЕС при незначних змінах параметрів режиму у її вузлах;

3) аварійні усталені та перехідні, що винакають в ЕЕС під дією таких змін у схемах ЕЕС, за яких значення параметрів режиму помітно відрізняються від номінальних;

4) післяаварійні усталені після вимикання пошкоджених елементів ЕЕС, зумовлені необхідністю ліквідації аварії.

Таким чином, для ефективної побудови макромоделі необхідно здійснювати аналіз і структурування наявної апріорної інформації, що дозволить спростити процедуру її побудови. Структура первинного аналізу апріорної інформації наведена на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Структура аналізу апріорної інформації про досліджуваний об'єкт

Електротехнічні системи складаються з елементів, які можна поділити на три групи:

- 1) основні (силові) елементи (генерувальні агрегати електростанцій; трансформатори, автотрансформатори, перетворювачі роду струму та напруги, лінії електропересилання, комутаційні апарати);
- 2) вимірювальні елементи (трансформатори струму та напруги, призначені

для під'єднання вимірювальних приладів, засобів керування та регулювання);

- 3) засоби керування (засоби релейного захисту, регулятори, автоматика, телемеханіка й елементи зв'язку, які забезпечують оперативне та автоматичне керування схемою й функціонуванням ЕТС).

Таким чином, у разі побудови математичної моделі чи макромоделі за принципом “білої скриньки”, коли відомий тип досліджуваного об'єкту, її побудова може здійснюватися за функціональною ознакою з урахуванням особливостей об'єкту та з перспективою їхньої композиції з іншими елементами електротехнічної системи.

Аналіз структурних особливостей досліджуваного об'єкта також уможливорює спрощення вигляду нелінійної вектор-функції, його можна здійснити шляхом аналізу кількості фаз, їхньої симетрії та фізичних властивостей елементів об'єкту. У разі побудови проміжної моделі, вона може вважатись симетричною відносно фаз, і, відповідно, макромодель може бути побудована спочатку для одної фази, потім результати поширюються на інші фази, а модель підлягає повторній оптимізації для оновлення коефіцієнтів матриць для врахування відмінностей параметрів фаз. З іншого боку, якщо є симетрія двох фаз відносно третьої (наприклад, це суттєво під час побудови моделей трифазних трансформаторів стрижневого типу, де фази A і C є симетричними відносно фази B), то макромодель може створюватись для лінійних, а не фазних величин.

Інформація про магнітні властивості елементів магнітопроводу досліджуваних об'єктів дозволить значно спростити підбір коефіцієнтів нелінійної вектор-функції Φ . Порядок апроксимувального поліному в характеристиці намагнічення, зазвичай, відповідає степеням коефіцієнтів вектор-функції Φ .

Аналіз динаміки досліджуваного об'єкту уможливорює підбір коефіцієнтів матриці F у ручному режимі. Якщо стан системи змінюється незначно на вибраному кроці дискретизації перехідних характеристик, то коефіцієнти

матриці F наближаються до одиниці. Для складної динамічної системи коефіцієнти цієї матриці є суттєво меншими одиниці, а на повторюваність числового значення коефіцієнтів і її блочний вигляд значний вплив має симетрія стосовно фаз. З іншого боку, якщо макромодель буде створена як повноцінна "чорна скринька" на підставі експериментальних даних за умови відсутності будь-якої інформації про досліджуваний об'єкт, то в разі застосування експертного аналізу для ідентифікації цього об'єкту, можна зробити висновок про його динамічність. Також слід зазначити, що наявність інформації про статичність чи динамічність моделі дозволяє оцінити можливість побудови суто лінійної макромоделі, чи показує необхідність доповнення лінійної моделі нелінійною вектор-функцією Φ .

Побудова дискретних макромоделей електротехнічних систем вимагає наявності масивів експериментальних даних, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання попередньо створеної моделі-прототипу досліджуваного об'єкту чи використання можливостей сучасних засобів реєстрації та пересилання інформації системами моніторингу режимів ОЕС України з використанням синхронізованих за часом вимірів, отриманих за допомогою глобальної системи позиціонування GPS, впроваджених у енергетичних компаніях України [131, 132]. Вибір кроку дискретизації обмежує застосовність наявних апріорних даних для побудови макромоделі, придатної для дослідження перехідних процесів певного виду. Саме тому, наприклад, для дослідження хвильових перехідних процесів не можна використати дані, крок реєстрації яких буде більшим від тривалості самого перехідного процесу. У такому разі необхідною буде побудова деталізованої математичної моделі за допомогою хвильових рівнянь, придатної для дослідження процесів такого виду й підбору масивів експериментальних даних. У разі надмірно малого кроку дискретизації може бути виконано прорідження експериментальних даних, побудова лінійної макромоделі для проріджених даних, подальший перехід за допомогою математичних перетворень до макромоделі, адекватної в часовій області з її наступним доповненням нелінійною макромоделлю.

Відповідно до теорії динамічних систем побудова дискретних макромоделей вигляду у вигляді “чорної скриньки” у формі дискретних рівнянь стану передбачає використання якомога більшої кількості режимів і процесів, притаманних досліджуваній системі [5]. У разі невідтворення певного режиму, масив експериментальних даних режиму, який не відтворюється, додається до апіорних даних, а модель підлягає додатковій оптимізації. Збільшення кількості даних зумовлює ускладнення оптимізаційної задачі. Ця проблема може бути вирішена побудовою макромоделі на основі режимів одного виду (наприклад, неробочого режиму чи короткого замикання). У цьому разі дослідник отримує масиви з частково граничними даними (струм неробочого режиму чи напруга під час короткого замикання), що дозволяє спростити початкову оптимізаційну задачу та розділити процедуру її побудови на етапи.

4.4. Аналіз інформації, отриманої на основі ідентифікації критичних режимів за перехідними характеристиками

Потреба в створенні математичних макромоделей електротехнічних систем як для моделювання перехідних процесів, так і прогнозування динамічних характеристик, як швидкоплинних, так і тривалих зумовлює необхідність створення алгоритму виявлення й ідентифікації критичних режимів за виглядом перехідних характеристик. Така інформація може бути базовою для побудови макромоделей.

Розвиток математичних і технічних засобів прогнозування й усунення аварійних ситуацій потребує створення апаратних і програмних комплексів керування й ідентифікації аварійних режимів на основі математичного моделювання й експертного аналізу. Їхнє проектування та налаштування ускладнюється розмаїттям можливих режимів, аварійних збурень, керівних впливів і місць їхнього прикладання. Розроблення оптимальних дій, адекватних до типу аварійного збурення з погляду функціонування системи, пов'язана з необхідністю оброблення великих обсягів інформації.

Усі технологічні порушення в електричних системах можна умовно розділити на три групи:

- порушення на електростанціях;
- порушення на підстанціях і в електричних мережах;
- порушення, які зумовлюють розлад енергосистеми в цілому.

Найважчими є системні аварії, а окремі від'єднання елементів, зазвичай, спричиняють перерозподіл потоків потужності за залишеними в роботі елементами без перерви електропостачання. До системних аварій належать аварії з порушенням стійкості й розділенням енергосистеми, які зумовлюють від'єднання споживачів із потужністю більше 5% від навантаження відокремленої частини, а також тривале функціонування енергосистеми з частотою, нижчою за встановлену межу. До системних аварій відносять також викликані стихійними явищами масові ушкодження ліній електропередавання, які спричиняють від'єднання споживачів загальною потужністю більш ніж 10 % від навантаження енергосистеми.

Для більшості системних аварій характерним є каскадний розвиток аварійних процесів. Аналіз аварій показує, що їх переростання в системні аварії, зазвичай, є наслідком низки факторів, які ускладнюють перебіг аварійних процесів, серед яких є хибні дії персоналу, зумовлені неадекватною ідентифікацією виду ушкоджень та способів їх усунення.

Значна швидкість перебігу перехідних процесів ускладнює їхню оперативну ідентифікацію. Типовими лавино аварійними процесами, які необхідно ідентифікувати за видом перехідних характеристик і показами вимірювальної апаратури є:

- лавина перевантаження та від'єднання ліній електропередавання;
- лавина асинхронних режимів, які виникають в умовах статичної стійкості, порушення динамічної стійкості в результаті аварійних збурень, несинхронного вмикання ліній електропередавання та генераторів чи втрати ними збудження;
- лавина частоти через дефіцит активної потужності, що може зумовити глибоке зниження чи підвищення частоти та виникнення недопустимого режиму електричної системи;

- лавини напруги (заниженої чи підвищеної), пов'язаних з порушенням балансу реактивної потужності.

За типом ушкоджень необхідно ідентифікувати:

- одно-, дво- чи трифазне короткі замикання;
- порушення симетрії в трифазній мережі;
- перехідні процеси, що виникають унаслідок складних видів пошкоджень;
- перехідні процеси, що виникають в особливих умовах експлуатації електроустаткування й складно піддаються аналізу через неможливість вимірювання параметрів процесу.

Протягом останніх років суттєві результати в розпізнаванні аварій і керуванню ними отримані на основі ситуативного керування й імітаційного моделювання зі застосуванням методів теорії розпізнавання образів і планування експериментів. Ідея досліджень полягає у тому, що основна маса первинної схемно-режимної інформації попередньо обробляється, а безпосередня інформація про аварію отримується за допомогою спеціальних алгоритмів з використанням даних про попередній нормальний режим і збурення. Успіх у розв'язанні таких задач багато в чому визначається репрезентативністю вибірки вхідних даних, яка повинна включати все розмаїття режимів, структури мережі, збурень, сигналів керування, що дозволить наблизити висновок про аварію до оптимального. Для цього необхідно вирішити такі задачі:

- 1) розпізнавання аварійної ситуації й її класифікація;
- 2) визначення місця усунення аварії;
- 3) визначення виду та параметрів засобів впливу.

Окремі означені вище задачі можуть бути розв'язані методами розпізнавання образів. У такому разі з тестової вибірки (відомі збурення, характер перехідного процесу й оцінка важкості аварійної ситуації) будується функція від вимірюваних параметрів режиму та збурення, яка відокремлює режими на безпечні та небезпечні. Модель теорії розпізнавання образів

дозволяє отримати підкласи небезпечних аварійних режимів, які відрізняються мірою їхньої важкості.

Здійснено узагальнення відомих методів виявлення й ідентифікації критичних режимів за видом перехідних характеристик, та створення на їхній основі узагальненого алгоритму їх розпізнавання.

Класифікацію режиму за перехідними характеристиками можна здійснювати на основі різних підходів. У першу чергу слід згадати системи релейного захисту, які фактично являють собою систему класифікації та реагування на критичні режими. З погляду теорії ці підходи базуються на принципі "білої скриньки", тобто на врахуванні внутрішньої структури модельованого об'єкта.

Кінцевою метою аналізу порушень нормального режиму є обчислення значень струму та напруги у вітках, вузлах, заданих точках ЕТС чи місці ушкодження, або взагалі швидкого виявлення факту його появи. Для формального аналізу має бути використана детальна модель системи для швидкого аналізу, чи створена спрощена модель системи для конкретного виду аварії, що потребує певних часових витрат.

На противагу такому підходу доцільно здійснювати класифікацію критичних режимів з використанням математичних макромоделей "вхід-вихід" у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану без аналізу внутрішньої структури модельованої системи. Така форма математичних співвідношень дозволяє оперативно використовувати зареєстровану сучасними апаратно-вимірювальними комплексами інформацію, яка може бути подана як у графічному вигляді, так і у вигляді масивів дискретних даних, що суттєво зменшує час на її оперативне оброблення.

Побудова алгоритму виявлення й ідентифікації критичних режимів здійснюється таким чином:

- формування даних про номінальний режим об'єкту (обсяг даних включав більшість допустимих режимів, які не вважаються критичними);
- формування даних про функціонування об'єкта в критичному режимі;

- побудова макромоделі, що добре відображає поведінку об'єкта в нормальному режимі, але не відображає критичні режими та її подальше використання. Тобто відтворення моделлю нормальних режимів є точним, а під час моделювання критичних режимів виникає значна похибка. Здебільшого для цього достатньо змоделювати нормальні режими. Погане відтворення критичних режимів є очікуваним, і достатньо здійснити перевірку неадекватного відтворення макромоделлю запропонованого (можливо, аварійного) режиму.

Тоді узагальненим критерієм функціонування об'єкта в критичному режимі можна вважати неточне відтворення його функціонування згаданою моделлю. За виглядом графічного відтворення можна зробити висновки про якісні та кількісні зміни напруги, швидкість перебігу перехідного процесу, зміни частоти чи наявність сторонніх коливань.

Застосування описаного підходу можна розширити, додавши до макромоделі під час її побудови різні критичні режими об'єкта. У такому разі можна не тільки виявити факт переходу об'єкта в критичний режим, а й також і визначити його вид. У певних випадках такий підхід дає можливість спрогнозувати виникнення аварійного режиму й запобігти аварії. Запропонований алгоритм аналізу використано для побудови математичної макромоделі підстанції.

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто процедуру одержання апріорної інформації про елементи електричних кіл і електротехнічних систем, методики її оцінювання та представлення й коректну систематизацію.
2. Розглянуто особливості застосування й основні властивості апаратно-програмних комплексів для отримання інформації з метою підготовки апріорних даних, що уможливорює вибір масивів експериментальних даних з метою побудови макромоделей ЕТС і їх елементів.
3. Описано методи експертного аналізу (методи експертних оцінок), види отримуваної інформації на його основі й аспекти їх застосування з погляду побудови макромоделей елементів електротехнічних систем.

4. Запропоновано застосовувати експертний аналіз у якості діагностичного засобу для визначення структури та форми макромоделі на основі оцінювання апріорної інформації (якісного характеру перехідних характеристик і їх числових значень), відомої про об'єкт, що може бути несистематизованою чи неповною.
5. 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.
6. Здійснено узагальнення методів виявлення й ідентифікації критичних режимів за видом перехідних характеристик і створення на їхній основі узагальненого алгоритму їх розпізнавання, що уможливорює ефективний вибір структури макромоделі на основі експертного аналізу.

РОЗДІЛ 5

ПОБУДОВА ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

5.1. Дискретна макромодель лінії електропередавання

Важливою й актуальною проблемою є удосконалення моделювання електротехнічних систем, що містять одно- та трифазні лінії електропередавання. Повітряні та кабельні лінії електропередавання є однією з важливих складових електротехнічних систем [198, 199]. Для побудови їх адекватних математичних моделей необхідно враховувати притаманні їм електромагнітні, механічні та теплові процеси. Забезпечення належного рівня адекватності дослідження режимів і процесів ЕТС вимагає розроблення нових моделей, які б відповідали реальному стану експлуатованого електроукомплектування з урахуванням як технічних особливостей їхніх складових, так і необхідності швидкого аналізу процесів на їх основі.

Відповідно до сучасних вимог моделі ліній електропередавання повинні враховувати вплив [157, 208, 219-221]:

- 1) електромагнітних процесів (стан електромагнітного поля навколо провідників, значення струмів і напруг лінії);
- 2) теплових процесів (зміна в часі температури провідників);
- 3) механічних процесів, а саме механічні напруження та коливання провідників, спричинені різними видами навантажень (ожеледь і вплив вітру на часові та просторові значення параметрів);

В основному, з метою аналізу динамічних режимів ліній електропередавання використовують два типи моделей у часовій області [163], а саме моделі зі зосередженими параметрами та розподіленими параметрами.

Моделі зі зосередженими параметрами створюються на підставі заступної Т- чи П-подібної схеми, значення параметрів яких розраховано на певній частоті. У такому разі за основу приймається повздовжня та поперечна симетрія опорів заступної схеми та вибирається кількість ланок схеми. Значення резистивних опорів таких схем розраховуються як залежність від

розміру поперечного перерізу та матеріалу провідника. Значення індуктивностей повітряних ліній залежить від відстані між проводами, їхнього діаметру та магнітних властивостей матеріалів, з яких вони виконані. Ємність ліній розраховують як залежність від діаметру провідників, відстані між провідниками та відстанню до землі. Цей тип моделей є придатним для розрахунку ustalених режимів, хоча він також може використовуватись для моделювання перехідних процесів в околі тієї частоти, для якої були визначені параметри моделі. Проте найбільш точними моделями для розрахунку перехідних процесів є ті, які враховують розподілені параметри та їхню частотну залежність. Прогрес у створенні математичних моделей елементів електротехнічних систем, орієнтованих на аналіз динамічних режимів і перехідних процесів, а також аварійних режимів для прогнозування функціонування електротехнічних систем зумовлює потребу побудови моделей елементів із розподіленими параметрами.

Хоча деякі ефективні моделі входять у бібліотеки найбільш широко використовуваних програм, тим не менше, нові зусилля спрямовуються на розроблення ефективніших моделей і їхню адаптацію до сучасних комп'ютерних програм.

Моделі з розподіленими параметрами поділяють на дві підгрупи: моделі зі сталими параметрами та моделі з частотозалежними параметрами [6, 167].

Самі математичні моделі ліній електропересилання формуються в методах:

- 1) біжучих хвиль (досліджуваний процес у визначеній точці лінії представляє собою суму хвиль, які досягають цього місця в різні моменти);
- 2) стоячих хвиль (шуканий в певному місці параметр процесу є сумою параметрів процесів усіх складових, які присутні в даний момент).

В усіх вище згаданих моделях ліній електропересилання використовують припущення про лінійність параметрів ліній, яке може бути застосованим якщо не враховується саяво, що є джерелом послаблення й спотворення коливань і перенапруг у повітряних лініях [157]. Вплив саява на обмеження комутаційних

перенапрут, а також їхнє математичне моделювання є складним і до кінця ще не вивченим явищем. Окрім цього розрахунок перехідних процесів ліній електропересилання ускладнюється наявністю поверхневого ефекту в провідниках, урахування якого зумовлює ускладнення математичної форми моделі.

Фізичне моделювання, чи альтернативне застосування підходу макромоделювання, дають змогу враховувати результати натурних експериментів і параметри ліній, які складно врахувати чи виміряти, можуть створити необхідні передумови для дослідження ліній електропересилання в повному обсязі та побудови їхніх адекватних математичних моделей. Розроблення моделей ліній електропересилання з високим ступенем адекватності за допомогою заступних схем зумовлює їхнє надмірне ускладнення, і, зазвичай, виникають суттєві труднощі під час їхньої адаптації до сучасних середовищ аналізу перехідних процесів. Якщо дослідника цікавить тільки реакція на полюсах елемента досліджуваної системи, то доцільним стає використання принципів макромоделювання, а саме створення макромоделей конкретних елементів замість їхніх точних математичних моделей, найкращими з яких себе показали макромоделі у вигляді “чорної скриньки” в формі змінних стану [116].

У зв'язку з вище описаними проблемами доцільно здійснити побудову макромоделі однофазної лінії електропересилання у вигляді “чорної скриньки” в формі змінних стану, яка математично описується співвідношенням (1.22):

Побудова макромоделі будь-якого динамічного об'єкта, а в даному разі – це довга лінія, здійснюється на основі набору експериментальних характеристик, які можна отримати шляхом математичного чи натурального експерименту.

Процедура побудови макромоделі лінії також передбачає виконання таких чотирьох етапів:

- 1) отримання перехідних характеристик об'єкта;
- 2) вибір форми макромоделі на основі експертного аналізу;

- 3) підбір коефіцієнтів макромоделі;
- 4) перевірка на незалежному тестовому сигналі, який не використовувався для побудови макромоделі.

У середовище MATLAB/Simulink вбудовані такі моделі лінії електропересилання [24, 41, 261]:

- 1) однофазна лінія у вигляді П-подібної заступної схеми з зосередженими параметрами,
- 2) трифазна лінія, яка утворюється послідовним сполученням П-подібних ланок,
- 3) багатофазна лінія з розподіленими параметрами та зосередженими втратами.

Моделі, створені у вигляді П-подібних заступних схем, є недостатньо адекватними для дослідження швидкоплинних перехідних процесів. Недоліком моделі багатофазної лінії з розподіленими параметрами є винесення зосереджених опорів за межі ділянок з розподіленими параметрами й неможливість врахування початкових умов, що зумовлює недоцільність їх використання як способу отримання апріорної інформації.

Також складним є отримання повного набору даних у всіх можливих режимах довгої лінії шляхом натурального експерименту, як з погляду його безпечного проведення, так і реєстрації даних. У зв'язку з цим у роботі для побудови макромоделі використано математичну модель лінії електропересилання в методі біжучих хвиль з урахуванням ненульових початкових умов [261]. Модель трифазної лінії електропересилання в $\alpha, \beta, 0$ складових зведена до трьох однофазних ліній електропересилання, в середовищі MATLAB/Simulink.

Модель лінії електропересилання має такий вигляд [6]:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 i; \quad (5.1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 u, \quad (5.2)$$

де u, i – відповідно фазні напруга та струм лінії; R, G – відповідно резистивний опір проводу та провідність між проводом і землею; L, C – відповідно індуктивність петлі "провід – земля" та ємність проводу на землю.

Диференційні рівняння лінії (5.2) записані в операторній формі за допомогою прямого перетворення Лапласа з урахуванням ненульових початкових умов мають вигляд

$$u_p - Z_c i_p = [u_k - Z_c i_k] e^{-\gamma l} + \int_0^l [CZ_c u(0, x) - Li(0, x)] e^{-\gamma x} dx; \quad (5.3)$$

$$u_k + Z_c i_k = [u_p + Z_c i_p] e^{-\gamma l} + \int_0^l [CZ_c u(0, x) + Li(0, x)] e^{-\gamma(l-x)} dx, \quad (5.4)$$

де $u_p = u_p(s, 0)$, $i_p = i_p(s, 0)$, $u_k = u_k(s, l)$, $i_k = i_k(s, l)$ – операторні зображення напруг і струмів початку й кінця лінії, $u(0, x), i(0, x)$ – напруга та струм у деякій точці лінії в $t=0$, L, C, Z_c, γ – індуктивність, ємність, хвильовий опір і коефіцієнт поширення електромагнітних хвиль лінії; l – довжина лінії. Якщо лінія без спотворень, то $\alpha = R/L = G/C$, відповідно $\gamma = \lambda(s + \alpha)$, де $\lambda = \sqrt{LC}$.

З фізичних міркувань приймаємо, що до вмикання лінії заряд проводів фаз розподілений рівномірно, тобто $u(0, x) = u(0, 0) = u(0) = const$, $i(0, x) = i(0) = 0$. У моделі, реалізованій у середовищі MATLAB/Simulink передбачено врахування ненульових початкових умов, що може забезпечити проведення повнофакторного експерименту для побудови макромоделі. У моделях ліній електропересилання, вбудованих у пакет прикладних інструментів SimPower Blockset така можливість відсутня.

У результаті перетворень отримуємо операторні рівняння напруг і струмів початку й кінця лінії:

$$u_p - Z_c i_p = (u_k - Z_c i_k) e^{-\gamma l} + (CZ_c u(0) - Li(0))(1 - e^{-\gamma l}) / \gamma; \quad (5.5)$$

$$u_p + Z_c i_p = (u_k + Z_c i_k) e^{-\gamma l} + (CZ_c u(0) + Li(0))(1 - e^{-\gamma l}) / \gamma. \quad (5.6)$$

Виконуємо зворотнє перетворення Лапласа й за допомогою теореми запізнення переходимо від зображень до оригіналів. У результаті отримаємо

математичну модель однофазної лінії електропересилання в такому вигляді:

$$u_p(t) - Z_c i_p(t) = (u_k(t - \tau) - Z_c i_k(t - \tau))e^{-\alpha\tau} + U(0)(1 - 1(t - \tau))e^{-\alpha t}, \quad (5.7)$$

$$u_k(t) + Z_c i_k(t) = (u_p(t - \tau) + Z_c i_p(t - \tau))e^{-\alpha\tau} + U(0)(1 - 1(t - \tau))e^{-\alpha t}, \quad (5.8)$$

де α - коефіцієнт загасання електромагнітних хвиль; τ – тривалість поширення електромагнітних хвиль вздовж лінії; $1(t - \tau)$ – одинична функція Гевісайда.

За допомогою моделі лінії у вигляді співвідношень (5.7) та (5.8), отримано масиви перехідних характеристик для побудови макромоделі однофазної лінії електропересилання у вигляді "чорної скриньки" в формі змінних стану.

Моделювання лінії здійснювалось як складової електричного кола, яке містило в своїй структурі рівняння елементів джерела живлення, досліджуваної довгої лінії та навантаження. У разі необхідності розширення набору сигналів під час побудови макромоделі, передбачено можливість тестування моделі лінії не тільки зі входу на вихід, але й з виходу на вхід. Це забезпечується можливістю введення додаткового джерела живлення в коло навантаження (рис. 5.1).

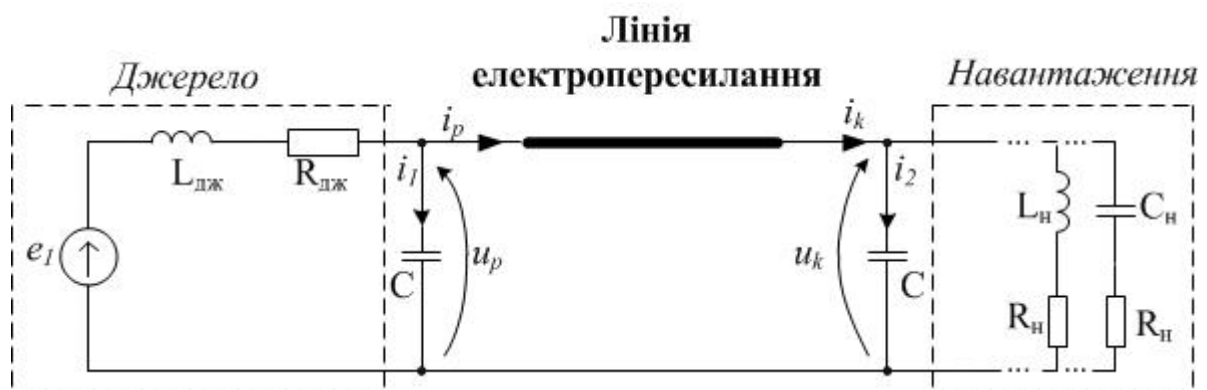


Рис. 5.1. Схема електричного кола для дослідження перехідних процесів лінії

Отримана система рівнянь довгої лінії (5.7, 5.8) доповнена рівняннями електричного кола, зображеного на рис. 5.1, реалізована в середовищі MATLAB/Simulink у вигляді інтегральних і скінчених рівнянь за допомогою структурних блоків математичного моделювання як окрема математична модель:

$$u_p = C_1^{-1} \int_0^t (i_1 - i_p) dt + u_p(0), \quad (5.9)$$

$$u_k = C_2^{-1} \int_0^t (i_k - i_2) dt + u_k(0), \quad (5.10)$$

$$i_1 = L_1^{-1} \int_0^t (E_1 - R_1 i_1 - u_p) dt + i_1(0), \quad (5.11)$$

$$i_2 = L_2^{-1} \int_0^t (u_k - R_2 i_2 - E_2) dt + i_2(0), \quad (5.12)$$

$$i_p(t) = Z_c^{-1} (u_p(t) - [u_k(t - \tau) - Z_c i_k(t - \tau)] e^{-\alpha \tau} - u(0) [1 - 1(t - \tau)] e^{-\alpha t}), \quad (5.13)$$

$$i_k(t) = Z_c^{-1} (-u_k(t) + [u_p(t - \tau) + Z_c i_p(t - \tau)] e^{-\alpha \tau} + u(0) [1 - 1(t - \tau)] e^{-\alpha t}). \quad (5.14)$$

На рис. 5. 2. наведено структурну схему дослідження електричного кола у вигляді "джерело живлення – лінія електропересилання - навантаження", яке за своїми структурними елементами відповідає схемі кола, зображеному на рис.5.1. Створена схема містить блоки елементів живлення (синусоїдної входної напруги Sine Wave та постійної напруги DC, блоків математичних операцій додавання, множення, інтегрування та множення на константу). Запізнювальні функції $1(t - \tau)$ введено в модель за допомогою блоків часових затримок Time Delay.

Параметри лінії (довжинні опір R_0 індуктивність L_0 , ємність C_0) і її довжину можна ввести з окремо винесених блоків, що дозволяє не перераховувати параметри моделі лінії, які фігурують у рівняннях (5.13) і (5.14). Для візуалізації результатів обчислень параметрів використано блоки Time Display. З метою візуалізації результатів використано осцилографи Scope, які дозволяють не тільки здійснювати візуалізацію кривих перехідних процесів, а й здійснювати записування даних у робочу область програми Workspace з наступною можливістю перенесення отриманих даних у текстові масиви чи імпорту в інші програмні засоби.

Отримана модель підлягала симулюванню за допомогою вбудованих

методів розв'язування систем диференціальних рівнянь зі змінним чи сталим кроком інтегрування. Важливим аспектом є вдалий вибір як початкового, так і максимального кроку інтегрування, який не повинен перевищувати сталу поширення електромагнітної хвилі від початку до кінця лінії. Найстійкішим методом із методів інтегрування виявився метод зі змінним кроком ode 15s.

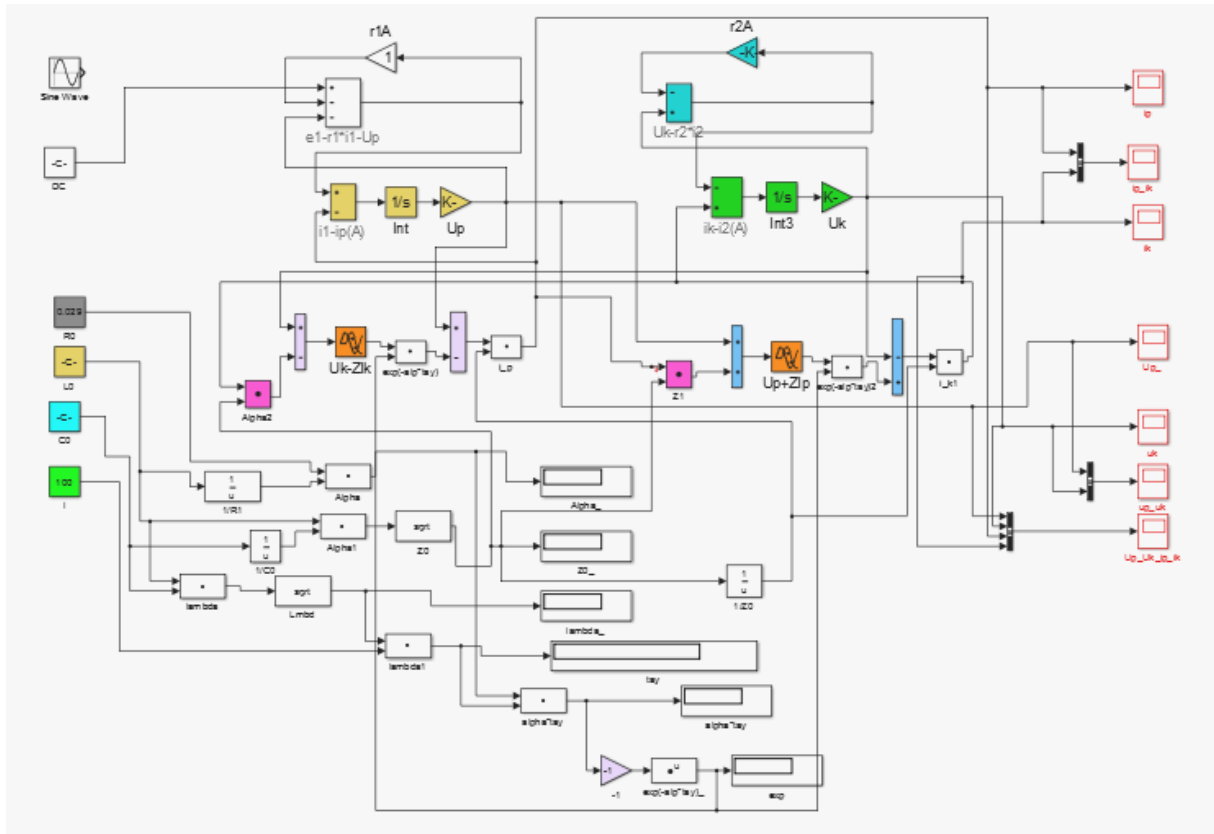


Рис. 5. 2. Структурна схема дослідження електричного кола "джерело живлення – лінія електропересилання – навантаження" в середовищі MATLAB/Simulink

На основі цієї структурної моделі, отримано вхідні дані, що використані для побудови макромоделі досліджуваної лінії з такими параметрами: $U_{nom}=220$ кВ, $l=100$ км, $L0=951,7$ мкГн/км, $C0=11.9$ нФ/км, $Z_c=282.8$ Ом. З цією метою досліджено перехідні процеси під час вмикання лінії на постійну напругу в навантаженому та неробочому режимах.

Приклад перехідного процесу під час вмикання лінії на постійну напругу, рівну номінальній з навантаженням $R2=3*Z_c$ з візуалізацією робочих вікон осцилографів Scope середовища Simulink наведено на рис. 5.3.

На основі перехідних характеристик, отриманих під час вмикання лінії у

неробочому режимі та під час функціонування з різним навантаженням ($R_2=Z_c$, $R_2=3*Z_c$, $R_2=Z_c/3$) створено математичну макромодель лінії електропересялення у вигляді “чорної скриньки” в формі змінних стану. Для її побудови розраховано декілька наборів перехідних характеристик (для заниженої, нормальної та завищеної вхідної напруги).

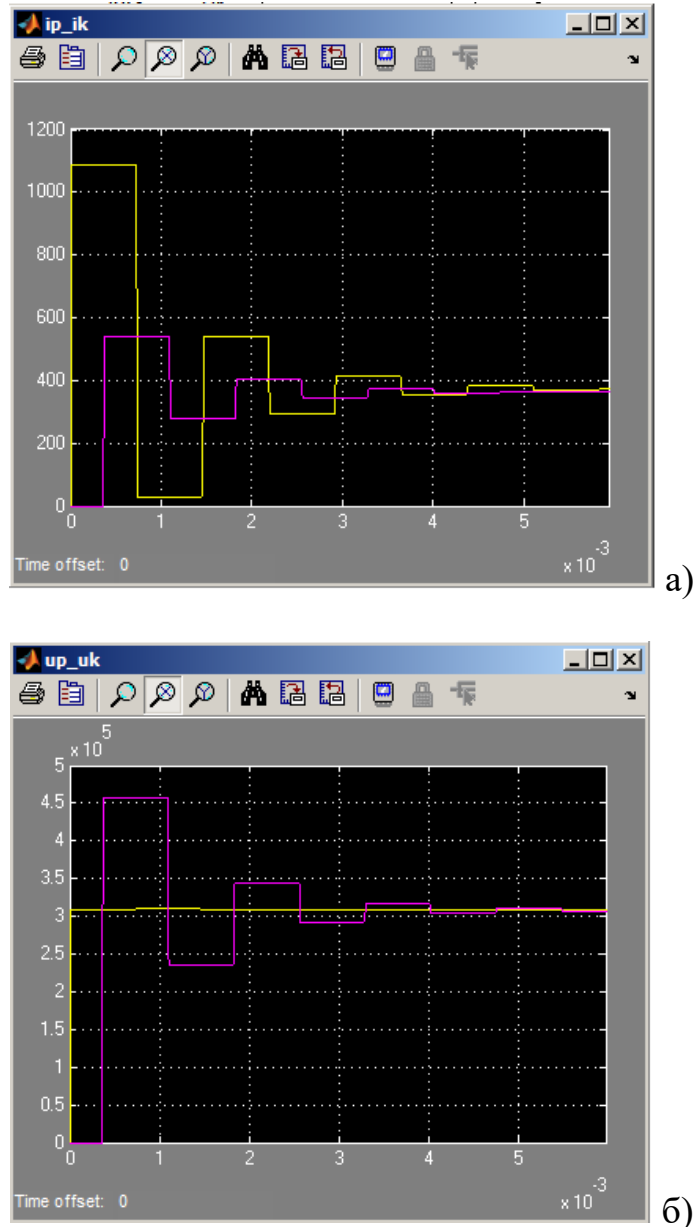


Рисунок 5.3. Струм (а) і напруга (б) на початку (жовтий) і в кінці (рожевий) лінії електропересялення

Оскільки під час моделювання лінії електропересялення для отримання експериментальних даних з метою побудови дискретної макромоделі здійснювалось за допомогою методів зі змінним кроком, виконувався перехід

до даних із сталим кроком шляхом інтегрування методом Ейлера, оскільки побудова дискретних макромоделей передбачає використання даних із сталим часовим кроком. У цьому випадку для побудови макромоделі використовувались дані з кроком дискретизації $t = 1 \cdot 10^{-5}$ с.

Вхідними величинами під час побудови макромоделі лінії вибрані напруга u_1 і струм i_2 , а вихідними – струм i_1 та напруга u_2 .

Практична побудова макромоделі виконана на основі оптимізаційного підходу за допомогою напрямного конуса Растрігіна з адаптацією параметрів пошуку [27, 51].

Основною проблемою, яка виникає під час моделювання довгої лінії є принципова неможливість її описання за допомогою простого електричного кола зі зосередженими параметрами. У зв'язку з цим для побудови макромоделі лінії на основі експертного аналізу вибрано таку математичну форму її описання [272]:

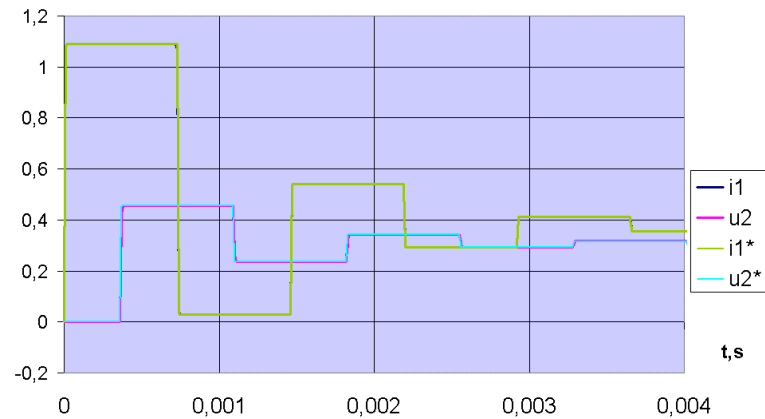
$$\begin{cases} \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}^{(k-m)} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{v}^{(k)} + \Phi(\mathbf{x}^{(k-m)}, \mathbf{v}^{(k)}) \\ \mathbf{y}^{(k+1)} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}^{(k-m)} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{v}^{(k+1)} \end{cases} \quad (5.15)$$

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

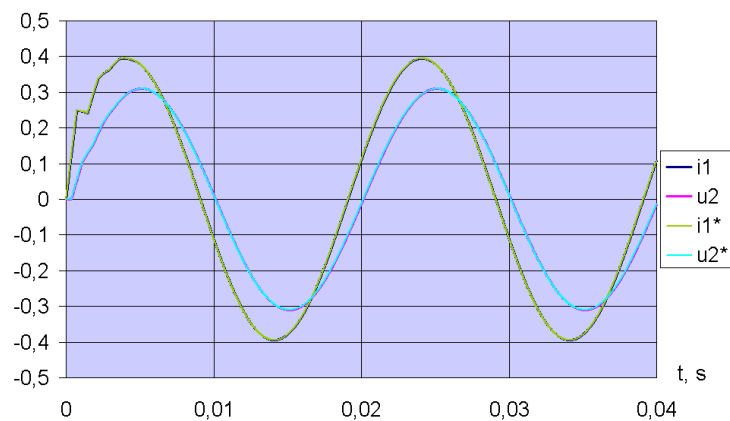
$$\begin{cases} \mathbf{x}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0.99 \\ -0.99 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}^{(k-35)} + \begin{pmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.2832 \end{pmatrix} \mathbf{v}^{(k)} \\ \mathbf{y}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} 0 & 6.999 \\ 1977 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}^{(k-35)} + \begin{pmatrix} 0.003535 & 0 \\ 0 & -282.5 \end{pmatrix} \mathbf{v}^{(k+1)} \end{cases} \quad (5.16)$$

Верифікацію отриманих результатів здійснено шляхом порівняння результатів моделювання лінії електропересилання на підставі її детальної моделі та макромоделі [271, 272]. На рис. 5.4 (а) зображено реакцію математичної моделі лінії та її макромоделі на вхідний постійний тестовий

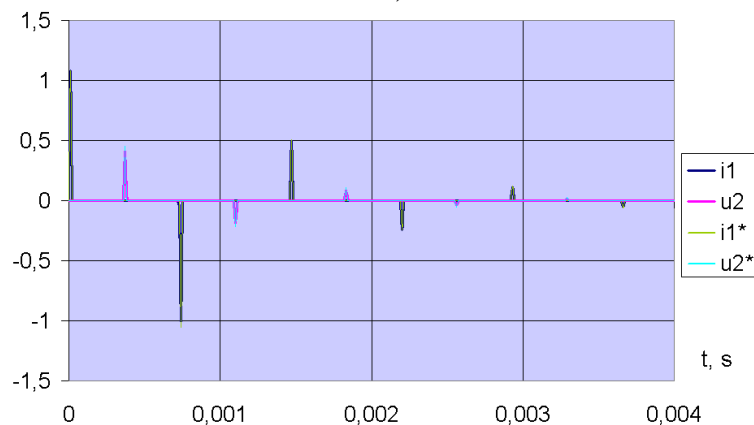
сигнал, на рис. 5.4. (б) – на вхідний синусоїдний сигнал, а на рис. 5.4. (с) – на імпульс вхідної напруги, рівний тривалості однієї дискрети. Зазначимо, що на графіках відтворені координати процесу зображені так – струми в кА, а напруги – в МВ.



а)



б)



с)

Рисунок 5.4. Реакція математичної моделі лінії та її макромоделі на вхідний сигнал різної форми: а) на вхідний постійний тестовий сигнал б) на вхідний синусоїдний сигнал; с) на імпульс вхідної напруги, рівний тривалості однієї дискрети

Для перевірки адекватності макромоделі здійснювалось її критеріальне оцінювання. Критерієм точності макромоделі є мінімізація функції мети $Q(\lambda)$, де λ - вектор невідомих коефіцієнтів, який включає елементи матриць F , G , C , D і коефіцієнти нелінійної функції Φ . Знайшовши мінімум функції Q знайдемо найкращий набір коефіцієнтів для вибраної форми моделі, а також мінімізуємо похибку. Функція мети обрано в такому вигляді:

$$Q(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_k |\mathbf{y} - \mathbf{y}^*|^2}, \quad Q(\lambda) = \sum_k |\mathbf{y} - \mathbf{y}^*|, \quad (5.17)$$

де \mathbf{y} - перехідні характеристики розраховані з допомогою макромоделі, а \mathbf{y}^* - перехідні характеристики реального об'єкта, отримані шляхом математичного чи натурального експерименту.

У табл. 5.1 наведена точність відтворення різних режимів лінії електропереєсилання за допомогою розробленої макромоделі. На основі отриманих результатів моделювання її динамічних режимів робимо висновок, що точність є задовільною для інженерних розрахунків.

Таблиця 5.1. Похибки макромоделі лінії електропереєсилання

Тип вхідного сигналу, прикладеного до лінії (E1)	Навантаження	Похибка
Імпульсний сигнал	$3Z_c$	6,3%
Постійна напруга	Z_c	0,4%
Постійна напруга	$3Z_c$	0,3%
Постійна напруга	100 кОм (неробочий режим)	10,4%
Синусоїдна напруга	Z_c	0,4%
Синусоїдна напруга	$Z_c/3$	1,3%
Синусоїдна напруга	$3Z_c$	0,1%
Синусоїдна напруга	100 кОм (неробочий режим)	0,9%

Моделі, що використовувалися для отримання вхідних даних, дають змогу досить точно відтворювати поведінку модельованих ліній, проте вимагають великих витрат машинного часу. Здійснено порівняння детальної математичної моделі лінії та макромоделі, зроблено висновки про

адекватність одержаних макромоделей.

Визначальною проблемою побудови макромоделі довгої лінії в формі змінних стану є принципова неможливість її описання за допомогою простого електричного кола зі зосередженими параметрами, що унеможлиблює використання класичного запису макромоделі в формі змінних стану. Проте завдяки незначній зміні форми її запису вдалось побудувати достатньо просту й адекватну макромоделю лінії електропересилання.

Таким чином, створено дискретну математичну макромоделю лінії електропересилання в формі змінних стану з високим ступенем адекватності. Доцільність побудови макромоделей ліній електропересилання є безсумнівною з урахуванням перспективи її подальшого використання в комп'ютерних засобах моделювання динамічних режимів ЕТС, оскільки вона дозволить суттєво зменшити витрати машинного часу під час їх використання як компонентів математичних моделей для аналізу складних електричних кіл.

5.2. Побудова дискретних макромоделей складних об'єктів на основі результатів оперативного контролю

Для побудови дискретних макромоделей елементів ЕТС, як згадувалось вище, необхідні експериментальні дані. Їх можна отримувати засобами оперативного контролю, зокрема апаратно-програмними комплексами різного функціонального призначення під загальною назвою "Регіна".

Одним із видів експериментальних даних, на основі яких можна здійснювати побудову макромоделей реальних електроенергетичних об'єктів є інформація про аварії. Застосування інформаційної технології синхронізованих вимірювань з використанням сигналів GPS відкриває принципово нові можливості для реєстрації динамічних характеристик ОЕС України та побудови макромоделей елементів, що експлуатуються саме в Україні з перспективою їх подальшої адаптації до відповідних програмних комплексів комп'ютерного моделювання режимів і процесів ЕЕС.

Використання макромоделей елементів і складових ЕТС у формі "вхід-вихід", створених на підставі реальних даних, отриманих під час натурних експериментів чи реєстрованих нормальних і аварійних режимів, відкриває перспективи моделювання ЕТС у реальному часі [106, 119, 133].

Математичні макромоделі як окремих елементів електроенергетичної системи, так і її складових (наприклад, окремих підстанцій) можуть бути створені на основі апріорної інформації у вигляді "чорної скриньки" в формі нелінійних дискретних рівнянь стану. Дискретна макромоделювання будь-якого об'єкта будується на основі дискретних значень сигналу (чи сигналів) на вході й виході об'єкту, які записані в текстовий файл. За допомогою методів оптимізації виконується вибір параметрів моделі. Далі графічні засоби програми дозволяють відтворити реакцію щойно побудованої макромоделі на вхідний сигнал і порівняти її зі вхідними масивами даних. Отримані криві й одержану модель можна зберегти у вигляді масивів текстових даних, придатних для оброблення в інших графічних редакторах чи математичних пакетах. Перевірка адекватності й ефективності створеної макромоделі проводиться на основі таких критеріїв, як точність, область і межі застосування, а також оцінювання машинних і часових ресурсів, необхідних для її побудови й апробації. Точність макромоделі може бути оцінена як відхилення результатів моделювання, отриманих на основі розробленої макромоделі, від тих, які використовувались для її побудови. Послідовність побудови макромоделей на основі тестових даних, отриманих на підставі систем моніторингу й оперативного контролю, описано у табл. 5.2.

Макромоделі, створені з використанням даних, отриманих у результаті натурального експерименту, дозволяють здійснювати розрахунок перехідних характеристик складних електроенергетичних систем і їхніх елементів без виконання їх повного і детального аналізу, особливо великовимірних систем. Також за допомогою макромоделювання можна здійснювати прогнозування параметрів ЕЕС, зокрема тривалого споживання електроенергії. Макромоделі дають змогу виконувати розрахунок перехідних процесів ЕЕС і їхніх

елементів як за умови їх самостійного використання, так і в складі бібліотек програмного забезпечення.

Таблиця 5.2. Послідовність побудови макромоделей на основі тестових даних

Етап	Зміст досліджень	Детальне описання етапу
1	Отримання масивів даних під час моніторингу режимів ЕТС у текстовій формі у вигляді масивів вхідних і вихідних даних.	Перевірка формату, вимірності даних, дискретності, достатності вхідних даних (наявність достатньої кількості тестових режимів для побудови макромоделі та її верифікації)
2	Формування масивів даних для побудови дискретних математичних макромоделей у вигляді “чорної скриньки”, наведеної нижче у формі змінних стану за допомогою рівняння (1.22).	Вибір форми макромоделі у вигляді “чорної скриньки” (лінійна, нелінійна); вибір структури векторів вхідних і вихідних величин з урахуванням можливості подальшої їх композиції з іншими моделями та макромоделями; визначення часу дискретизації для якісного відтворення процесу (прорідження даних за потребою); формування файлів у форматі вхідних даних для програмних засобів побудови макромоделей і їх подальшого відтворення (час, вхідна величина, вихідна величина)
3	Побудова дискретних макромоделей у формі змінних стану у вигляді “чорної скриньки”	Вибір оптимальної структури макромоделі, зменшення вимірності, пришвидшення процесу її побудови та покращення точності за рахунок вибору методів оптимізації для її побудови
4	Верифікація макромоделі на незалежному наборі перехідних характеристик	Додаткова оптимізація макромоделі в разі її недостатньої адекватності під час верифікації на незалежному наборі сигналів
5	Адаптація отриманої макромоделі до програм моделювання перехідних процесів (апаратно-програмного комплексу моніторингу режимів і процесів ЕТС)	Використання сучасного програмного забезпечення, в бібліотеки якого може бути вбудована створена макромоделі. Створення бібліотеки макромоделей об’єктів, експлуатованих в Україні.

Для підстанцій електроенергетичних систем характерною ознакою є значна кількість вхідних і вихідних величин, що зумовлює як складність самого

процесу ідентифікації параметрів макромоделі цього об'єкту, так і визначає необхідну для цього множину даних. Для підстанцій відсутні достатньо точні повні моделі, тому вхідні дані для побудови відповідних макромоделей отримано з протоколів аварій.

Ще однією особливістю, яку слід враховувати під час побудови макромоделей підстанцій є наявність у них систем захисту, які здійснюють комутації в аномальних ситуаціях. Адекватне відтворення поведінки засобів захисту за методом "чорної скриньки" з використанням експериментально отриманих перехідних процесів вимагає здійснення значної кількості складних експериментів. Оскільки в більшості практичних випадків достатньою буде макромодель, яка відтворює функціонування підстанції лише в нормальних режимах, то поведінка засобів захисту не відтворювалась. У нормальному режимі підстанції вплив динамічних її характеристик є незначним, і тому для побудови якісної макромоделі слід враховувати раптові зміни навантаження підстанції. Такі перехідні процеси є присутніми в протоколах аварій. Для побудови макромоделі скористаємося саме перехідними процесами, наявними в протоколах аварій, і відкинемо вплив дії систем захисту.

Ще одним аспектом, який зумовлює складність побудови макромоделей елементів ЕТС, є суттєвий взаємний вплив між різними входами відповідного багатополісника, який відображає модельований об'єкт. Тобто, якщо на одному з полюсів з'явилося збурення, то на всіх інших полюсах також буде спостерігатися значне реагування на нього. При цьому реакція на всіх полюсах здебільшого може бути різною. Під час побудови макромоделі такого об'єкту виходячи з принципу "чорної скриньки" стикаємося зі складною функцією мети, яка має усі можливі неприємні особливості, характерні для задач оптимізаційної побудови макромоделей, а саме: довгі та круті яри невідомої форми, локальні мінімуми тощо. Слід також згадати й про складність проведення експериментів на електроенергетичних об'єктах, яка здебільшого зумовлює те, що побудова макромоделі відбувається лише на основі фактично наявних даних. У такому разі не можна розраховувати на "чисті" перехідні

характеристики, в яких збурення подається лише на один з полюсів досліджуваного об'єкта. Такі дані містять здебільш одночасне збурення, прикладене на всіх полюсах. Крім того, для трифазного об'єкта, якими є елементи ЕЕС, було б добре також мати симетричні експерименти для кожної з фаз, а така інформація, зазвичай, відсутня. Також обчислювальна складність оптимізаційних алгоритмів різко зростає у разі зі збільшенням вимірності функції мети, тому найперспективнішим способом вирішення такої проблеми є зменшення кількості коефіцієнтів, що підлягають одночасній оптимізації. Інший шлях – покращення характеристик використовуваних оптимізаційних алгоритмів за умови значної вимірності оптимізаційної задачі з використанням методів її зменшення.

Розглянемо засоби у вигляді підходів, методів і алгоритмів, які можна застосувати для розв'язання комплексної проблеми оптимізаційної побудови макромоделей складних динамічних об'єктів, зокрема електротехнічних. Для зручності подальшого викладу будемо розглядати макромоделі в дискретній формі рівнянь стану(1.22).

Для трифазних елементів уведемо такі позначення:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \vec{v}_A \\ \vec{v}_B \\ \vec{v}_C \end{pmatrix}, \quad \vec{y} = \begin{pmatrix} \vec{y}_A \\ \vec{y}_B \\ \vec{y}_C \end{pmatrix}. \quad (5.18)$$

Тут вектори з індексами відображають відповідно всі вхідні й усі вихідні величини, що відповідають конкретним фазам.

Оскільки основні проблеми пов'язані зі значною кількістю коефіцієнтів моделі та зі складністю вибору відповідної функції мети, то найефективнішим буде розбиття процесу побудови макромоделі на етапи (рис. 2.1). Ураховуючи вже розроблені підходи для проведення такого розбиття [118, 121], але не обмежуючись ними, доцільно здійснити побудову проміжної моделі, симетричної щодо фаз.

Оскільки більшість досліджуваних електроенергетичних об'єктів є трифазними, і в певному наближенні будемо їх вважати симетричними щодо

фаз. Тобто характеристики об'єкта залишаються практично незмінними, якщо у виразах (5.18) зробити циклічну заміну змінних:

$$\tilde{\vec{v}} = \begin{pmatrix} \vec{v}_C \\ \vec{v}_A \\ \vec{v}_B \end{pmatrix}, \quad \tilde{\vec{y}} = \begin{pmatrix} \vec{y}_C \\ \vec{y}_A \\ \vec{y}_B \end{pmatrix} \quad \text{чи} \quad \tilde{\vec{v}} \approx \begin{pmatrix} \vec{v}_B \\ \vec{v}_C \\ \vec{v}_A \end{pmatrix}, \quad \tilde{\vec{y}} \approx \begin{pmatrix} \vec{y}_B \\ \vec{y}_C \\ \vec{y}_A \end{pmatrix}. \quad (5.19)$$

У такому разі ми можемо на проміжному етапі побудувати спрощену симетричну модель для однієї фази у вигляді:

$$\begin{cases} \vec{x}_A^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}_A^{(k)} + \mathbf{G}\vec{v}^{(k)} + \vec{\Phi}(\vec{x}_A^{(k)}, \vec{v}^{(k)}), \\ \vec{y}_A^{(k+1)} = \mathbf{C}\vec{x}_A^{(k+1)} + \mathbf{D}\vec{v}^{(k+1)}. \end{cases} \quad (5.20)$$

У вищенаведеному виразі слід відзначити відсутність індексу вектора вхідних величин \vec{v} . Це зумовлено тим фактом, що на конкретну вихідну величину можуть впливати збурення на всіх входах.

Модель (5.20) містить значно менше невідомих коефіцієнтів ніж загальна модель (1.22), тому її ідентифікація буде значно простішою. Крім того, для побудови цієї моделі можна тричі використати кожен з наявних перехідних процесів згідно з циклічною заміною змінних (5.19). Це дасть змогу зробити задачу побудови спрощеної симетричної моделі більш коректною, а сама модель не буде орієнтована на конкретну фазу, а буде відображати саме усереднені характеристики. У подальшому на основі проміжної моделі (5.20) можна побудувати й точніші моделі для кожної фази. Такий вид розбиття має багато спільного з розбиттям за вихідними змінними [118], проте має і суттєві відмінності. Перш за все, в розбитті за вихідними змінними передбачається розширення вектора вхідних величин шляхом додавання інших вихідних величин. У такому разі це мали б бути вектори \vec{y}_B і \vec{y}_C . Крім цього, розбиття за вихідними змінними не передбачає потрібного використання наявних перехідних процесів. Вказані особливості, що виникли внаслідок урахування трифазності модельованого об'єкта, роблять пропонований підхід дещо ефективнішим для побудови макромоделей такого виду.

Як і для більшості елементів, поведінка яких є близькою до лінійної хоча б на частині розглянутих режимів, для елементів ЕТС можна запропонувати розбиття процедури оптимізаційної побудови макромоделі на етапи з виділенням лінійної підмоделі. Суть полягає у побудові лінійної моделі модельованого об'єкта, а потім, на її основі, побудові уточненої нелінійної моделі. Для елементів ЕТС лінійний режим, чи близький до нього, є здебільшого номінальним, і тому такий вид розбиття є актуальним.

Найефективнішим і найскладнішим під час практичного застосування є використання експертного аналізу для вибору оптимальної форми моделі. Суть ідеї полягає в тому, що відмовляємося використовувати загальну форму запису макромоделі виду (1.22), а натомість робимо аналіз можливих взаємозв'язків між величинами в об'єкті моделювання, й на основі цього аналізу записуємо доцільнішу форму представлення конкретної макромоделі.

Зауважимо, що тут мова не йде про "білу скриньку", в якій побудова моделі здійснюється шляхом урахування всіх можливих процесів у досліджуваному об'єкті, а про "сіру скриньку", в якій використовується інформація про модельований об'єкт для звуження області пошуку. Таким чином відкидаються групи коефіцієнтів, не притаманні конкретному модельованому об'єкту. Це здійснюється шляхом вибору форми моделі на підставі основних закономірностей поведінки модельованого об'єкта, яка може містити розклади в ряд чи інші способи апроксимації потенційних нелінійних залежностей, проте є значно простішою за загальну форму (1.22).

Підкреслимо одну неочевидну закономірність: чим детальніший аналіз проводиться для вибору форми моделі, тим вона є простішою, оскільки відкидаються ті частини загальної форми, які нетипові для модельованого об'єкта. Саме в такому трактуванні доцільно виконувати вибір оптимальної форми моделі.

Незважаючи на складність оптимізаційної побудови математичних макромоделей елементів ЕТС, зумовлених значною кількістю вхідних і вихідних полюсів, і спричиненою цим високою вимірністю оптимізаційної

моделі, такі задачі успішно вирішуються з використанням підходів до розбиття процесу побудови макромоделі на етапи. Зокрема, використання підходу з побудовою проміжної моделі, симетричної щодо фаз, дозволило значно спростити побудову макромоделі енергоострова "Бурштин-Альбертірша", розглянутої нижче, на основі перехідних процесів, отриманих системою "Регіна". Зокрема, вдалося знизити обчислювальні витрати на побудову макромоделі з її вищою точністю.

Ще одним перспективним підходом до побудови макромоделей складних об'єктів на основі реєстрованих даних, зокрема елементів ЕТС і електричних кіл, є використання експертного аналізу для вибору оптимальної форми моделі, що дозволяє кардинально знизити обчислювальні витрати на їхню побудову, однак вимагає значної участі дослідника та знання основних закономірностей функціонування модельованого об'єкта [255].

5.3. Побудова макромоделі об'єкта ЕТС на основі тестових даних, отриманих системою моніторингу й оперативного контролю

Детальне представлення електротехнічної системи в повному обсязі не є ефективним і практично недоцільним способом розв'язання задачі комп'ютерного моделювання їхніх динамічних режимів з погляду складності обчислювальної задачі та необхідності застосування комп'ютерних засобів з великою швидкістю та можливістю паралельних обчислень [21, 23, 52, 81, 122]. У загальному лише відносно мала частина реальної системи потребує деталізованого моделювання в той час, коли решта електричних кіл складових елементів може бути представлена відповідною еквівалентною моделлю. Тим не менше, застосування відповідних еквівалентних схем із параметрами, визначеними для основної частоти на основі дослідів короткого замикання, може бути неадекватним для моделювання перехідних процесів у зв'язку з присутністю частотозалежних елементів. Ефективні еквівалентні моделі повинні відтворювати поведінку досліджуваного кола в широкому частотному діапазоні. Однак, за умови відсутності такої вимоги модель створюється для низькочастотних процесів.

Одним з прикладів побудови макромоделі складної ЕТС за принципом "чорної скриньки" взято енергоострів "Бурштин-Альбертірша" [133]. Цей об'єкт характеризується незначною кількістю вхідних і вихідних ліній, а саме: одна вхідна трифазна лінія й одна вихідна трифазна лінія. Таким чином, цей об'єкт можна розглядати як 6-полюсник.

На вказаному об'єкті за кілька окремо взятих років за допомогою системи "Регіна" зафіксовано декілька аварій, а саме:

- однофазне коротке замикання на лінії "Бурштин-Альбертірша" 22.07.2010 04:17;
- однофазне коротке замикання на лінії "Бурштин-Альбертірша" 18.05.2011 10:13;
- однофазне коротке замикання на лінії "Бурштин-Альбертірша" 05.12.2012 11:15 (2 спрацювання реєструвальної 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. Фрагмент даних з аварії 22.07.2010 наведено на рис. 5.4. Цифрами на рисунку позначено такі величини: 1- u_{a1} , 2- u_{b1} , 3- u_{c1} – напруги вхідної лінії 330 кВ; 4- i_{a1} , 5- i_{b1} , 6- i_{c1} – відповідні струми; 7- u_{a2} , 8- u_{b2} , 9- u_{c2} – напруги вихідної лінії 750 кВ; 10- i_{a2} , 11- i_{b2} , 12- i_{c2} – відповідні струми. Тут і надалі всі напруги подаються в мегавольтах, струми - в кілоамперах. Такий масштаб є зручним, оскільки в такому разі величини, подані на графіку, будуть одного порядку.

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 (1.22).

Вимірність вектора змінних стану 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. Зазвичай, ця функція буде залежати від коефіцієнтів макромоделі. Множина перехідних процесів, на основі яких розраховується функція мети, вважається сталою.

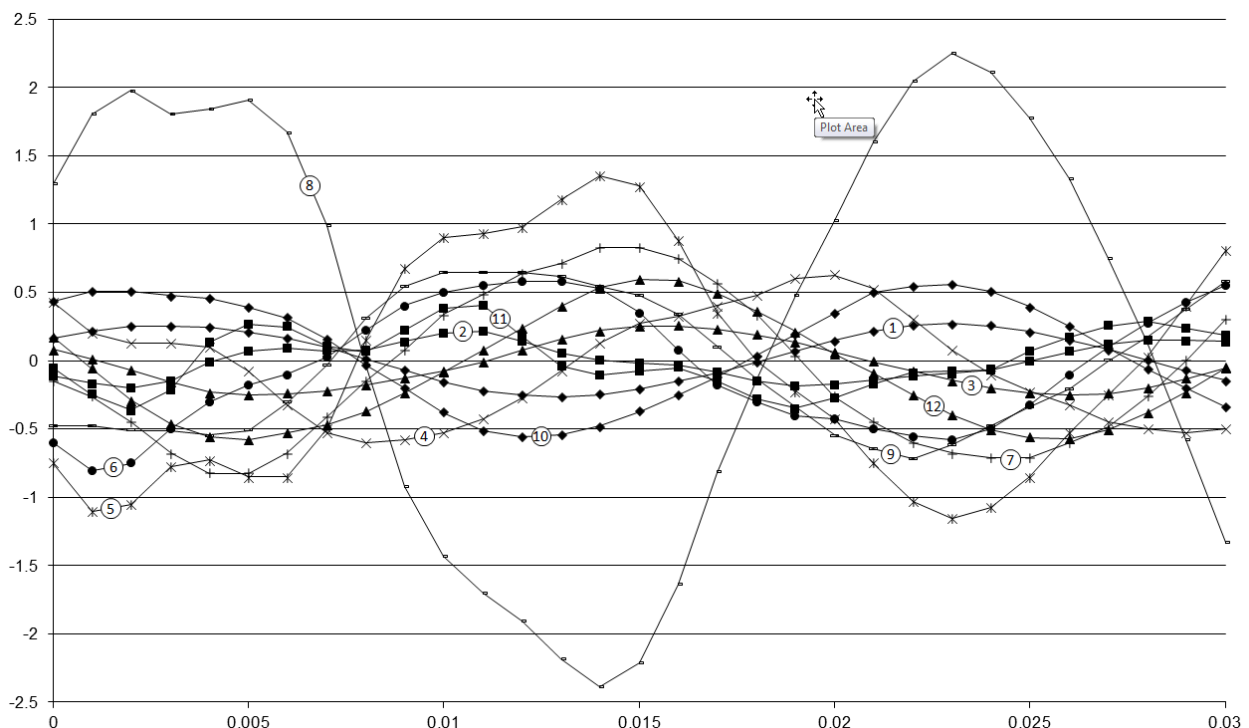


Рис. 5.4. Фрагмент даних аварії 22.07.2010 на підстанції енергоостова "Бурштин-Альбертірша"

За функцію мети обрано середньоквадратичне відхилення:

$$Q(\vec{\lambda}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |\bar{y}(t) - \tilde{y}(t)|^2 dt}, \quad (5.21)$$

де $\vec{\lambda}$ – вектор коефіцієнтів моделі, $\bar{y}(t)$ – експериментально виміряна реакція модельованого об'єкта; $\tilde{y}(t)$ – реакція об'єкта, розраховано за допомогою моделі. У разі дискретних моделей цей вираз буде мати такий вигляд:

$$Q(\vec{\lambda}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |\vec{y}_k - \vec{\bar{y}}_k|^2}, \quad (5.22)$$

де k - номер дискрети.

Вектор $\vec{\lambda}$ у разі дискретних рівнянь змінних стану (1.22) включає елементи матриць **F**, **G**, **C**, **D** і коефіцієнти нелінійної вектор-функції **Φ**.

Знайшовши точку, де згадана функція мети набуває мінімального значення, знаходимо оптимальний набір коефіцієнтів моделі для вибраної форми її представлення, використовуваних для побудови моделі перехідних процесів і критерію оцінювання точності моделі.

Такий підхід може застосовуватися для побудови макромоделей широкого класу об'єктів у практично будь-якій формі математичного представлення моделей за умови скінченності множини коефіцієнтів. Крім того, ідентифікація моделі може здійснюватися на основі довільної інформації про модельований об'єкт за умови, що вона достатньо повно його описує. Це дає змогу використовувати фактично наявні дані про модельований об'єкт і, таким чином, уникнути необхідності виконання складних експериментів. Крім того, використання оптимізації дозволяє також уникнути поганої зумовленості задачі ідентифікації коефіцієнтів моделі, що є проблемою для багатьох інших алгоритмів.

Оскільки об'єкт моделювання в першому наближенні можна вважати лінійним, то побудова макромоделі здійснювалася в 2 етапи:

На першому етапі будується лінійна модель у вигляді:

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(k)} + \mathbf{G}\vec{v}^{(k)}, \\ \vec{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(k+1)} + \mathbf{D}\vec{v}^{(k+1)}. \end{cases} \quad (5.23)$$

Для знаходження мінімуму функції мети використовувався алгоритм напрямного конуса Растрігіна з адаптацією довжини кроку пошуку та кута його розкриття [121], процедурою швидкого проходження пологих ділянок [10] і процедурою виходу з локальних мінімумів [51]. 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 (тобто зміна полярності вхідних величин зумовлює аналогічну зміну полярності вихідних величин). 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 Φ залежить лише від компонентів вектора змінних стану, тобто має такий вигляд:

$$\Phi_i(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}) = \sum_{j,k,l} \alpha_{ijkl} \vec{x}_j^{(k)} \vec{x}_k^{(k)} \vec{x}_l^{(k)}. \quad (5.24)$$

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 моделі наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Параметри лінійної та нелінійної макромоделей енергоострова

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

Той факт, що введення нелінійних коефіцієнтів не дозволило значно покращити точність отриманої моделі свідчить, що вплив нелінійностей є незначним. Якщо об'єкт моделювання вважати лінійним, а дані про перехідні процеси, зареєстровані системою "Регіна", є достатньо точними, 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%.

Причини тут можуть бути такі:

1) об'єкт моделювання має вищий порядок. Для отримання точнішої моделі в такому разі слід збільшити її вимірність, тобто кількість елементів 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.) й для інших двох аварій (пара аварій 05.12.2012 р.), то кожна з моделей уже в лінійному варіанті описує процеси з точністю дещо кращою за 4% (табл. 5.4). Надалі ці моделі будемо називати моделями №1 і №2 відповідно.

Таким чином, спроби побудови макромоделі енергоострова за принципом "чорної скриньки" на підставі даних про аварії, записаних системою "Регіна", свідчать, що характеристики цього об'єкта дещо змінилися між 18.05.2011 р. і 05.12.2012 р.

Таблиця 5.4. 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 для першої пари аварій (№1)	3,1%	3,6%	3,4%
Модель для другої пари аварій (№2)	2,5%	2,3%	2,4%

Коефіцієнти отриманих моделей наведені в табл. 5.5 і табл. 5.6. Порівняння результатів моделювання перехідного процесу на підставі створеної макромоделі з експериментальними даними наведено на рис. 5.5, 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.

Моделювання здійснювалося з використанням моделі №1, оскільки цей фрагмент стосується першої аварії.

Завдяки використанню оригінального методу побудови дискретних динамічних моделей, який базується на концепції “чорної скриньки” й використовує оптимізаційний підхід, удалося побудувати досить точні макромоделі для перехідних процесів, що виникають на цьому об’єкті.

Таблиця 5.5. Коефіцієнти отриманих моделей

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

Коеф.	Значення	
	Модель №1	Модель №2
G _{0,0}	-0.6303	-0.6641
G _{0,1}	-0.9152	0.1243
G _{0,2}	-0.5153	-0.0150
G _{0,3}	0.0082	0.1470
G _{0,4}	0.3746	0.1960
G _{0,5}	-0.1210	0.0210
G _{1,0}	0.5931	0.6204
G _{1,1}	-0.0904	-0.0387
G _{1,2}	-0.4358	-0.2059
G _{1,3}	0.7342	-0.5870
G _{1,4}	0.0113	-0.7911
G _{1,5}	-0.9409	-0.2528
G _{2,0}	0.1531	0.2979
G _{2,1}	0.4880	0.6987
G _{2,2}	0.2154	0.1688
G _{2,3}	0.6686	-0.6455
G _{2,4}	-0.2102	-0.7818
G _{2,5}	-0.8952	-0.2125

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

Таблиця 5.6. Коефіцієнти отриманих моделей

Коеф.	Значення	
	Модель №1	Модель №2
D _{0,0}	-1.4226	-0.6042
D _{0,1}	0.1589	-0.7468
D _{0,2}	1.4324	-0.2333
D _{0,3}	-1.1113	-0.8670
D _{0,4}	0.1396	-0.2982
D _{0,5}	0.0271	0.4050
D _{1,0}	3.8372	2.6931
D _{1,1}	0.5551	-0.6937
D _{1,2}	-2.4920	0.4709
D _{1,3}	0.2554	-0.2266
D _{1,4}	-0.9336	-0.3331
D _{1,5}	0.3626	0.1269
D _{2,0}	-1.0275	-1.2123
D _{2,1}	0.0288	1.8366
D _{2,2}	0.8195	0.4223
D _{2,3}	0.2883	0.6755
D _{2,4}	0.5596	-0.0612
D _{2,5}	-1.3262	-0.8220
D _{3,0}	1.8318	2.5689
D _{3,1}	-0.1625	0.4264
D _{3,2}	0.2021	0.1967
D _{3,3}	-0.1464	-0.0493
D _{3,4}	-0.1032	0.1644
D _{3,5}	-0.0123	0.0952
D _{4,0}	-0.3732	-0.2519
D _{4,1}	0.9198	1.6871
D _{4,2}	-0.4167	-0.1938
D _{4,3}	-0.1805	-0.0906
D _{4,4}	-0.6381	0.1047
D _{4,5}	0.1452	-0.0738
D _{5,0}	-0.1962	-0.5939
D _{5,1}	0.0412	-0.3246
D _{5,2}	2.4215	1.1107
D _{5,3}	0.0923	-0.0555
D _{5,4}	-0.1694	0.0831
D _{5,5}	-0.1147	0.0356

Апріорною інформацією для побудови зазначених макромоделей стали дані щодо перехідних процесів, зумовлених аваріями й зафіксовані системою “Регіна”.

Побудовані дві макромоделі на основі даних, зафіксованих у різні періоди часу (18.05.2011р і 05.12.2012р.), які дещо відрізняються між собою, що можна пояснити можливими змінами в структурі ЕЕС протягом півторарічного періоду.

Верифікація побудованих макромоделей здійснювалася шляхом порівняння кривих перехідних процесів розрахованих шляхом моделювання й реальних перехідних процесів, зафіксованих у інших аварійних ситуаціях.

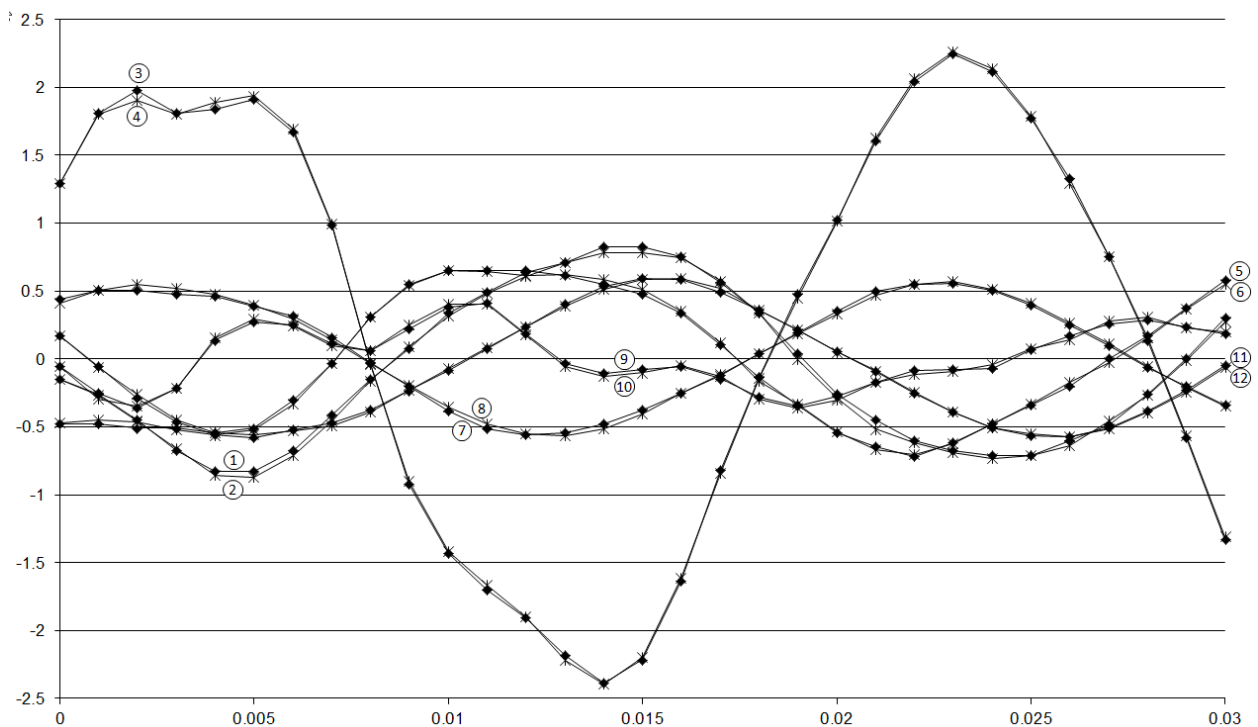


Рис. 5. 5. Порівняння результатів моделювання перехідного процесу енергоострова на підставі створеної макромоделі з реєстрованими даними

Запропонована макромоделі енергоострова, а також інших об’єктів ЕТС, створених на підставі розробленого алгоритму побудови макромоделей, може використовуватись для тестування відповідних систем під час їхньої експлуатації, а також дозволяє швидко моделювати можливі аварійні ситуації та здійснювати їхню ідентифікацію.

Пропоновані макромоделі можуть бути корисними під час схемотехнічного проектування як складові бібліотек математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем наукових досліджень, що дозволить оцінити наслідки можливих аварійних ситуацій. Застосування макромоделей об'єктів ЕЕС, створених з використанням перехідних характеристик, отриманих з реєструвальних комплексів, зокрема «Регіна», дозволить пришвидшити й покращити ефективність дослідження перехідних процесів і прогнозування аварійних режимів об'єктів ЕЕС.

Висновки до розділу 5

1. Уперше розроблено дискретну макромодель лінії електропередавання у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану на підставі результатів комп'ютерного експерименту. Запропонований підхід дозволяє урахувати характеристики елементів із розподіленими параметрами та особливості процесів, які не завжди піддаються аналітичним розрахункам чи експериментальному визначенню їхніх числових значень.

2. Уперше розроблено дискретну макромодель енергоострова у вигляді "чорної скриньки" в формі дискретних рівнянь стану на підставі результатів моніторингу стану реальної ЕЕС з використанням апаратно-програмного комплексу "Регіна". Розроблена макромодель дозволяє описати складну електротехнічну систему з великою кількістю елементів з урахуванням всіх параметрів і процесів, що є утрудненим у разі поелементного описання системи під час побудови її математичної моделі та подальшої комп'ютерної реалізації.

3. Адекватність отриманих результатів аналізу динамічних режимів лінії електропередавання й енергоострова підтверджують можливість використання макромодельовання електричних кіл і ЕТС, поданих у формі "вхід-вихід", як ефективного методу їх дослідження.

РОЗДІЛ 6

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ І НАЯВНИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

6.1. Адаптація дискретних макромоделей до комп'ютерних середовищ моделювання перехідних процесів

Математичне та комп'ютерне моделювання ЕТС, які містять системи керування чи елементи силової електроніки в своїй структурі, є важливим етапом під час створення та верифікації моделей електротехнічних систем. З розвитком сучасних програмних засобів, деталізовані моделі електроенергетичних, електромеханічних і електронних елементів можуть бути вбудовані в бібліотеки наявних комп'ютерних програм і цифрових симуляторів, призначених для дослідження перехідних процесів. Для комп'ютерного моделювання процесів електротехнічних систем використовується низка програмних пакетів, а саме: ЕМТР (ЕМТР/АТР, MicroTran, PSCAD/EMTDC), EUROSTAG, Regime тощо), й одна з найпотужніших універсальних систем – MATLAB у комбінації з програмою візуального імітаційного та математичного моделювання Simulink.

Використання деталізованих моделей часто зумовлює значне збільшення витрат комп'ютерного часу, що, в свою чергу, обмежує обсяг системи, яку можна практично змоделювати за допомогою ЕОМ через обмеження на кількість елементів у її структурі. Тому важливо та доцільно розробити моделі (макромоделі) складних ЕТС, починаючи з менших підсистем (чи окремих елементів), які можуть бути введені в їхню структуру. Під час побудови моделі складної системи нами пропонується поєднувати детальні математичні моделі окремих елементів ЕТС з макромоделями їхніх складових частин.

На підставі наведених вище міркувань нами запропонована узагальнена альтернативна процедура створення макромоделей елементів ЕТС і їхніх груп за єдиним універсальним алгоритмом ідентифікації (розд. 2.5) та розглянута

необхідність їхньої адаптації до доступних комп'ютерних засобів математичного моделювання їхніх перехідних процесів.

Пропонується створювати макромоделі елементів у вигляді системи різницевих рівнянь у формі Коші, сформованих на підставі методів ідентифікації лінійних і нелінійних моделей динамічних систем [246, 257]. Узагальнена дискретна математична модель, яка описує динамічні процеси багатополюсника, сформована на основі рівняння (1.22) має такий вигляд:

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{x}}^{(k)} + \mathbf{G} \cdot \vec{\mathbf{v}}^{(k)} + \Phi(\mathbf{x}^{(k)}, \vec{\mathbf{v}}^{(k)}), \\ \vec{\mathbf{y}}^{(k+1)} = \mathbf{C} \cdot \vec{\mathbf{x}}^{(k+1)}, \end{cases} \quad (6.1)$$

де індекси в дужках, визначають номер дискрети відповідної змінної (наприклад, $\vec{\mathbf{x}}^{(k)} = \vec{\mathbf{x}}(t)$, де $t = kh$, h – крок дискретизації). Тут, відповідно $\vec{\mathbf{v}}^{(k)}, \vec{\mathbf{y}}^{(k)}$ – дискретні значення компонентів векторів вхідних і вихідних змінних багатополюсника, $\vec{\mathbf{x}}^{(k)}$ – вектор змінних стану, $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}$ – матриці відповідних розмірів, $\Phi(\vec{\mathbf{x}}^{(k)}, \vec{\mathbf{v}}^{(k)})$ – деяка вектор–функція багатьох змінних.

Такий підхід дозволяє отримувати макромоделі мінімального порядку, які забезпечують бажану адекватність описання динамічних характеристик елемента у визначеному класі сигналів. Оскільки наявні системи моделювання та симулювання перехідних процесів не оперують дискретними відліками електричних сигналів, то, відповідно існує потреба заміни дискретних макромоделей на неперервні.

Оскільки $\vec{\mathbf{x}}^{(k)} = \vec{\mathbf{x}}(t)$, де $t = kh$, а h – крок дискретизації, то використовуючи метод Ейлера [245] можна записати, що

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x(kh + h) - x(kh)}{h}. \quad (6.2)$$

Тоді

$$x(kh + h) = x^{(k+1)}, \text{ а } x(kh) = x^{(k)}. \quad (6.3)$$

Таким чином

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x^{(k+1)} - x^{(k)}}{h}. \quad (6.4)$$

Отже рівняння (6.2) можна перетворити до вигляду

$$\begin{cases} \frac{\bar{\mathbf{x}}^{(k+1)} - \bar{\mathbf{x}}^{(k)}}{h} = \frac{1}{h} (\mathbf{F}\bar{\mathbf{x}}^{(k)} + \mathbf{G}\bar{\mathbf{v}}^{(k)} + \Phi(\bar{\mathbf{x}}^{(k)}, \bar{\mathbf{v}}^{(k)}) - \bar{\mathbf{x}}^{(k)}), \\ \bar{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{C}\bar{\mathbf{x}}(t) \end{cases} \quad (6.5)$$

чи в диференційній формі

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\mathbf{x}}}{dt} = h^{-1} ((\mathbf{F} - \mathbf{E})\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{G}\bar{\mathbf{v}} + \Phi(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{v}}), \\ \bar{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{C}\bar{\mathbf{x}}(t), \end{cases} \quad (6.6)$$

де $\bar{\mathbf{x}}(t)$, $\bar{\mathbf{v}}(t)$, $\bar{\mathbf{y}}(t)$, а \mathbf{E} - одинична діагональна матриця.

Зауважимо, що вибір для переходу від дискретного рівняння стану до неперервного з використання методу Ейлера в загальному не є обов'язковим, однак для такої форми запису рівнянь цей метод є найзручнішим. При цьому властиві йому недоліки можна усунути вдалим вибором кроку дискретизації.

Для того, щоб можна було використовувати макромоделі в формі змінних стану у вигляді “чорної скриньки” в програмах типу АТР необхідно додатково створити модуль зв'язку рівнянь макромоделі з модулем формування цифрової математичної моделі заступної схеми електротехнічної системи. Дискретні макромоделі елементів ЕТС для аналізу процесів (неперервні рівняння у вигляді змінних стану) в середовищі програми АТР можуть бути відображені за допомогою заступної схеми, складеної з типових ідеальних елементів бібліотеки електричних кіл і застосуванням діакоптичного підходу. Перший метод передбачає схемну інтерпретацію неперервного рівняння стану за допомогою засобів, наявних у програмі (керовані джерела струмів і напруг, керовані резистори та вимикачі).

Інший шлях для реалізації дискретних макромоделей у програмі АТР полягає у використанні діакоптичного підходу [277], який у певній мірі реалізовано в цьому програмному середовищі. Він полягає у незалежному інтегруванні окремих частин аналізованої схеми (зокрема окремих елементів, описаних дискретними макромоделями) з подальшим узгодженням отриманих розв'язків.

У середовищі MATLAB/Simulink наявний спеціалізований пакет System Identification Toolbox, призначений для аналізу й ідентифікації систем. За допомогою цього пакету можна побудувати модель лінійного стаціонарного динамічного об'єкта в формі змінних стану на основі наявних масивів реакцій “вхід-вихід” досліджуваного об'єкта як для неперервного, так і дискретного часу. У загальному оцінювання параметрів моделі заданої структури здійснюється шляхом мінімізації вибраного критерію якості моделі (зазвичай, це середньоквадратичне відхилення реакцій виходів досліджуваного об'єкта та його моделі). Створена модель може бути збережена в робочій області системи MATLAB і надалі використана.

Оскільки практично всі об'єкти ЕТС мають нелінійну природу, значну складність, і, відповідно, велику вимірність, необхідно створювати нелінійні макромоделі їхніх об'єктів у вигляді “чорної скриньки” в формі змінних стану й вводити їх як окремі моделі у власну бібліотеку макромоделей елементів за допомогою програмних засобів Simulink, які дозволяють застосовувати математичні макромоделі як в дискретній, так і в неперервній формі. Композицію макромоделей окремих елементів з традиційною математичною моделлю ЕТС доцільно здійснювати за допомогою рівнянь ємнісних перетинів.

У середовищі Simulink дискретну макромодель можна безпосередньо сформулювати за допомогою підмоделі Subsystem шляхом програмування математичних виразів, відповідних до структури нелінійної макромоделі.

Таким чином, сумісне використання математичних моделей і макромоделей окремих елементів ЕТС чи їхніх складових може суттєво збільшити вимірність системи, яка підлягає моделюванню. З іншого боку, введення макромоделей у структуру загальної моделі досліджуваної системи може пришвидшити процес розрахунку саме завдяки незначній вимірності макромоделей. Такий напрям досліджень є перспективним щодо його використання до моделювання складних об'єктів у реальному часі чи необхідності створення альтернативного шляху паралельному моделюванню режимів і процесів динамічних об'єктів [52, 122, 243].

6.2. Особливості адаптації макромоделей елементів електротехнічних систем до середовища MATLAB/Simulink та їх реалізація

Блок моделі динамічного об'єкта Discrete State-Space призначений для створення динамічного об'єкта, що описується рівняннями в просторі станів [216, 286]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(n+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(n) + \mathbf{B}\mathbf{u}(n), \\ \mathbf{y}(n) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(n) + \mathbf{D}\mathbf{u}(n), \end{aligned} \quad (6.7)$$

де \mathbf{x} – вектор стану; \mathbf{u} – вектор вхідних впливів; \mathbf{y} – вектор вихідних сигналів; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} – відповідно матриці системи, входу, виходу й обходу; n – номер кроку моделювання.

Вимірність матриць показана на рис. 6.1 (n – кількість змінних стану, m – кількість вхідних сигналів, r – кількість вихідних сигналів).

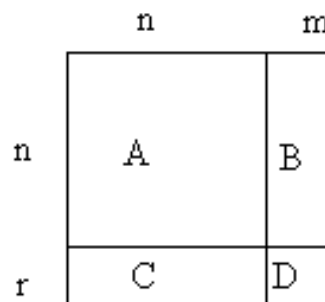


Рис. 6. 1. Вимірність матриць блоку Discrete State-Space

Проте, використання блоку моделі динамічного об'єкта Discrete State-Space для створення нелінійних об'єктів є непридатним. Тому для адаптації макромоделей об'єктів електротехнічних систем до середовища Matlab/Simulink необхідно використати технологію S-функцій [286].

Simulink-функції (S-функції, S-functions) є описанням блоку на одній з мов програмування: MATLAB, C, C++, Ada, чи Fortran. За їх допомогою можна створити блок необхідної нам макромоделі об'єкта й під'єднати його до Simulink-моделі. Блок на основі S-функції не відрізнятиметься від стандартного бібліотечного блоку Simulink. Створені блоки є дискретними S-функціями й компілюються у виконувани (*.dll) файли, за рахунок цього забезпечується

підвищена швидкість програмної реалізації моделей та подальше симулювання на їх основі.

Блок S-function під'єднується до моделі Simulink за допомогою бібліотечного блоку S-function (бібліотека Functions&Tables).

Параметрами блоку є:

- 1) S-function name – ім'я S-функції. Ім'я S-функції не повинно збігатися з іменем моделі (mdl-файлу);
- 2) S-function parameters – параметри S-функції, які передаються в неї через вікно діалогу. Параметри записуються у вікні діалогу в такому ж порядку, як і в заголовку S-функції;
- 3) Simulink-блок однозначно описується наборами вхідних змінних \mathbf{u} , змінних стану \mathbf{x} і вихідних змінних \mathbf{y} (Рис. 6.2).



Рис. 6.2. Загальний вигляд Simulink-блоку

Блок S-function в математичній формі можна в загальному вигляді описати такими рівняннями:

$$\mathbf{y} = f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \text{ – вихід;}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_c = f_d(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \text{ – похідні неперервних змінних стану;}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{d_{k+1}} = f_u(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \text{ – дискретні змінні стану,}$$

$$\text{де } \mathbf{x} = \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_d.$$

Для того щоб створити S-функцію правильно, необхідно володіти основними поняттями, які використовуються в технології створення S-функцій, а саме:

- 1) Direct feedthrough – Прямий прохід. Прохід вхідних сигналів на вихід. Прямий прохід реалізується в S-функції, якщо у виразах для вихідних змінних присутні вхідні змінні, чи під час розрахунку часу наступного спрацювання

блоку. Встановлення правильного значення параметра Direct feedthrough важливе, оскільки саме з його допомогою Simulink визначає наявність у моделі замкнених алгебричних контурів.

2) Dynamically sized inputs – динамічна вимірність входів. S-функція може бути створена таким чином, щоб забезпечити довільну вимірність векторів вхідних і вихідних змінних, а також векторів стану дискретної системи. У цьому разі фактична вимірність змінних визначається на початку процесу моделювання й встановлюється еквівалентною вимірності вхідних сигналів. Для того, щоб задати динамічну вимірність будь-якої змінної, треба задати значення вимірності для цієї змінної таким чином, що вона дорівнювала -1 (мінус один) у відповідному полі структури **sizes** (шаблон S-функції).

3) Setting sample times and offsets – встановлення кроків модельного часу та зміщень.

S-функція може задавати час спрацювання достатньо гнучко. Simulink забезпечує такі варіанти задання кроку модельного часу:

1. Continuous sample time – неперервний модельний час. Задається для систем, які мають неперервні змінні стану.
2. Continuous but fixed in minor time step sample time – неперервний модельний час з фіксованим кроком у внутрішньому циклі.
3. Discrete sample time – дискретний модельний час. Задається для дискретної системи. Користувач повинен задати крок модельного часу sample time і зміщення offset, щоб визначити моменти часу, в які Simulink повинен викликати на виконання даний блок.
4. Variable sample time – дискретний змінний крок розрахунку. Модельний час дискретний, але інтервали часу між спрацюваннями блоку можуть бути різними. На початку кожного кроку моделювання S-функція повинна визначити значення часу наступного спрацювання. Для цього використовується метод mdlGetTimeOfNextVarHit.
5. Inherited sample time – успадкований крок розрахунку. Параметр sample time може бути успадкований від попереднього чи наступного

блоку.

Найпростіший і швидкий шлях створення S-функції – це написання її на мові MATLAB з використанням файла-шаблону. У разі нелінійних макромоделей елементів електротехнічних систем характер цих нелінійностей слід описати математично в підпрограмах mdlUpdate і mdlOutputs, які викликаються з S-function. Тобто, мова йде про введення нелінійної функції $\Phi(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{u}^{(k)})$ відповідно до запису дискретної макромоделі у вигляді (1.22).

Описані способи безпосереднього формування дискретних макромоделей у середовищі Simulink за допомогою підмоделі Subsystem шляхом програмування математичних виразів, відповідних до структури лінійної та нелінійної частин макромоделі, можуть стати інструментом для введення макромоделей у середовище MATLAB/Simulink і розроблення бібліотеки користувача. Моделі, введені таким способом у бібліотеки середовища MATLAB/Simulink, є одними з основних складових програмного забезпечення для прогнозування часових характеристик конкретних електротехнічних систем з використанням моделей елементів, експлуатованих на конкретних реальних енергетичних об'єктах України.

В якості прикладу можливості інтеграції в середовище Simulink дискретних макромоделей у вигляді “чорної скриньки” та тестування складного електричного кола, математична модель якого містить макромодель у своїй структурі [203], здійснено адаптацію дискретної макромоделі лінії електропереєсилання, розробленої й описаної в розд. 5.1 у вигляді співвідношення (5.15).

Адаптації підлягала модель системи, схема електричного кола якої наведена на рис. 5.1. Представлене електричне коло з лінією електропереєсилання в своєму складі в середовище Simulink було інтегроване 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 й

додаткового керованого джерела напруги Controlled Voltage Source, як це показано на рис. 6. 3.

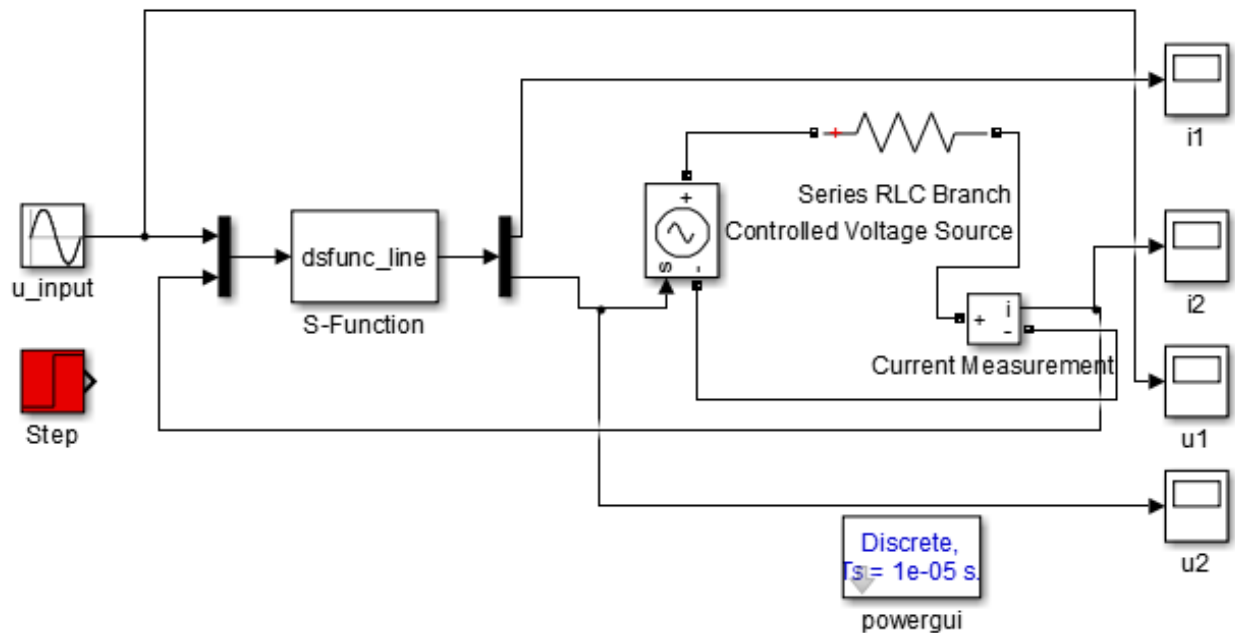


Рис. 6. 3. Simulink – модель електричного кола з макромоделлю лінії електропересилання в своїй структурі

Для введення решти елементів електричного кола використано моделі елементів з пакету інструментів SimPowerSystem Blockset середовища Simulink. З метою тестування отриманої схеми та для забезпечення можливості подання змінної та постійної входної напруги застосовано блоки Sine Wave (з можливістю зміни амплітудних значень напруги, частоти) та Step Signal з бібліотеки Sources.

Для відтворення та зміни параметрів навантаження в схему введено блок резистивно-індуктивно-ємнісного навантаження Series RLC Branch. Для відворення результатів моделювання перехідних процесів використано блоки-осцилографи Scope з бібліотеки Sinks та додаткові засоби вимірювання струму Current Measurement. Значення параметрів елементів кола, а саме джерел і навантаження відповідали використаним під час побудови дискретної макромоделі лінії електропересилання [203].

Фрагмент описання матриць **A**, **B**, **C**, **D** макромоделі лінії електропересилання, отриманої у вигляді співвідношення (5.16) з блоку

програмування S-функцій математичних рівнянь дискретної макромоделі наведено на рис 6. 4, які вводяться відповідно до числових значень коефіцієнтів і синтаксису програмування S-функцій.

```

12 % Copyright 1990-2001 The MathWorks, Inc.
13 % $Revision: 1.8 $
14 % Creation of Discrete Macromodel.
15
16 % Setting of matrix coefficients:
17 - A = [0. 0.99;
18       -0.99 0.]; % Matrix of the system.
19
20 - B = [0.001 0.;
21       0. 0.2832]; % Input matrix.
22
23 - C = [0. 6.999;
24       1977 0.]; % Output matrix.
25
26 - D = [0.003535 0.;
27       0. -282.5]; % Detour matrix.
28

```

Рис. 6. 4. Фрагмент програмованої S-функції з описанням матриць **A, B, C, D** дискретної макромоделі

Нижче наведено текст підпрограми з описанням побудови блоку дискретної макромоделі шляхом програмування S-функції:

```

function [sys,x0,str,ts] = dsfunc_line(t,x,u,flag)
% DSFUNC Приклад реалізації S-функції. Макромодель лінії
електропересилання:
% Дискретна система:
%  $x(n+1) = Ax(n) + Bu(n)$ 
%  $y(n) = Cx(n) + Du(n)$ 
% Значення матриць передаються в callback-методи за допомогою їх заголовків
% в якості додаткових параметрів
%
% Введення матриць:
A = [0. 0.99;
     -0.99 0.]; % Матриця системи.

B = [0.001 0.;
     0. 0.2832]; % Матриця входу.

C = [0. 6.999;
     1977 0.]; % Матриця виходу.

```

```

D = [0.003535 0.;
     0. -282.5]; % Матрица обходу.

%D = [0.0 0.
      0. 0.]; % Матрица обходу.

switch flag, % В залежності від значення змінної flag здійснюється
  % виклик методу:
  %=====
  % Ініціалізація %
  %=====
  case 0,
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,B,C,D);
  %=====
  % Розрахунок значень вектора станів дискретної частини системи %
  %=====
  case 2,
    sys = mdlUpdate(t,x,u,A,B,C,D);
  %=====
  % Розрахунок значень вектора вихідних сигналів %
  %=====
  case 3,
    sys = mdlOutputs(t,x,u,A,C,D);
  %=====
  % Невикористані значення змінної flag %
  %=====
  case { 1, 4, 9 }
    sys=[];
  %=====
  % Невідомі значення змінної flag %
  %=====
  otherwise
    error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
%% Закінчення dsfunc
%=====
% mdlInitializeSizes %
% Функція ініціалізації %
% Розрахунок початкових умов, значень вектора кроків модельного %
% часу та вимірності матриць %
%=====
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(A,B,C,D)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0; % Число непервних змінних стану.
sizes.NumDiscStates = size(A,1); % Число дискретних змінних стану.
sizes.NumOutputs = size(D,1); % Число вихідних змінних (вимірність вихідного
вектора).
sizes.NumInputs = size(D,2); % Число вхідних змінних (вимірність вхідного
вектора).
sizes.DirFeedthrough = 1; % Прямий прохід. Якщо є передавання вхідного
сигналу на вихід
% (матрица D не пуста).

```

```

sizes.NumSampleTimes = 1;      % Вимірність вектора кроків модельного часу.
sys = simsizes(sizes);
x0 = zeros(sizes.NumDiscStates,1); % Задання вектора початкових значень
змінних стану.
                                % Нульові початкові умови
str = [];                       % Параметр зарезервовано для майбутнього
використання.
ts = [10-5 0]; % Матриця з двох колонок, яка задає крок модельного часу і
зміщення
% Закінчення mdlInitializeSizes
%=====
% mdlUpdate                       %
% Функція для розрахунку значень вектора стану дискретної частини системи
%=====
%
function sys = mdlUpdate(t,x,u,A,B,C,D)
%pp=0.0048*u(1,1)-0.00048*x(1,1);
if t<=35*10-5
    x=[0.; 0.];
end
sys = A*x+B*u;%x(1,1)^2*[pp; 0.];
% Закінчення mdlUpdate
%=====
% mdlOutputs                       %
% Функція для розрахунку значень вектора вихідних сигналів %
%=====
%
function sys = mdlOutputs(t,x,u,A,C,D)
if t<=35*10-5
    x=[0.; 0.];
end
sys = C*x+D*u;
% Закінчення mdlOutputs

```

З метою дослідження створеної моделі електричного кола використовувались числові методи інтегрування рівнянь зі сталим і змінним кроком, вбудовані у бібліотеку прикладних методів симулювання пакету Simulink.

Результати моделювання описаного електричного кола з дискретною макромоделлю в його складі за умови прикладання постійної напруги наведено на рис. 6.5.

Осцилограми перехідних процесів, отримані під час моделювання лінії електропередавання, отримані за умови використання дискретної макромоделі, реалізованої в середовищі Simulink за допомогою блоків S-функцій, порівнювались з осцилограмами перехідних процесів, отриманими за

допомогою деталізованої моделі, реалізованої в методі біжучих хвиль [203, 271, 272] та показали повну відповідність результатів моделювання.

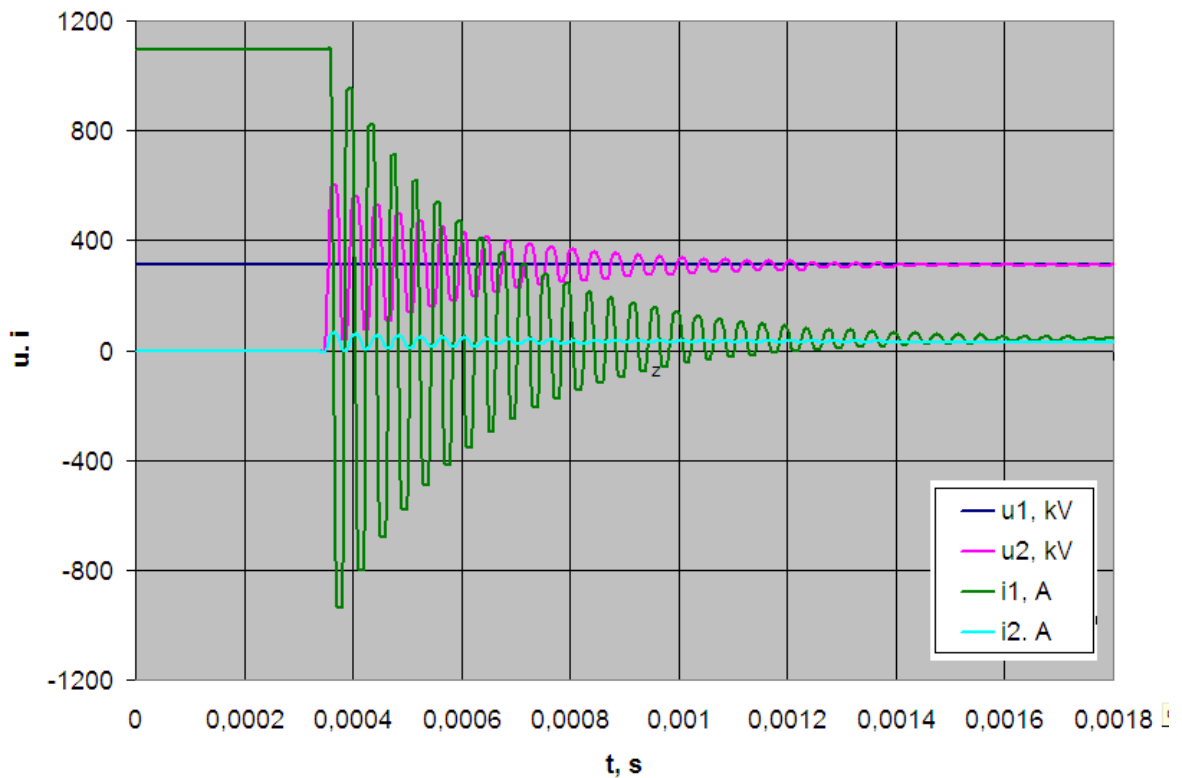


Рис. 6.5. Осцилограми перехідних процесів електротехнічної системи за прикладеної постійної напруги

Створена модель ЕТС у вигляді “джерело живлення-лінія електропересилання-навантаження”, протестована у різних режимах її роботи (навантаженому, неробочого ходу та короткого замикання) за умови прикладання вхідної постійної та змінної напруги, характеризується числовою стійкістю та універсальністю щодо зміни параметрів [203].

6.3. Адаптація макромоделей елементів електротехнічних систем до середовища АТР

Для аналізу електротехнічних систем програми ЕМТР і Spice-типу використовують метод вузлових напруг [161, 190, 218].

Розглянемо детальніше можливе представлення макромоделей у середовищі АТР. Для того, щоб можна було використовувати макромоделі виду (1.22) у програмі АТР необхідно додатково створити модуль зв’язку рівнянь

макромоделі з модулем формування цифрової математичної моделі заступної схеми електричної системи.

Моделювання електротехнічної системи базується на дискретизації диференційних рівнянь для кожного елемента схеми з використанням певного методу інтегрування (метод трапецій). У програмах типу АТР/ЕМТР для розрахунків змінних стану (струмів і напруг) застосовується метод вузлових напруг. Схема досліджуваного електричного кола описується за допомогою вузлової матриці провідностей, яка має такий вигляд:

$$\mathbf{G}\mathbf{V}_n = \mathbf{I}_h, \quad (6.8)$$

де \mathbf{G} – матриця вузлових провідностей досліджуваної системи, \mathbf{I}_h – вектор струмів, елементами якого є джерела струмів з пам'яттю та незалежні джерела струмів, що входять у вузли. Вузлові напруги \mathbf{V}_n є невідомими та розраховуються шляхом розв'язання рівняння (6.8) на кожному часовому кроці.

Під час застосування програм типу ЕМТР, в основі яких лежить застосування методу з фіксованим кроком інтегрування, топологічні зміни схеми, які можуть виникнути через комутації, вимагають спеціального врахування, оскільки вони можуть відбутись посеред кроку. Тривіальним розв'язанням цієї проблеми є зменшення часового кроку до моменту досягнення задовільної точності розв'язання, що може зумовити використання дуже малих часових кроків і збільшити обчислювальні витрати, необхідні для здійснення комп'ютерного моделювання в цілому. На кожному часовому кроці матриця \mathbf{G} і значення попередніх елементів вектора струмів оновлюються в разі потреби, розв'язуються вузлові рівняння та знаходяться вузлові напруги. Крім цього, на кожному часовому кроці змінні електричної системи розраховуються з перевіркою зміни топології її заступної схеми.

Можливі два способи використання дискретних макромоделей елементів для аналізу ЕТС у середовищі програми АТР: відображення рівняння макромоделі за допомогою заступної схеми, складеної з типових ідеальних елементів бібліотеки електричних кіл, і застосування діакоптического підходу.

Перший метод передбачає схемну інтерпретацію неперервного рівняння стану за допомогою засобів, наявних у програмі (керовані джерела струмів і напруг, керовані резистори та вимикачі). Для реалізації цього методу можна використати схемну модель неперервного нелінійного рівняння стану

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{x}(t)}{dt} &= F(\vec{x}(t), \vec{v}(t)), \\ \vec{y}(t) &= G(\vec{x}(t), \vec{v}(t)) \end{aligned} \quad (6.9)$$

запропонованого в [257, 277].

Пропонується створити макромодель реального елемента у вигляді підсхеми, яка складається з певного резистивного багатополісника, навантаженого конденсаторами, зображеного на рис. 6.6. Як входні й вихідні сигнали візьмемо відповідно входні струми $i_{вх1}, i_{вх2}, \dots, i_{вхn}$ та напруги $u_{вх1}, u_{вх2}, \dots, u_{вхn}$, і вихідні струми $i_{вих1}, i_{вих2}, \dots, i_{вихn}$ та напруги $u_{вих1}, u_{вих2}, \dots, u_{вихn}$, а як змінні стану – напруги на конденсаторах $u_{C1}, u_{C2}, \dots, u_{Cn}$.

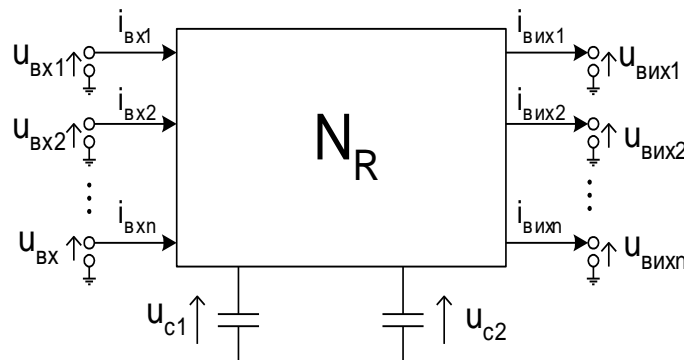


Рис. 6.6. Схемна інтерпретація неперервного рівняння стану (6.10)

Вектор \vec{v} з рівняння (6.9) формується як підмножина множини, складеної з $\{u_{вхi}\}$, а елементами вектора \vec{y} є елементи множини $\{i_{вих1}, u_{вих2}\}$. Вектор змінних стану в даному разі (згідно з рис. 6.6) утворений з напруг на конденсаторах $u_{Ci}, i = \overline{1, n}$. Показана на рисунку схемна модель описується рівнянням у вигляді (6.9).

Припустимо, що $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$. Тоді рівняння (6.9) запишеться у формі такого співвідношення:

$$C \frac{d\vec{u}_C}{dt} = F(\vec{u}_C, \vec{i}_{ex}, \vec{u}_{ex}),$$

$$\vec{y} = G(\vec{u}_C, \vec{i}_{ex}, \vec{u}_{ex}),$$
(6.10)

де $\vec{u}_C = (u_{C1}, u_{C2}, \dots, u_{Cn})^T$, $\vec{i}_{ex} = (i_{ex1}, i_{ex2}, \dots, i_{exn})^T$, $\vec{u}_{ex} = (u_{ex1}, u_{ex2}, \dots, u_{exn})^T$
 $\vec{u}_{ex} = (u_{ex1}, u_{ex2}, \dots, u_{exn})^T$,

причому

$$\mathbf{y} = (i_{ex1}, i_{ex2}, \dots, i_{exn}, u_{ex1}, u_{ex2}, \dots, u_{exn})^T$$

Якщо $C \frac{du_{Ck}}{dt} = i_{Ck}$ ($k = \overline{1, n}$), то остаточно отримаємо

$$\vec{i}_C = F(\vec{u}_C, \vec{i}_{ex}, \vec{u}_{ex}),$$

$$\vec{y} = G(\vec{u}_C, \vec{i}_{ex}, \vec{u}_{ex}),$$
(6.11)

де $\vec{i}_C = (i_{C1}, i_{C2}, \dots, i_{Cn})^T$.

Багатополюсник N_R можна реалізувати як схему, яка містить керовані джерела струму та напруги. Керують цими джерелами вхідні струми та напруги, а також напруги на конденсаторах. Керовані джерела є типовими елементами більшості пакетів САПР. Однак, у загальному, параметри використовуваних керованих джерел енергії повинні залежати від багатьох змінних схеми (струмів і напруг), зазвичай, нелінійним чином. Сукупність таких джерел досить просто реалізувати засобами програми Pspice.

Об'єднавши відповідним чином ці й інші елементи в схему, можна створити еквівалентну схемну модель багатополюсника. Зазвичай, топологія схеми залежить від вимірності макромоделі, і особливо від вигляду функцій $F(\cdot)$ і $G(\cdot)$. Тому в кожному конкретному випадку схемна модель будується після аналізу отриманої системи рівнянь вигляду (6.11).

Проте, в програмі АТР такі можливості є обмеженими, і тому для побудови показаної на рисунку схемної моделі засобами вхідної мови цієї програми найскладнішими моментом є реалізація нелінійного резистивного

багатополісника, оскільки в бібліотеці елементів відсутні нелінійні джерела енергії, керовані багатьма змінними [170]. Тому залишається шлях імітації названих джерел програмними засобами АТР. Це можна здійснити, наприклад, за допомогою таких схем:

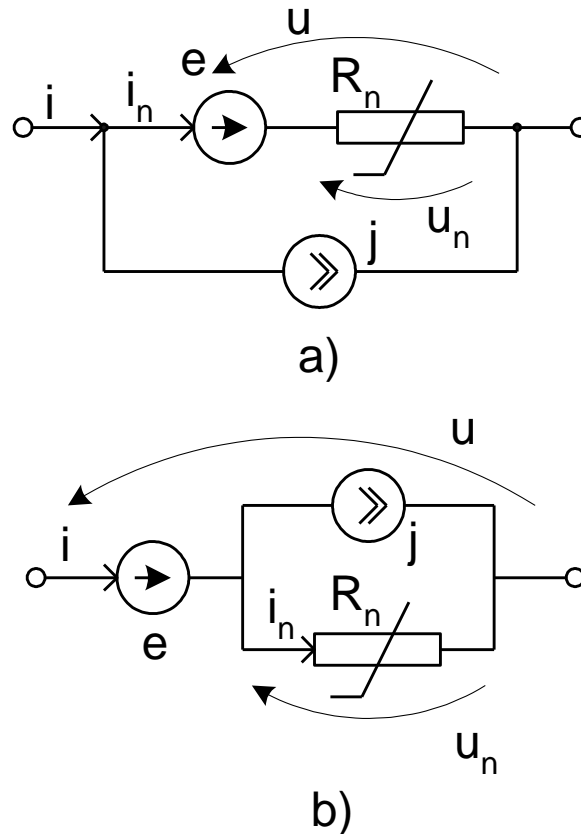


Рис. 6.7. Схеми, які імітують нелінійні джерела напруги (а) та струму (б), керовані двома змінними.

На рис. 6.7 показано: e, j - лінійні джерела, керовані однією змінною; R_n - деякі нелінійні керовані резистори.

Для показаних на рис. 6.7 схем справедливі такі залежності:

а) схема, показана на рис. 6.7 (а), описується виразом

$$u = \alpha v_1 - f(i - \beta v_2) \quad (6.12)$$

за умови, що $e = \alpha v_1$, $j = \beta v_2$ та $u_n = f(i_n)$, v_1 і v_2 - деякі струми та напруги,

б) схема, показана на рис. 6.7 (б) описується виразом:

$$i = \beta v_2 - g(u - \alpha v_1). \quad (6.13)$$

Тут $g(\cdot)$ є функцією, оберненою до функції $f(\cdot)$.

За умови наявності типових двополюсних керованих джерел енергії, можна побудувати модель будь-якого багатовимірного нелінійного керованого джерела шляхом їхніх сполучень.

Інший шлях для реалізації дискретних макромоделей у програмі АТР полягає у використанні діакоптичного підходу, який у певній мірі реалізовано в цьому програмному середовищі. Він полягає у незалежному інтегруванні рівнянь окремих частин аналізованої схеми (зокрема, окремих елементів, описаних дискретними макромоделями) й подальшому узгодженні отриманих розв'язків чи програмній реалізації багатополісного елемента у формі "вхід-вихід".

6.4. Реалізація макромоделі трансформатора в середовищі АТР

У середовищі АТР після побудови моделі досліджуваного електричного кола в редакторі ATPDraw згідно рекомендацій, наведених у [238], та компіляції в математичну модель у методі вузлових напруг, виконується його моделювання за допомогою класичного запису:

$$\mathbf{GV} = \mathbf{J}, \quad (6.14)$$

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

Усі елементи кола з розподіленими та зосередженими параметрами представляють у вигляді джерел струму й опорів. Для аналізу перехідних процесів у колах із зосередженими параметрами, їх необхідно описати диференціальними рівняннями, дискретизованими відповідно до методу інтегрування трапеціями зі сталим часовим інтервалом Δt . 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, приєднаних до вузлів.

Під час розрахунку перехідних процесів послідовне розв'язування рівняння (6.14) для часу, який наростає, дає вузлові напруги й усі інші необхідні розрахункові значення координат процесу. Метод адаптовано для

елементів із розподіленими параметрами, елементів з нелінійними характеристиками намагнічення та частотними залежностями [245].

Безумовною перевагою середовища ATP є можливість самостійно вводити в модель системи, яка підлягає аналізу, бажані елементи чи навіть моделі підсистем, застосовуючи підхід до вирішення задач, окреслених користувачем (так званий User Specified Problem (USP)) [191]. Особливості цього підходу використано при побудові математичної макромоделі однофазного трансформатора [245]. Основні функціональні особливості середовища ATP, а особливо підхід до вирішення задач, окреслених користувачем, можуть бути застосовані для створення нетипових дискретних моделей елементів відповідно до основних засад макромодельовання.

Однією з важливих особливостей програми ATP, яка дозволяє вирішити проблему побудови дискретних макромоделей є можливість програмування шляхом використання мови MODELS.

Розглянемо модель однофазного трансформатора, схема якого наведена на рис. 6.8. Індокси p і s позначають первинну та вторинну обвитки трансформатора відповідно.

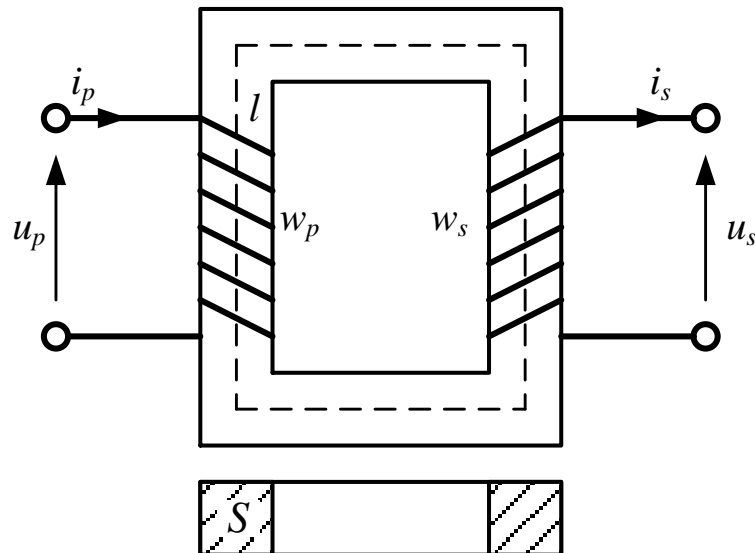


Рис. 6.8. Еквівалентна схема однофазного трансформатора

Індукція основного магнітного поля B може бути представлена за допомогою відомого співвідношення

$$B = \frac{1}{\beta} \operatorname{Arsh} \frac{H}{\alpha} \quad (6.15)$$

з параметрами α , β ; H – напруженість магнітного поля осердя трансформатора.

Однофазний трансформатор, зображений на рис. 6.8, еквівалентується заступною схемою, наведеною на рис. 6.9. Така узагальнена модель використовується в бібліотеці елементів електротехнічних систем програм типу АТР [161]. Магнітне коло описується вітками R_m і L_m , де резистивним опором R_m можна знехтувати. У моделі опір R_m приєднано до первинної обвитки трансформатора.

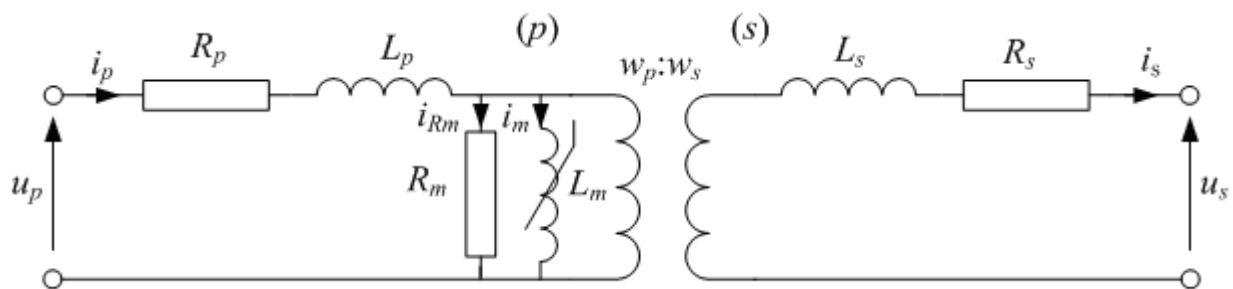


Рис. 6.9. Еквівалентна заступна схема однофазного трансформатора

Індуктивність L_m може бути безпосередньо отримана з моделі (6.15), застосовуючи співвідношення між індукцією та магнітним потоком λ :

$$B = \frac{\lambda}{S w_p}. \quad (6.16)$$

Порівнюючи (6.15) і (6.16) та враховуючи, що $H = \frac{w_p}{l} i_m$ (відносно первинної обвитки) отримаємо:

$$\lambda = \frac{S w_p}{\beta} \operatorname{Arsh} \left(\frac{w_p}{l \alpha} i_m \right). \quad (6.17)$$

Рівняння (6.17) описує магнітну характеристику осердя трансформатора. Індуктивність L_m можна розрахувати, використовуючи відоме співвідношення:

$$L_m = \frac{d\lambda}{di_m} = \frac{S w_p^2}{l \alpha \beta} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{w_p}{l \alpha} i_m\right)^2}}. \quad (6.18)$$

У типовій моделі трансформатора з середовища АТР/ЕМТР характеристика намагнічення подається у вигляді таблиці з декількома точками-парами співвідношення $\lambda=f(i_m)$. Нелінійна характеристика моделюється шляхом застосування кусково-лінійної апроксимації з використанням моделі нелінійного елемента (так званий псевдо-нелінійний реактор reactor Type-98). Також користувач може створити власну модель вітки намагнічення та включити її замість стандартного розв'язку [191].

Нижче поданий приклад дозволяє проілюструвати поведінку АТР моделі трансформатора. Використано такі параметри моделі: $w_p=370$, $w_s=180$, $R_p=1\Omega$, $R_s=R_p(w_s/w_p)^2=0.2367$ Ом, $L_p=0.0016$ Гн, $L_s=L_p(w_s/w_p)^2=3.7867E-4$ Гн, $l = 0.59$ м, $S = 0.0025\text{м}^2$. Трансформатор живиться джерелом синусоїдної напруги у вигляді $u = U_m \cos(100\pi + \varphi)$, $U_m = 220\sqrt{2}$, $\varphi = -\pi/4$.

На рис. 6.10 наведена модель кола досліджуваного трансформатора, яка створена за допомогою графічного редактора ATPDraw. Трансформатор навантажено віткою, яка складається з послідовно сполучених резистора та конденсатора R_L та C_L , $R_L = 1000\Omega$, $C_L = 31\text{мкФ}$. У коло додано вимикач, який вмикається в момент часу $t = 0$ для того, щоб встановити нульові початкові умови. Це також дозволяє виміряти струм первинної обвитки.

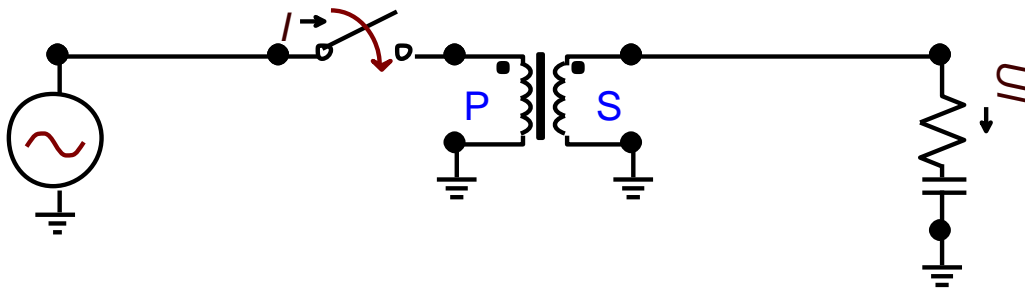


Рис. 6.10. ATPDraw модель однофазного трансформатора

Характеристика намагнічення, отримана з (6.17) наведена у табл. 6. 1. Її

введення у модель обмежується лише додатною частиною кривої (початок характеристики намагнічення тут не вказується). Такий самий формат даних використовується в ATPDraw моделі трансформатора. Графічна форма характеристики наведена на рис. 6.11.

Таблиця 6. 1. Характеристика намагнічення трансформатора

i_m [A]	λ [Wb T]
0.5	0.804
1.0	0.984
2.5	1.229
5.0	1.413
7.5	1.519
10.0	1.595
20.0	1.777
50.0	2.021

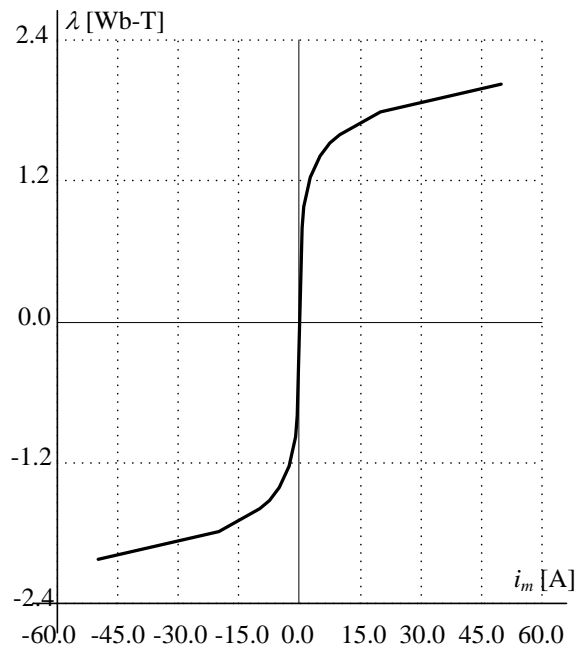


Рис. 6.11. Характеристика намагнічення осердя трансформатора

Інтегрування моделі здійснювалось за допомогою методу трапецій з кроком $\Delta t = 1.0E-5s$. Отримані криві перехідних процесів, а саме струми первинної та вторинної обмотки наведено на рис. 6.12.

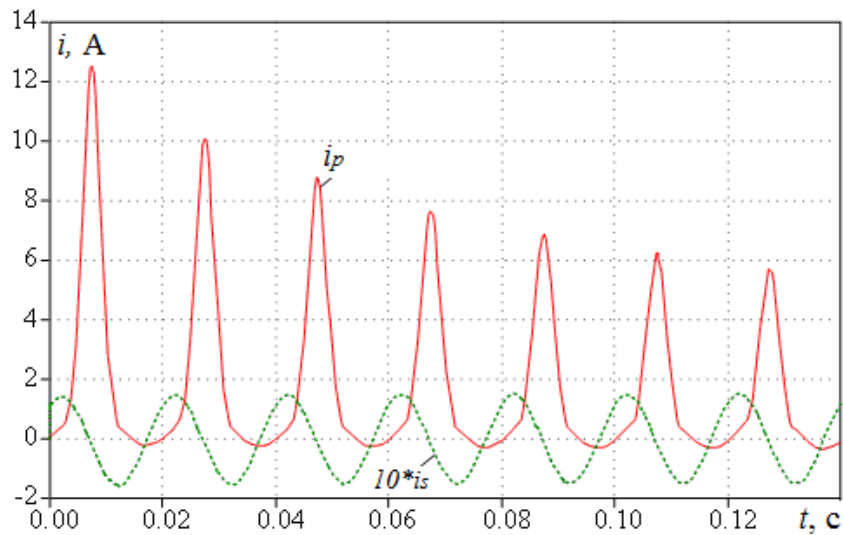


Рис. 6.12. Криві струмів первинної та вторинної обвиток трансформатора

Струм вторинної обвитки під час вмикання трансформатора на графіку збільшено в десять разів. На графіках можна спостерігати суттєву різницю між формою кривих, зумовленою стрибком струму намагнічення на початку процесу моделювання з нульовими початковими умовами та малим опором навантаження.

6.5 Побудова макромоделі трансформатора в середовищі ATP з використанням блоку Type-94

Елемент з бібліотеки графічного редактора ATPDraw типу Type-94 може представляти багатополосний елемент чи багатовузлову модель частини аналізованої ЕТС, підготованої користувачем відповідно до підходу користувача USP. Вона належить до середовища програми ATP/EMTP і однозначно збільшує її можливості та функціональність. Макромодель трансформатора на основі елементу Type-94 створена з використанням мови MODELS, яка є спеціалізованим засобом програмування цього середовища, орієнтованого на моделювання динамічних підсистем у часовій області, включаючи системи керування [192]. Як частина аналізованої ЕТС, блок типу Type-94, що представляє багатополосний елемент, повинен відповідати вимогам, які накладаються загальним методом розв'язання (метод трапецій), вибраним відповідно до вузлового рівняння (6.14). Тому n -вузловий елемент

описується матрицею провідності вимірності $n \times n$ і вектором вузлових напруг, який містить n -елементів. Вони визначають значення вхідних величин на кожному часовому кроці моделювання.

В якості вихідних величин модель повинна визначати струми вузлових джерел, що містять також n -елементів. Для комп'ютерної реалізації розв'язання рівняння (6.14) застосовуються ітераційні методи, хоча можуть бути використані й інші підходи. Особливості його практичної реалізації доцільно продемонструвати на об'єкті, який часто використовується (на прикладі однофазного трансформатора).

Проаналізуємо заступну схему однофазного трансформатора, наведену на рис. 6.9. Розглянемо вхідні та вихідні величини, які його описують. Заступна схема моделі трансформатора, створеної за допомогою блока типу Туре-94, представлена на рис. 6.10. 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. Вхідні напруги на лівих вузлах розглядаються як напруги між парами відповідних двох бічних вузлів, наприклад $u_1 := u_1 - u_5$. На цьому етапі необхідно підготувати динамічну внутрішню модель досліджуваного трансформатора, на підставі якої визначається вихідний вектор і матриця провідностей відповідно:

$$\mathbf{i} = [i_1 \quad i_2 \quad i_3 \quad i_4]^T, \quad (6.19)$$

$$\mathbf{G}_{1-4} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix}. \quad (6.20)$$

У результаті формується вхідний вектор вузлових напруг:

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]^T \quad (6.21)$$

і вектор історії процесу: \mathbf{hist}_{1-4} . Тому узагальнена функція, яка відображає поведінку системи в формі “вхід-вихід” розглянутого 4-вузлового

трансформатора, буде відображена у такій формі:

$$(\mathbf{i}, \mathbf{G}_{1-4}) = g(\mathbf{u}, \mathbf{hist}_{1-4}) \quad (6.22)$$

Оскільки в програму АТР/ЕМТР закладено адекватний механізм для автоматичного введення готової моделі в систему, що аналізується, потрібно підготувати модель відповідно до встановлених правил [191, 192]. Для побудови макромоделі в формі “вхід-вихід” для вирішення цієї задачі пропонується застосувати елемент типу Type-94 (рис. 6.13), в якому можна реалізувати ітераційний процес.

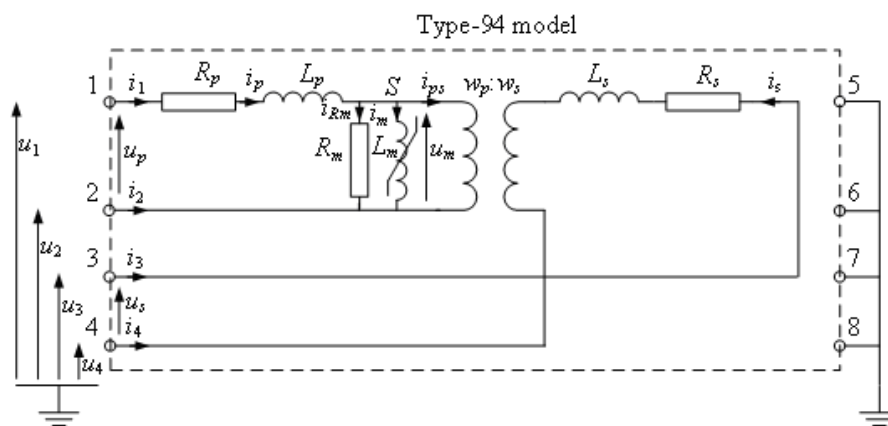


Рис. 6.13. Заступна схема трансформатора, реалізована у вигляді моделі типу Type-94

Для побудови моделі досліджуваного трансформатора запишемо диференціальні рівняння, які описують його стан:

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p}(u_p - u_m) - \frac{R_p}{L_p}i_p, \quad (6.23)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_m}u_m, \quad (6.24)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ps} \\ i_s \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} n_{sp}^2 & -n_{sp} \\ -n_{sp} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_m \\ u_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ps} \\ i_s \end{bmatrix}, \quad (6.25)$$

$$\text{де } n_{sp} = \frac{w_s}{w_p}.$$

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 вигляді (6.25).

Для утворення повної системи рівнянь основна модель, записана у вигляді співвідношень (6.23-6.25), доповнена такими алгебричними рівняннями:

$$\begin{aligned} i_{Rm} &= i_p - i_{ps} - i_m, \\ u_m &= R_m i_{Rm}. \end{aligned} \quad (6.26)$$

У другому рівнянні системи (6.26) прийнято, що значення опору R_m є сталою величиною, хоча його можна задати як нелінійне співвідношення. Диференціальне рівняння (6.24) є суттєво нелінійним у зв'язку з нелінійністю L_m (6.18). Остаточо, система рівнянь (6.23) – (6.26) з урахуванням співвідношення (6.18) визначає внутрішню модель досліджуваного 4-вузлового елемента типу Туре-94. Далі необхідно зв'язати внутрішні змінні зі змінними, які присутні на полюсах досліджуваного багатополюсника.

Вхідними величинами є:

$$\begin{aligned} u_p &= u_1 - u_2, \\ u_s &= u_3 - u_4, \end{aligned} \quad (6.27)$$

а вихідними:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_p, \quad i_2 = -i_p, \\ i_3 &= i_s, \quad i_4 = -i_s. \end{aligned} \quad (6.28)$$

Програма АТР передбачає використання методу трапецій для інтегрування диференціальних рівнянь цієї моделі. Для рівняння (6.23) отримано таке дискретне співвідношення на кожному часовому кроці:

$$i_p(k) = G_p u_{pm}(k) + hist_p(k-1), \quad (6.29)$$

де: $u_{pm} = u_p - u_m$, $G_p = \frac{1}{s_t L_p + R_p}$, $s_t = \frac{2}{\Delta t}$, а

$$hist_p(k-1) = G_p (u_{pm}(k-1) + (s_t L_p - R_p) i_p(k-1)). \quad (6.30)$$

Форма запису рівняння у вигляді (6.29) застосовується для дискретного інтегрування диференціальних рівнянь у програмі АТР. У мові MODELS, застосованій для написання процедур у елементах Туре-94, існує спеціальна функція LAPLACE для реалізації інтегрування. Завдяки її застосуванню не потрібно застосовувати процедуру (6.29) для інтегрування диференціальних рівнянь усередині блоку Туре-94. Функція LAPLACE може бути також використана для отримання дискретного розв'язку на кожному часовому кроці та роботи з функцією історії для конкретного диференціального рівняння.

Можна помітити, що величина G_p в (6.29) є провідністю розглянутої вітки. Застосовуючи аналогічний метод до інших рівнянь моделі внутрішнього блоку, можна визначити елементи матриці провідності трансформатора. З рис. 6.13 видно, що в моделі існує п'ять вузлів: граничні вузли 1-4 і внутрішній вузол S. Враховуючи вищенаведені міркування, можна підготувати матрицю провідності для схеми з 5-вузлів, зображеної на рис. 6.13:

$$\mathbf{G}_{1-S} = \begin{bmatrix} G_{L_p R_p} & 0 & 0 & 0 & -G_{L_p R_p} \\ 0 & G_m + n_{sp}^2 G_{L_s R_s} & n_{sp} G_{L_s R_s} & -n_{sp} G_{L_s R_s} & -G_m - n_{sp}^2 G_{L_s R_s} \\ 0 & n_{sp} G_{L_s R_s} & G_{L_s R_s} & -G_{L_s R_s} & -n_{sp} G_{L_s R_s} \\ 0 & -n_{sp} G_{L_s R_s} & -G_{L_s R_s} & G_{L_s R_s} & n_{sp} G_{L_s R_s} \\ -G_{L_p R_p} & -G_m - n_{sp}^2 G_{L_s R_s} & -n_{sp} G_{L_s R_s} & n_{sp} G_{L_s R_s} & G_m + G_{L_p R_p} + n_{sp}^2 G_{L_s R_s} \end{bmatrix}, \quad (6.30)$$

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).

Оскільки досліджувана матриця представлена у вигляді рівнянь системи (6.14) тільки за допомогою граничних вузлів, внутрішній вузол S повинен бути усунутий з вихідної матриці, вважаючи, що вхідний струм вузла $i_s = 0$. Це

забезпечує умови для розрахунку напруги u_S у вузлі S відносно землі:

$$u_S = \frac{-1}{G_{SS}} \sum_{i=1}^4 G_{Si} u_i, \quad (6.31)$$

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

Напруга u_S застосовується для підставлення у вузлові рівняння для граничних вузлів. Це забезпечує побудову загального алгоритму з метою усунення внутрішнього (не граничного) вузла з моделі, яка розглядається. Нові елементи провідності редукованої матриці можуть бути обчислені за формулою:

$$G_{kl}^{(S)} = G_{kl} - \frac{G_{kS} G_{Sk}}{G_{SS}}, \quad k, l = 1..4. \quad (6.32)$$

Можна відзначити, що таке усунення внутрішнього вузла не змінює умови для всієї системи, оскільки відповідні залежності включені у внутрішню модель, описану співвідношеннями (6.23) - (6.26).

При застосуванні (6.32) до матриці (6.30), отримаємо:

$$\mathbf{G}_{1-4}^{(S)} = \frac{1}{G_{SS}} \mathbf{G}_{1-4}, \quad (6.33)$$

де \mathbf{G}_{1-4} є симетричною матрицею з такими елементами:

$$G_{11} = G_{L_p R_p} (n_{sp}^2 G_{L_s R_s} + G_m), \quad G_{12} = -G_{11}, \quad G_{13} = -G_{L_p R_p} n_{sp} G_{L_s R_s}, \quad G_{14} = -G_{13},$$

$$G_{22} = G_{11}, \quad G_{23} = G_{14}, \quad G_{24} = G_{13}, \quad G_{33} = G_{L_s R_s} (G_{L_p R_p} + G_m), \quad G_{34} = -G_{33}, \quad G_{44} = G_{33}.$$

Елементи з нижньої трикутної частини відповідають умовам симетрії матриці. Отримана матриця \mathbf{G}_{1-4} розглядається як вихідне значення (аналогічно вектору струмів \mathbf{i}) блоку моделі. Розглянута модель трансформатора нелінійна, а значення елементів матриці \mathbf{G}_{1-4} змінюються під час моделювання. Отже, значення її елементів повинні бути перераховані під час кроків моделювання навіть на ітераційних етапах розрахунку.

Макромодель трансформатора, показана на рис. 6.13, була реалізована в

програмі ATP на основі рівнянь, описаних вище у вигляді схеми, підготованої за допомогою графічного редактора ATPDraw і показаної на рис. 6.14.

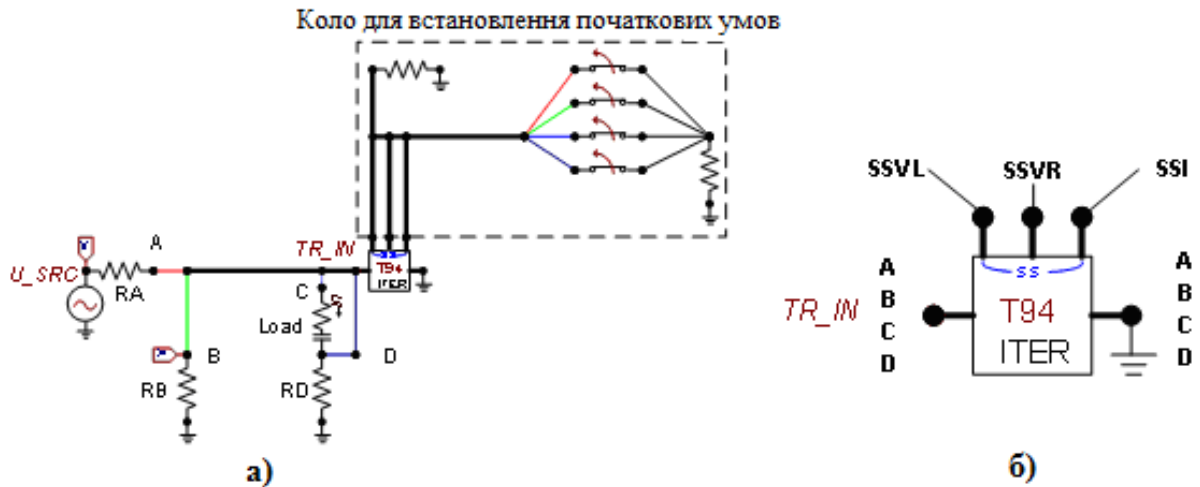


Рис. 6.14. ATPDraw модель досліджуваного кола (а) та збільшене схематичне зображення блоку елемента Type-94 (б)

З метою спрощення приймемо, що досліджувана система має нульові початкові умови, тому відповідна схема (блок на рис. 6.14 (а)) не має джерел. Струми та напруги для визначення початкових умов вимірюються лише в момент початкового запуску моделі $t=0$.

Основна частина моделі складається з джерела напруги, сполученого з вузлом U_SRC , навантаження (увімкненого між вузлами TR_INC і TR_IND), трьох резисторів $R_A=R_B=R_D=1.0E-5$ Ом (аналогічні резистори поміщаються в схему початкових умов) і блоку Type-94 з піктограмою T94 ITER (обрано ітераційний тип моделі). Детально виводи та вузли блоку показано на рис. 6.14 (б). Усі з'єднання мають по чотири фази, позначені як А, В, С, D відповідно. Тому вузол, названий TR_INC , означає фазу С у полюсі TR_IN . Такі ж умовні позначення застосовуються до інших трьох полюсів, призначених для опису значень початкових умов. Внутрішньо вони називаються SSVL (Steady State Voltage at Left Nodes – напруга усталеного режиму у лівих полюсах), SSVR (Steady State Voltage at Right Nodes – напруга усталеного режиму у правих полюсах) і SSI (Steady State Current at the Input to Left Side Nodes – струм усталеного режиму лівих полюсів).

Блок Туре-94 розглядається тут як багатополісний елемент (система) з чотирма зовнішніми полюсами. Він містить підсхему (заступну схему трансформатора) у вигляді, показаному на рис. 6. 13. Замість заступної схеми його модель вводиться як програма, складена за допомогою мови MODELS. Нижче наведені послідовні блоки функціональних частин тексту програми

Частина 1. Заголовок процедури

Спочатку потрібно вказати назву процедури (модель) – тут це TRN_2. Довжина імені обмежена до 6 символів. Змінна n дорівнює кількості вузлів моделі й оголошується в графічному редакторі ATPDraw. Тут $n = 4$. Параметр $didv [1..n2]$ представляє матрицю провідності G_{1-4} .

```
MODEL TRN_2 -- NB! 6 character name limit
-- Start header. Do not modify the type-94 header.
comment-----
| First, declarations required for any type 94 Iterated model   |
| - these data and input values are provided to the model by ATP |
- these output values are used by ATP                          |
| - these names can be changed, except 'n', but not their order |
-----
endcomment

DATA  n                -- number of node pairs
      n2 {dflt: n*n}  -- number of matrix elements

INPUT v[1..n]         -- guessed voltage(t) across each node pair
      v0[1..n]        -- voltage(t=0) across each node pair
      i0[1..n]        -- current(t=0) into each left node

VAR   i[1..n]         -- calculated voltage(t) into each left node
      didv[1..n2]     -- calculated left side nodal conductance(t)
matrix
                                --(formed for solving matrix equation
[didv]*V=I)

OUTPUT i[1..n], didv[1..n2]
```

Частина 2. Оголошення параметрів користувача та змінних.

Нижче наведено типову частину процедури з декларуванням змінних. Параметри, оголошені у блоці даних DATA, повинні бути введеними під час редагування моделі в ATPDraw.


```

comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular
model |
| - their value is defined at the time of using the type-94
component |
-----
endcomment
DATA
Rp -- primary winding resistance [ohm]
Lp -- primary winding inductance [H]
Rm -- resistance: eddy current resistive model [ohm]
S -- [m2]
l -- [m]
wp -- number of primary winding turns
ws -- number of secondary winding turns
alph --
bet --
comment-----
-----
| Next, declarations private to this model
-----
endcomment

VAR
wla, wk1
nsp, nsp2 -- ws/wp, (ws/wp)**2
st -- 2/deltaT
Rs, Ls -- secondary parameters
isk, Fisk
ipk, Fipk
ilk, Filk
Fipsk, Fimk
Lm -- transformer core inductance
ipsk
upk, usk
umk, imk, iRm
GLp, GLs, Gm -- conductance of Rp,Lp, Rs,Ls and Rm, Lm
Gss, g11, g14, g33 -- aux. variables for conductance matrix
calculation

```

Частина 3. Блок ініціалізації

Цей блок, розміщений між заголовками INIT – ENDINIT запускається перед початком процесу симулювання в момент часу $t = 0$. Користувач може розраховувати параметри, початкові значення та початковий стан (історію) моделювання.

```

INIT
  nsp:=ws/wp
  nsp2:=nsp*nsp
  wk1:=wp/(alph*1)
  wla:=wk1*wp*S/bet
  Rs:=Rp*nsp2
  Ls:=Lp*nsp2
  st:=2.0/timestep -- 2/deltaT
  --
  Lm:= 5.5 -- initial value
  upk:=v0[1]-v0[2]
  usk:=v0[3]-v0[4]
  ipk:=i0[1]
  isk:=i0[3]
  ipsk:=-nsp*isk
  iRm:=ipk-ipsk
  umk:=-Rm*iRm
  imk:=0
  histdef(umk):=umk
  histdef(ipk):=ipk
  histdef(ipsk):=ipsk
  histdef(isk):=isk
  histdef(imk):=imk
  histdef(Lm):=Lm
  Fipk:=(upk-umk)/Lp-Rp*ipk/Lp
  histdef(Fipk):=Fipk
  Fipsk:=(nsp2*umk-nsp*usk)/Ls-Rs*ipsk/Ls
  histdef(Fipsk):=Fipsk
  Fisk:=(-nsp*umk+usk)/Ls-Rs*isk/Ls
  histdef(Fisk):=Fisk
  Fimk:=umk/Lm
  histdef(Fimk):=Fimk
  GLs:=1.0/(Ls*st+Rs)
  GLp:=1.0/(Lp*st+Rp)
ENDINIT

```

Частина 4. Виконання процедури

Це основна частина моделі, яка виконується для послідовних часових кроків з $t > 0$ і для всіх ітераційних кроків, оголошених для пошуку розв'язку на кожному часовому інтервалі. Видно, що спочатку нові значення напруги первинної та вторинної обвиток трансформатора визначаються за напругами, що подаються у вхідні вузли ($v[1]$, ... $v[4]$). Далі процедура, оголошена в блоці COMBINE - ENDCOMBINE, знову розв'язує рівняння моделі трансформатора

за допомогою співвідношень (6.23 – 6.26). Цей розрахунок виконується за допомогою ітераційного методу Ньютона [192]. Наприкінці визначаються вихідні змінні, а саме матриця провідності \mathbf{G}_{1-4} та вектор вузлових струмів \mathbf{i} .

```

EXEC
-- execution of the model in consecutive time steps
upk:=v[1]-v[2]
usk:=v[3]-v[4]
-- internal model calculation according to Newton iteration method
COMBINE ITERATE AS iter_1
umk:=Rm*(ipk-ipsk-imk)
Fipk:=(upk-umk)/Lp-Rp*ipk/Lp
laplace(ipk/Fipk):=(1|s0)/(1|s1)
Fipsk:=(nsp2*umk-nsp*usk)/Ls-Rs*ipsk/Ls
laplace(ipsk/Fipsk):=(1|s0)/(1|s1)
Fisk:=(-nsp*umk+usk)/Ls-Rs*isk/Ls
laplace(isk/Fisk):=(1|s0)/(1|s1)
Fimk:=umk/Lm
laplace(imk/Fimk):=(1|s0)/(1|s1)
Lm:=wla/sqrt(1+(wk1*imk)**2)
ENDCOMBINE
irm:=umk/Rm
-- conductance matrix (4x4)
Gm:=1/Rm+1.0/(st*Lm)
Gss:=GLp+GLs*nsp2+Gm
g11:=GLp*(GLs*nsp2+Gm)/Gss
g14:=GLp*GLs*nsp/Gss
g33:=GLs*(GLp+Gm)/Gss
didv[1..n2]:= [g11, -g11, -g14, g14,
               -g11, g11, g14, -g14,
               -g14, g14, g33, -g33,
               g14, -g14, -g33, g33]
-- output currents at nodes 1 - 4
i[1..n]:=[ipk, -ipk, isk, -isk]
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Нижче подані результати моделювання в формі кривих перехідних процесів для вибраних координат. Осцилограми струмів первинної та вторинної обвиток трансформатора наведені на рис. 6.15.

Динамічна зміна магнітної індуктивності L_m представлена на рис. 6.16.

Цікаво також побачити динаміку зміни елементів матриці провідності \mathbf{G}_{1-4} . Вони представлені на рис. 6.17. Видно, що, хоч індуктивність має суттєву динаміку (рис. 6.16), вона не має значного впливу на зміну відповідної провідності вітки. Детальний аналіз показав, що в розглянутій моделі матриця індуктивності не дуже чутлива до зміни потоку намагнічування, тому нема підстави для перерахунку цієї матриці на кожному кроці моделювання.

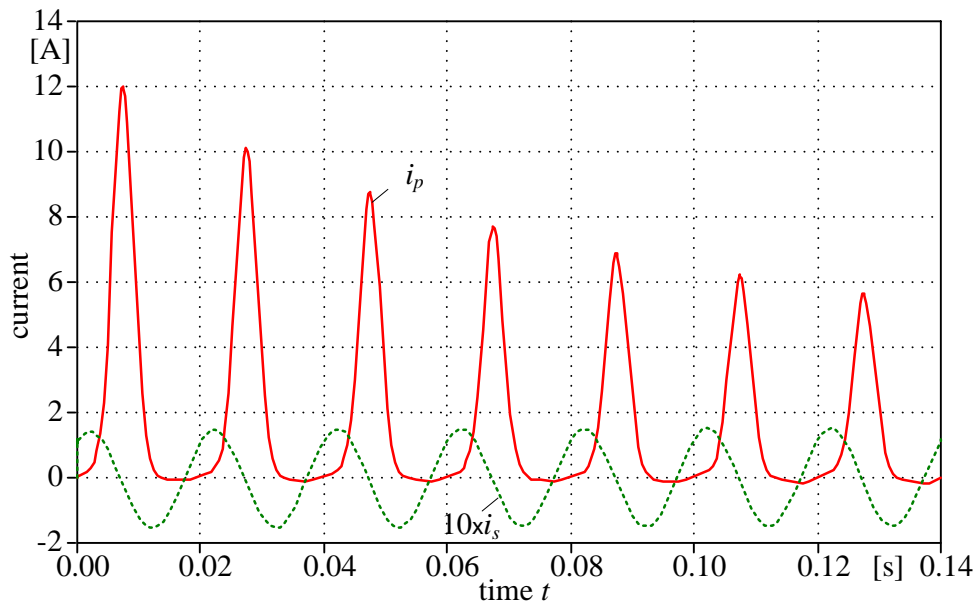


Рис. 6.15. Струми первинної та вторинної обвиток трансформатора

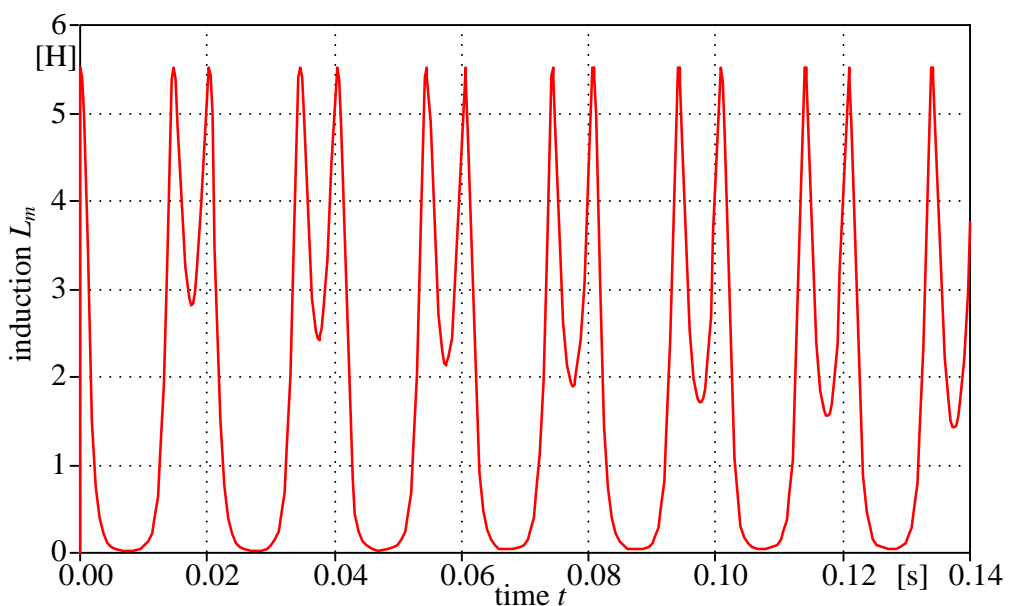


Рис. 6.16 Зміна магнітної індуктивності трансформатора

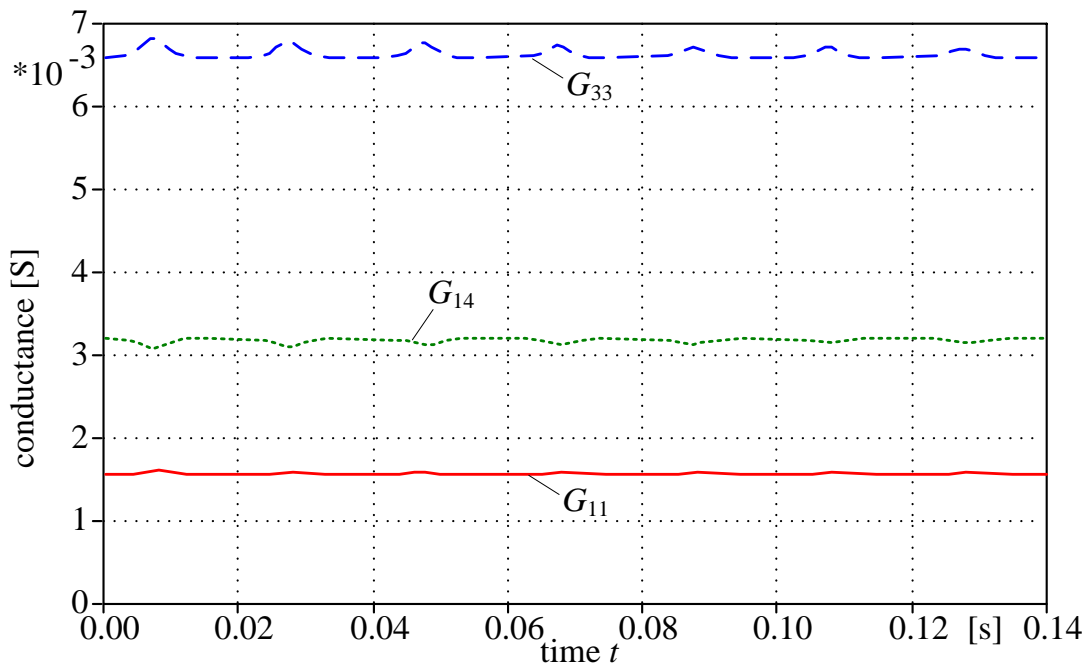


Рис. 6. 17. Зміна елементів матриці провідностей

6.6. Спрощена макромодель однофазного трансформатора, побудована за допомогою блоку Type-94

Модель трансформатора, представлена на рис. 6.13, являє собою пов'язаний з віткою елемент, який є незалежним від землі та має по два входи та виходи. Спрощений вигляд цього елемента зображений на рис. 6.18. Він є однофазним елементом, який в цьому випадку розглядається відносно землі. Навантаження трансформатора $R_L C_L$ включено в модель. Зовнішньо цей елемент має розмірність 1×1 і всі елементи схеми входять у внутрішню структуру моделі.

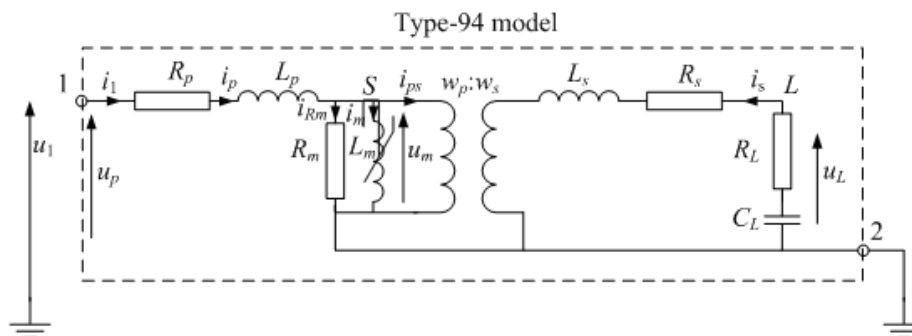


Рис. 6.18. Заступна схема спрощеної моделі трансформатора типу Type-94

Відповідно до моделі однофазного трансформатора, його спрощена

модель описується за допомогою таких рівнянь:

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p}(u_p - u_m) - \frac{R_p}{L_p}i_p, \quad (6.34)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_m}u_m, \quad (6.35)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ps} \\ i_s \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} n_{sp}^2 & -n_{sp} \\ -n_{sp} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_m \\ u_L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ps} \\ i_s \end{bmatrix}, \quad (6.36)$$

$$\frac{du_{c_L}}{dt} = \frac{1}{C_L}i_s, \quad (6.37)$$

$$u_L = -u_{c_L} - R_L i_s. \quad (6.38)$$

Рівняння (6.37) і (6.38) дозволяють здійснювати моделювання трансформатора разом із навантаженням, як це показано на рис. 6.18. Відповідно до рівнянь попередньої моделі, маємо:

$$\begin{aligned} i_{Rm} &= i_p - i_{ps} - i_m, \\ u_m &= R_m i_{Rm}. \end{aligned} \quad (6.39)$$

У цьому разі маємо тільки один вузол виду "вхід-вихід", тому отримуємо:
- на вході:

$$u_p = u_1 \quad (6.40)$$

- та на виході:

$$i_1 = i_p. \quad (6.41)$$

Ця модель має два внутрішні вузли, позначені як S і L (рис. 6.18). Відповідно до методу інтегрування трапеціями, дискретна модель вітки навантаження (R_L , C_L) представлена таким рівнянням на кожному часовому кроці:

$$i_s(k) = G_L u_L(k) + hist_L(k-1), \quad (6.42)$$

де:

$$\begin{aligned} hist_L(k-1) &= -G_L(u_L(k-1) + (1/(s_t L_L) - R_p)i_s(k-1)), \\ u_L(k) &= -u_{CL}(k) - R_L i_s(k), G_L = \frac{1}{1/(s_t C_L) + R_L}, s_t = \frac{2}{\Delta t}. \end{aligned}$$

Матриця провідностей для повної (1, S, L), вузлової моделі з вимірністю 3×3 матиме такий вигляд:

$$\mathbf{G}_{1SL} = \begin{bmatrix} G_{L_p R_p} & -G_{L_p R_p} & 0 \\ -G_{L_p R_p} & G_{L_p R_p} + G_m + n_{sp} G_{L_s R_s} & -n_{sp} G_{L_s R_s} \\ 0 & -n_{sp} G_{L_s R_s} & n_{sp} G_{L_s R_s} + G_L \end{bmatrix}, \quad (6.43)$$

$$\text{де: } G_{L_p R_p} = \frac{1}{s_t L_p + R_p}, \quad G_{L_s R_s} = \frac{1}{s_t L_s + R_s}, \quad G_m = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{s_t L_m}, \quad G_L = \frac{1}{1/(s_t C_L) + R_L}.$$

Відповідні стовпці та рядки матриці відносяться до вузлів: 1, S, L.

Для усунення вузла L застосовуємо співвідношення (6.31) і (6.32) та отримуємо:

$$\mathbf{G}_{1S} = \begin{bmatrix} G_{L_p R_p} & -G_{L_p R_p} \\ -G_{L_p R_p} & G_{L_p R_p} + G_m + \frac{n_{sp} G_{L_s R_s} G_L}{n_{sp} G_{L_s R_s} + G_L} \end{bmatrix}. \quad (6.44)$$

Усунення вузла S зумовлює формування наступного співвідношення:

$$\mathbf{G}_{11} = \mathbf{G}_1 = \frac{G_{L_p R_p} \left(G_m + \frac{n_{sp} G_{L_s R_s} G_L}{n_{sp} G_{L_s R_s} + G_L} \right)}{G_{L_p R_p} + G_m + \frac{n_{sp} G_{L_s R_s} G_L}{n_{sp} G_{L_s R_s} + G_L}}, \quad (6.45)$$

яке є провідністю моделі з боку вузла 1.

Створена модель трансформатора у графічному препроцесорі ATPDraw подана на рис. 6.19. Криві зміни провідності G_1 для спрощеної макромоделі трансформатора показані на рис. 6. 20. Решта результатів моделювання є такими самими як для моделі, показаної на рис. 6.14.

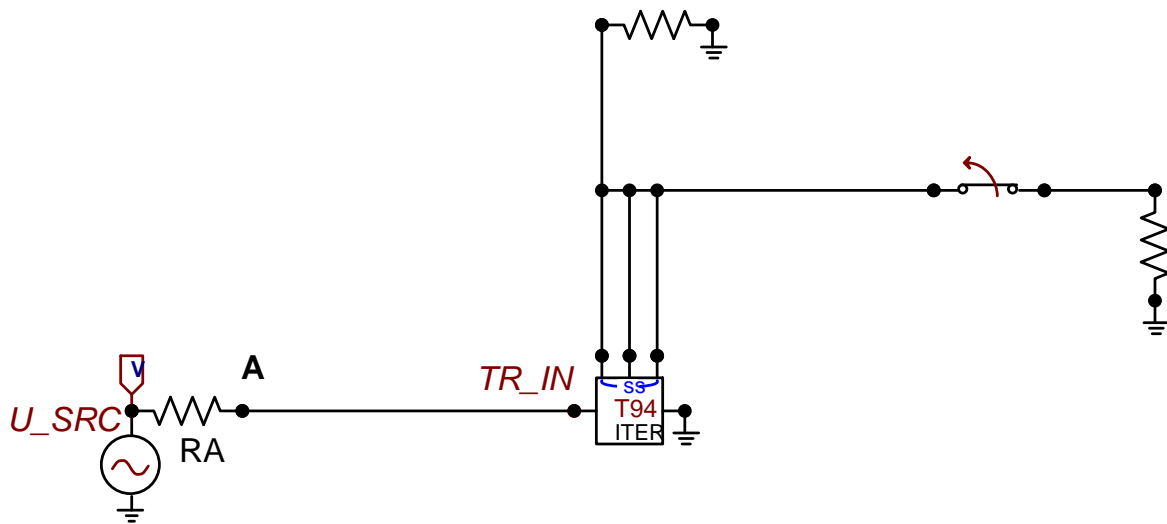


Рис. 6.19. Модель трансформатора в ATPDraw зі спрощеним блоком Туре-94

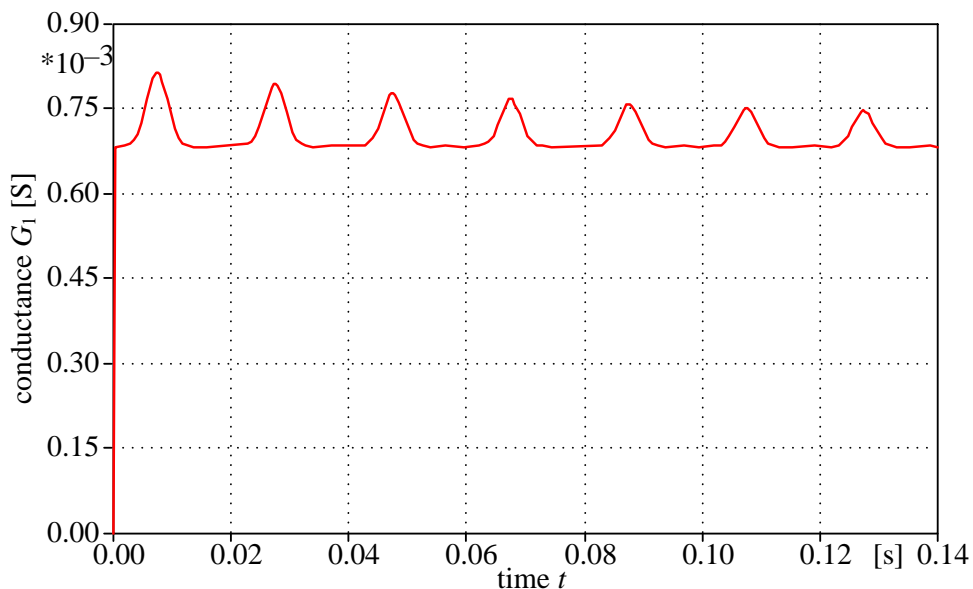


Рис. 6. 20. Крива зміни провідності G_1

Отже, наведені в розд. 6.5 та розд. 6.6 приклади побудови макромоделі однофазного трансформатора підтверджують можливість застосування діакоптичних підходів і макромодельовання для дослідження динамічних режимів у програмах розрахунку перехідних процесів електротехнічних систем.

6.7. Особливості використання макромоделей у сучасних комп'ютерних засобах

Як вже зазначалось, діакоптичний підхід є зручним для реалізації обчислень динамічних режимів електричних кіл на багатопроцесорних

комп'ютерних засобах. У той же час слід звернути увагу на можливу нестійкість обчислювальних діакоптичних процедур, зумовлену певним запізненням зовнішніх змінних. Усунути цей недолік можна такими способами:

- апроксимацією внутрішніх змінних макромоделей (підсхем), якщо крок дискретизації макромоделі є більший за мінімальний крок обчислень аналізованої схеми;
- вибором оптимального методу дискретизації макромоделі, яким є, на наш погляд, метод трапецій;
- використанням для узгодження макромоделей (підсхем) неідеальних джерел струму та напруги.

Зазначені рекомендації запропоновано нами на основі аналізу числових експериментів, здійснених із використанням макромоделей і математичних моделей, як у середовищі ATP, так і MATLAB/Simulink [173, 200].

В якості прикладу можна навести розрахунок електричної схеми з однофазним трансформатором і навантаженням, математична макро модель якого була реалізована у вигляді дискретних рівнянь змінних стану [173]:

$$\begin{cases} \vec{x}^{(i+1)} = x^{(i)} + \Delta t \cdot \mathbf{L}^{-1} \cdot (\vec{v}^{(i)} - \mathbf{R} \cdot \vec{x}^{(i)}), \\ \vec{y}^{(i+1)} = \vec{x}^{(i+1)}. \end{cases} \quad (6.46)$$

Модель електричної схеми введена в середовище Simulink у вигляді, наведеному на рис. 6.21.

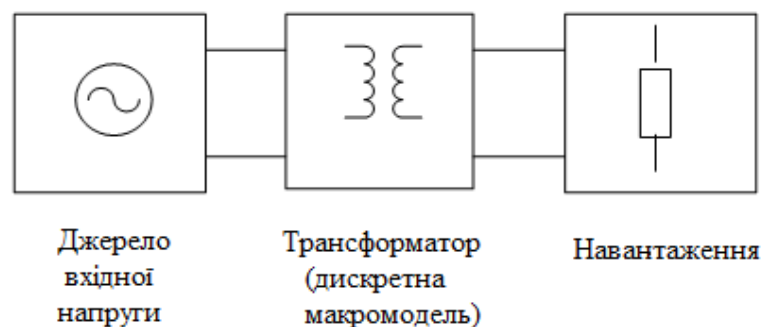


Рис. 6.21. Схема електротехнічної системи з макромоделлю однофазного трансформатора

При зміні опору навантаження для його певних значень спостерігалась нестійкість розрахунку перехідного процесу (рис. 6.22) $R_H = 0 - 150$ Ом. На рис. 6.22 представлено часові діаграми струму первинної обвитки трансформатора i_1 для двох значень опору навантаження $R_{H1} = 145$ Ом і $R_{H2} = 148$ Ом.

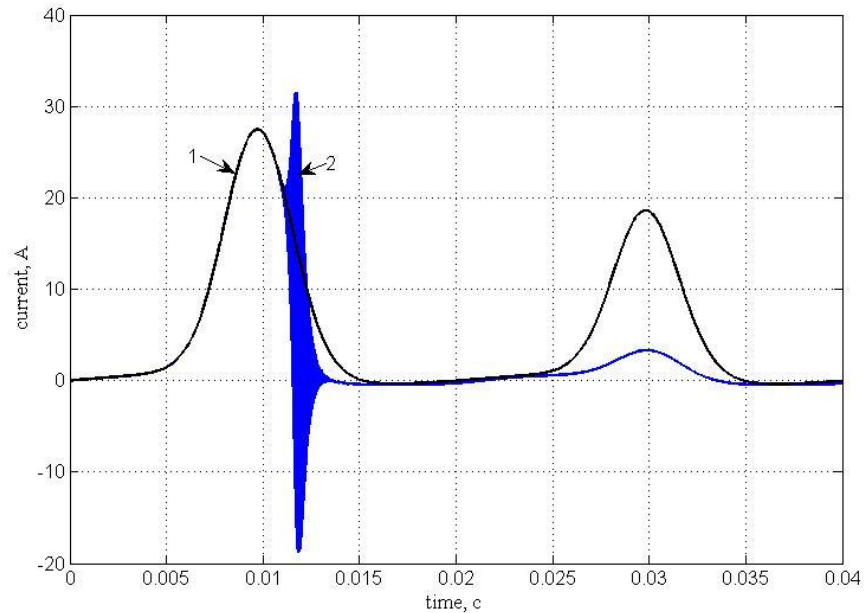


Рис. 6. 22. Графік струму первинної обвитки трансформатора:

$$1 - i_1(R_{H1}); 2 - i_1(R_{H2})$$

При подальшому збільшенні опору навантаження числовий розв'язок ставав розбіжним (рис. 6.23).

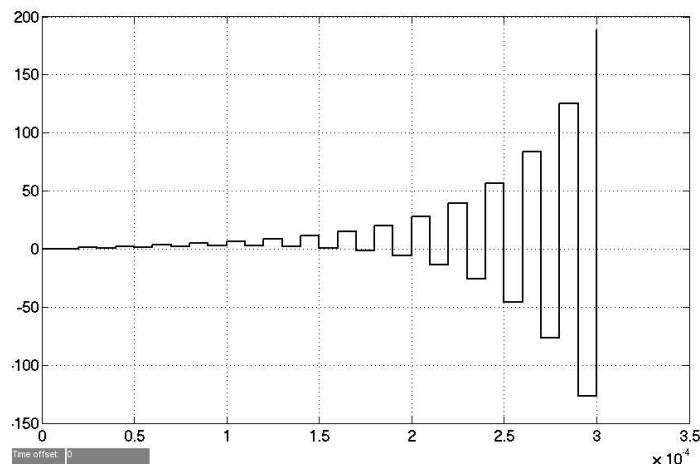


Рис. 6.23. Графік розбіжного розв'язку для струму трансформатора i_1

Розбиття модельованої системи на підсистеми в разі застосування

макромоделей визначається вибором вхідних і вихідних величин використовуваних макромоделей, що часто є невдалим. Поєднання відсутності безпосереднього впливу вхідних величин моделі на її вихідні величини і невдалого розбиття модельованої системи на підсистеми може стати причиною спотворення результатів розрахунку та виникнення нестійкості алгоритмів.

Для вирішення зазначеної проблеми доцільно змінити спосіб перетворення неперервної моделі в дискретну, як вже вказувалось вище, шляхом використання методу трапецій. Таким чином, неперервна макромодель, яка, зазвичай, подається у вигляді

$$\begin{cases} \dot{\vec{x}} = f(\vec{x}, \vec{v}) \\ \vec{y} = g(\vec{x}, \vec{v}) \end{cases}, \quad (6.47)$$

може вводитись у програму MATLAB/Simulink у формі таких дискретизованих співвідношень:

$$\begin{cases} \vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \Delta t \cdot f(\vec{x}_i, \vec{v}_i), \\ \vec{y}_{i+1} = g\left(\vec{x}_{i+1} + \frac{1}{2} \Delta t \cdot f(\vec{x}_{i+1}, \vec{v}_{i+1}), \vec{v}_{i+1}\right), \end{cases} \quad (6.48)$$

що дозволяє усунути проблеми нестійкості розрахунку в цьому середовищі.

Як показують числові експерименти, під час проведення розрахунків у середовищі Matlab/Simulink з використанням дискретних макромоделей також може виникати нестійкість числових алгоритмів.

Застосування неявного методу Ейлера чи методу трапецій для перетворення неперервної моделі в дискретну форму не дозволяє отримати явні вирази для рівнянь моделі й тому не вирішує поставленої задачі.

Для вирішення цієї проблеми пропонується альтернативний підхід до перетворення неперервної моделі в дискретну форму, який базується на поєднанні методу трапецій і явного методу Ейлера. Застосування пропонованого методу дозволяє отримати дискретні макромоделі, при застосуванні яких у середовищі MATLAB/Simulink суттєво покращується стійкість алгоритмів і точність отриманих результатів.

Аналогічні проблеми зі стійкістю розрахунків можуть виникати під час використання дискретних макромоделей, побудованих іншими методами, зокрема з використанням оптимізаційного підходу. Пропонований метод може також бути використаний для коригування таких моделей з метою покращення стійкості розрахунків з їхнім використанням.

6.8 Композиція математичних моделей і макромоделей у комп'ютерних середовищах

У попередніх розділах було показано способи адаптації дискретних математичних макромоделей у середовища MATLAB/Simulink та ATP. Проте, іноді виникає потреба у використанні непервних макромоделей [26, 112].

Засоби середовища MATLAB/Simulink дозволяють застосовувати математичні макромоделі як в дискретній, так і в неперервній формі. Композицію макромоделей окремих елементів з традиційною математичною моделлю ЕТС найпростіше здійснювати за допомогою рівнянь ємнісних перетинів. Для цього використовують рівняння ємнісного перетину, яке має вигляд

$$C_{\Pi} dU_{\Pi}/dt = \Pi_{\Pi}(\mathbf{i}_{\Pi_2}, \mathbf{i}_{\Pi_2})_t \quad (6.49)$$

де \mathbf{i}_{Π_1} – вектор–стовпець пов'язаних з ємнісним перетином струмів математичних моделей; \mathbf{i}_{Π_2} – вектор–стовпець пов'язаних з ємнісним перетином струмів макромоделей, Π_{Π} – перша матриця інциденцій віток елементів, які належать перетинам; $C_{\Pi} = \text{diag}(C_s)$ – блочно–діагональна квадратна матриця ємностей перетинів.

Запропонована форма композиції визначає вибір форми макромоделі, а саме вхідними сигналами повинні бути фазні напруги ємнісних перетинів, а вихідними – струми елементів, для яких будується макромодель. Узагальнена схема електричної системи для дослідження перехідних процесів на основі математичних моделей і макромоделей наведена на рис. 6. 24.

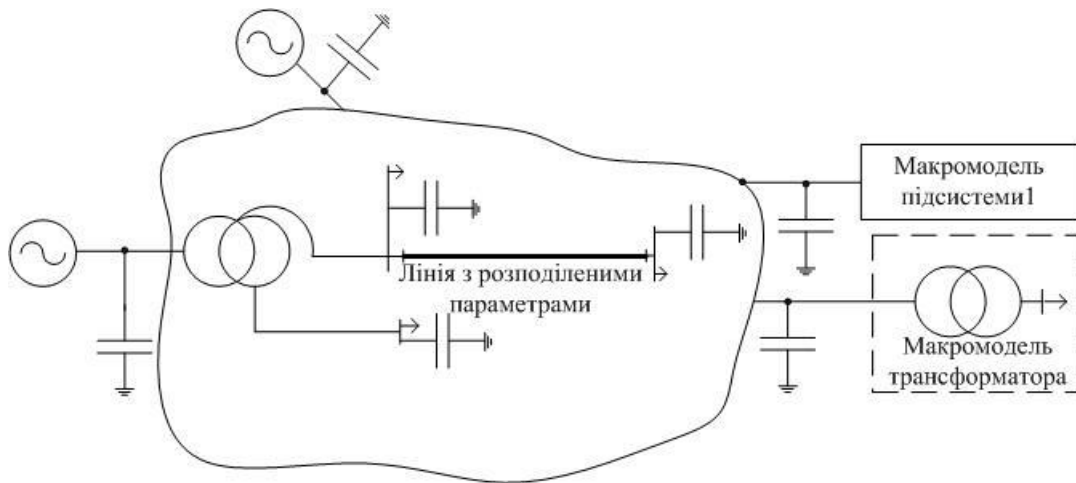


Рис. 6.24. Узагальнена схема електричної системи для дослідження перехідних процесів на основі математичних моделей і макромоделей

У середовищі Simulink дискретну макромодель можна безпосередньо сформулювати за допомогою підмоделі Subsystem шляхом програмування математичних виразів відповідних до структури нелінійної макромоделі, вхідними сигналами якої будуть фазні напруги ємнісних перетинів, а вихідними – струми макромоделі. У випадку лінійної макромоделі для її введення в модель складної системи доцільно використовувати готовий блок State-Space Block (елемент у просторі змінних стану з матрицями **A**, **B**, **C**, **D**) [26, 105].

Запропонована математична модель ETC є придатною для аналізу перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink і може містити в своїй структурі як математичні моделі, так і макромоделі окремих елементів. Вона може бути застосована також для збору достовірної апріорної інформації з метою побудови макромоделі складної системи. Модель може бути протестованою у різних режимах роботи для отримання достатнього набору експериментальних даних (занижена чи підвищена вхідна напруга, аварійні режими роботи тощо, що практично неможливо здійснити шляхом натурального експерименту) [114].

Здійснено дослідження електромагнітних перехідних процесів електропересильні “джерело живлення – силовий трансформатор – лінія електропересилання – автотрансформатор – навантаження” [26, 256, 260], зображеної на рис. 6.25. Математичну модель системи сформовано в

координатному базисі струмів і напруг віток електричних кіл, потокозчеплень і магнітних напруг віток магнітних кіл електромагнітних апаратів на підставі окремих моделей кожного елемента. Виконано комп'ютерне моделювання електропересильні в середовищі MATLAB/Simulink і отримано результати досліджень перехідних процесів [26].

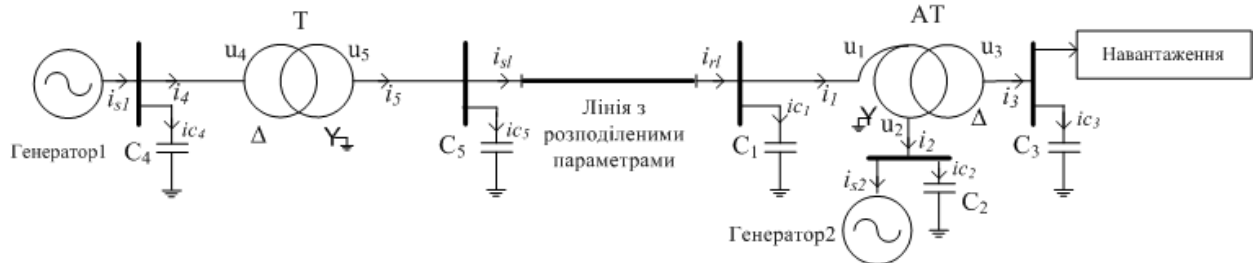


Рис. 6.25. Схема електропересильні

Для практичної побудови моделі електропересильні генератори можуть бути замінені еквівалентною ЕРС, яка діє за еквівалентним опором. Відповідно до наведених міркувань рівняння стану джерел живлення було записано у вигляді рівнянь лінійного електричного кола зі зосередженими параметрами:

$$\mathbf{e}_{sv} = \mathbf{R}_v \mathbf{i}_{sv} + \mathbf{L}_v \frac{d\mathbf{i}_{sv}}{dt} + \mathbf{u}_\mu, \quad (6.50)$$

де $\mathbf{e}_{sv}, \mathbf{i}_{sv}, \mathbf{u}_\mu$ – відповідно тривимірні вектори фазних ЕРС, струмів системи і напруг відповідних шин; ($v = 1, 2, \mu = 4, 2$);

$\mathbf{R}_1, \mathbf{L}_1$ – квадратні матриці третього порядку еквівалентних параметрів системи (резистивних опорів й індуктивностей);

$\mathbf{R}_v, \mathbf{L}_v$ – резистивні опори й індуктивності прямої послідовності відповідно;

$\Delta R_v, \Delta L_v$ – додаткові резистивний опір й індуктивність, які коригують параметри нульової послідовності заступної схеми джерела живлення.

Математичну модель автотрансформатора створено з врахуванням розділення магнітного потоку на основний і розсіяння з урахуванням нелінійних характеристик намагнічування та втрат активної потужності в елементах його магнітопроводу.

У матрично–векторному вигляді рівняння, записані в методі законів Кірхгофа для електричних кіл автотрансформатора, мають такий вигляд:

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 + \mathbf{L}_{\sigma 1} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} + \mathbf{k}_{12} \frac{d\psi_2}{dt} + \mathbf{M}_{21} \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + \mathbf{M}_{31} \frac{d\mathbf{i}_3}{dt} + \mathbf{u}_2, \quad (6.51)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \mathbf{L}_{\sigma 2} \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + \frac{d\psi_2}{dt} + \mathbf{M}_{12} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} + \mathbf{M}_{32} \frac{d\mathbf{i}_3}{dt} + \Delta \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_{02}}{dt} + \Delta \mathbf{R} \mathbf{i}_0, \quad (6.52)$$

$$\mathbf{e}_{sv} = \mathbf{R}_v \mathbf{i}_{sv} + \mathbf{L}_v \frac{d\mathbf{i}_{sv}}{dt} + \mathbf{u}_\mu, \quad (6.53)$$

$$i_{02} = i_{A2} + i_{B2} + i_{C2}, \quad (6.54)$$

де $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$ – вектор–стовпці фазних напруг і фазних струмів відповідно послідовної, спільної та трансформаторної обвитки АТ; \mathbf{i}_{02} – вектор–стовпець, компонентами якого є струм у нейтралі послідовної обвитки; ψ_2 – вектор–стовпець потокозчеплень фаз спільної обвитки від основного магнітного потоку; $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3, \mathbf{L}_{\sigma 1}, \mathbf{L}_{\sigma 2}, \mathbf{L}_{\sigma 3}$ – діагональні матриці резистивних опорів та власних індуктивностей розсіяння відповідно послідовної, спільної та трансформаторної обвитки АТ; $\mathbf{M}_{12}, \mathbf{M}_{13}, \mathbf{M}_{23}$ – діагональні матриці взаємних індуктивностей відповідно між послідовною, спільною й трансформаторною обвитками АТ; $\Delta \mathbf{R}, \Delta \mathbf{L}$ – діагональні матриці елементами яких є коригувальні опір й індуктивність, які враховують відмінність параметрів АТ для прямої та нульової послідовностей; $k_{12} = w_1/w_2$; $k_{23} = w_3/w_2$ – коефіцієнти трансформації між спільною та послідовною, спільною й трансформаторною обвитками; \mathbf{A} – матриця перетворень фазних напруг трансформаторної обвитки в лінійні.

Електромагнітні процеси, які відбуваються в баках АТ і трансформаторів враховано шляхом уведення додаткового електричного контуру

$$R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + k_{b2} \frac{d\psi_{02}}{dt} = 0, \quad (6.55)$$

де L_b, R_b, w_b – еквівалентні параметри заступної схеми бака АТ; i_b – струм у провідному контурі бака АТ; $k_{b2} = w_b/w_2$ – коефіцієнт трансформації між

загальною обвиткою і баком; Ψ_{02} – зведене до спільної обвитки поточкозчеплення від магнітного потоку поза магнітопроводом:

$$\Psi_{02} = \Psi_{A2} + \Psi_{B2} + \Psi_{C2}. \quad (6.56)$$

Для коректного врахування втрат активної потужності в магнітопроводі заступну схему електричного кола автотрансформатора доповнено додатковими електричними контурами, які складаються з обвиток без індуктивностей розсіювання й кількістю витків w_2 з послідовно ввімкненими резисторами. Рівняння цих контурів має такий вигляд

$$\frac{d\Psi_2}{dt} - \mathbf{R}_{st}\mathbf{i}_{st} = 0, \quad (6.57)$$

де \mathbf{R}_{st} – діагональна матриця третього порядку резистивних опорів, які враховують втрати активної потужності фази магнітопроводу;

\mathbf{i}_{st} – вектор-стовпець зведених до спільної обвитки струмів додаткових електричних контурів для врахування втрат активної потужності в сталі магнітопроводу.

Рівняння стану магнітопроводу АТ набуде вигляду:

$$\mathbf{i}_{st} + k_{12}\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 + k_{23}\mathbf{i}_3 + k_{2b}\mathbf{i}_b = \mathbf{f}(\Psi_2) + \mathbf{R}_{m0}\Psi_{02}, \quad (6.58)$$

де \mathbf{i}_{st} – вектор-стовпець зведених до спільної обвитки струмів додаткових контурів; $\mathbf{f}(\Psi_2)$ – вектор-стовпець спадів зведених до спільної обвитки магнітних напруг фаз основного магнітного потоку; \mathbf{R}_{m0} – діагональна матриця зведених до первинної обвитки магнітних опорів оливних і повітряних проміжків і баку.

Математична модель трифазного тристрижневого трансформатора [204, 205] може бути створена на підставі запропонованої моделі автотрансформатора шляхом вилучення рівнянь електромагнітного стану послідовної обвитки, а саме:

$$\mathbf{u}_4 = \mathbf{R}_4\mathbf{i}_4 + \mathbf{L}_{\sigma 4} \frac{d\mathbf{i}_4}{dt} + \frac{d\Psi_4}{dt} + \mathbf{M}_{45} \frac{d\mathbf{i}_5}{dt} + \Delta\mathbf{R}\mathbf{i}_{04} + \Delta\mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_{04}}{dt}, \quad (6.59)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{u}_5 = \mathbf{R}_5\mathbf{i}_5 + \mathbf{L}_{\sigma 5} \frac{d\mathbf{i}_5}{dt} + \mathbf{k}_{45}^{-1} \frac{d\psi_4}{dt} + \mathbf{M}_{54} \frac{d\mathbf{i}_4}{dt}, \quad (6.60)$$

$$i_{04} = i_{A4} + i_{B4} + i_{C4}, \quad (6.61)$$

$$\Psi_{04} = \Psi_{A4} + \Psi_{B4} + \Psi_{C4}, \quad (6.62)$$

$$\frac{d\psi_4}{dt} - \mathbf{R}_{st}\mathbf{i}_{st} = 0, \quad (6.63)$$

$$\mathbf{i}_{st} + \mathbf{i}_4 + \mathbf{k}_{4b}^{-1}\mathbf{i}_5 + k_{ab}^{-1}\mathbf{i}_b = \mathbf{f}(\psi_4) + \mathbf{R}_{m0}\Psi_{04}, \quad (6.64)$$

де \mathbf{u}_4 , \mathbf{u}_5 , \mathbf{i}_4 , \mathbf{i}_5 – вектор–стовпці фазних напруг і фазних струмів відповідно первинної, та вторинної обвитки трансформатора; \mathbf{i}_{04} – вектор–стовпець, компонентами якого є струм у нейтралі послідовної обвитки; ψ_4 – вектор–стовпець потокозчеплень фаз первинної обвитки від основного магнітного потоку; \mathbf{R}_4 , \mathbf{R}_5 , $\mathbf{L}_{\sigma 4}$, $\mathbf{L}_{\sigma 5}$ – діагональні матриці резистивних опорів та власних індуктивностей розсіяння відповідно первинної та вторинної обвитки; \mathbf{M}_{45} – діагональна матриця взаємних індуктивностей між первинної й вторинною обвиткою трансформатора; $\Delta\mathbf{R}$, $\Delta\mathbf{L}$ – діагональні матриці елементами яких є коригувальні опір й індуктивність, які враховують відмінність параметрів АТ для прямої та нульової послідовностей; $k_{45} = w_5/w_4$ – коефіцієнт трансформації між первинною та вторинною обвитками; \mathbf{A} – матриця перетворень фазних напруг вторинної обвитки в лінійні.

Для побудови моделі електропересильні використано математичну модель лінії електропересилання в методі біжучих хвиль з врахуванням ненульових початкових умов, детально описану в [27].

У моделі математичну модель лінії електропересилання в фазних координатах запишемо у вигляді:

$$\mathbf{i}_{sl}(t) = \mathbf{Z}_c^{-1}(\mathbf{F}^{-1}\mathbf{u}_5(t) - [\mathbf{F}^{-1}\mathbf{u}_1(t - \tau) + \mathbf{Z}_c\mathbf{i}_{rl}(t - \tau)]e^{-\alpha\tau} - \mathbf{F}^{-1}\mathbf{u}(0)[\mathbf{1} - \mathbf{1}(t - \tau)]e^{-t\alpha}), \quad (6.65)$$

$$\mathbf{i}_{rl}(t) = \mathbf{Z}_c^{-1}(-\mathbf{F}^{-1}\mathbf{u}_1(t) + [\mathbf{F}^{-1}\mathbf{u}_5(t - \tau) + \mathbf{Z}_c\mathbf{i}_{sl}(t - \tau)]e^{-\alpha\tau} + \mathbf{F}^{-1}\mathbf{u}(0)[\mathbf{1} - \mathbf{1}(t - \tau)]e^{-t\alpha}), \quad (6.66)$$

де \mathbf{F} – матриця перетворення Кларка параметрів координат процесу лінії з

фазних координат у $\alpha, \beta, 0$ координати; $e^{-\alpha\tau}$ – матриця коефіцієнтів загасання електромагнітних хвиль; τ – вектор–стовпець тривалості поширення електромагнітних хвиль вздовж лінії; $\mathbf{1}(t - \tau)$ – вектор–стовпець одиничних функцій Гевісайда.

Рівняння електромагнітного стану навантаження для побудови моделі має вигляд:

$$\mathbf{u} = \mathbf{L}_n \frac{d\mathbf{i}_n}{dt} + \mathbf{r}_n \mathbf{i}_n, \quad (6.67)$$

де \mathbf{u} , \mathbf{i}_n – відповідно тривимірні вектори фазних напруг і струмів навантаження, \mathbf{L}_n , \mathbf{r}_n – відповідно діагональні матриці еквівалентних індуктивностей і опорів заступної схеми навантаження.

За необхідності навантаження може бути враховане детальніше.

Композицію моделей структурних елементів здійснено на ємнісних перетинах заступних схем електричних кіл, загальне матрично–векторне рівняння яких для трифазних елементів має такий вигляд:

$$\mathbf{C}_s \frac{d\mathbf{u}_{ns}}{dt} = \mathbf{P}_s \mathbf{i}_{cs}; \quad s = \overline{1,5}, \quad (6.68)$$

де \mathbf{u}_{ns} – вектор–стовпець фазних вузлових напруг s -го ємнісного перетину; \mathbf{i}_c – вектор–стовпець струмів віток елементів, які примикають до цього перетину; \mathbf{P}_s – перша матриця інциденцій віток елементів, які належать s -му перетину; \mathbf{C}_s – квадратна матриця ємностей s -го перетину.

Для формування математичної моделі електричної системи отримані диференційні рівняння перетворено в інтегральні й відображено за допомогою вбудованих операторів математичних дій.

Математичні моделі автотрансформатора, трансформатора й лінії електропередачі введені в середовище Simulink як його підмоделі. Узагальнена структурна схема для моделювання перехідних процесів електропередачі наведена на рис. 6.26.

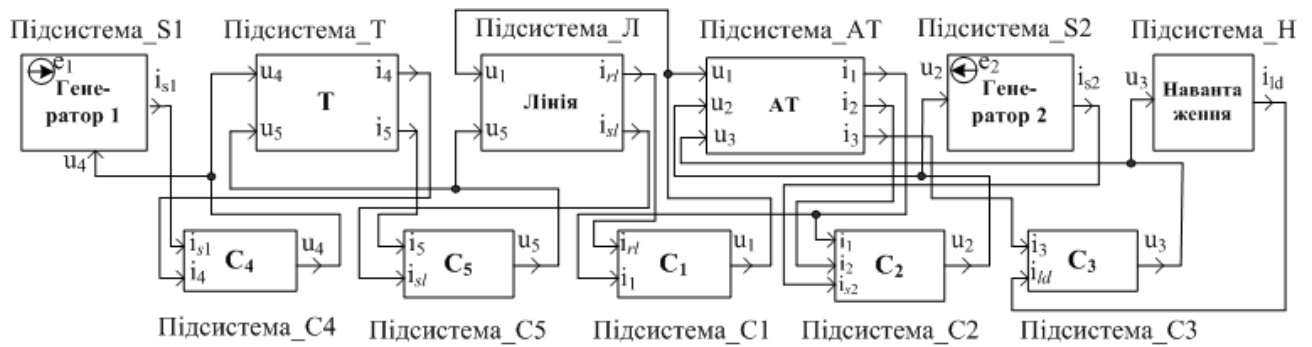


Рис. 6.26. Структурна схема моделювання перехідних процесів електропересильні в середовищі Simulink

На практиці в середовищі MATLAB/Simulink реалізовано модель електропересильні у вигляді “джерело живлення–лінія електропересилання – автотрансформатор – навантаження”. Параметри лінії електропересилання наступні: $U=230$ кВ, параметри лінії: $l= 550$ км, $L=951.7 \cdot 10^{-6}$ Н Гн /км, $C=11.905 \cdot 10^{-9}$ Ф/км, $Z_{\alpha,\beta}=282.74$ Ω , $\tau_{\alpha,\beta}=0.00185$ с, $\tau_0= 0.0029$ с, $Z_0=2,2$ $Z_{\alpha,\beta}=622.028$ Ом. Паспортні дані автотрансформатора: $U_1=230$ кВ, $U_2=121$ кВ, $U_3=38.5$ кВ, $W_1=916$, $W_2=1016$, $W_3=560$, $r_1=1.3$ Ом, $r_2=0.84$ Ом, $r_3=0.3$ Ом, $L_{\sigma 1}=0.474$ Гн, $L_{\sigma 2}=0.295$ Гн, $L_{\sigma 3}=0.0526$ Гн, $M_{12}=0.258$ Гн, $M_{13}=0.0757$ Гн, $M_{23}=0.0925$ Гн, $k_{12}=0.902$, $k_{22}=1$, $k_{23}=0.5512$, $r_{st}=12500$ Ом.

На підставі розробленої математичної моделі виконано симулювання перехідних процесів електропересильні “джерело живлення–лінія електропересилання –автотрансформатор – навантаження”. На рис. 6.8 і 6.9 зображено процеси після вмикання ЕРС з нульовими початковими умовами (ненавантажений режим).

Запропонована модель електропересильні придатна для дослідження перехідних процесів в комутаційних і аварійних режимах. Це підтверджується дослідженням перехідних процесів і режимів автотрансформатора, трансформатора та лінії електропересилання як окремих елементів. Перевагами запропонованої моделі є її універсальність, готовність до доповнення чи заміни її блоків математичними макромоделями у вигляді "чорної скриньки" у формі змінних стану.

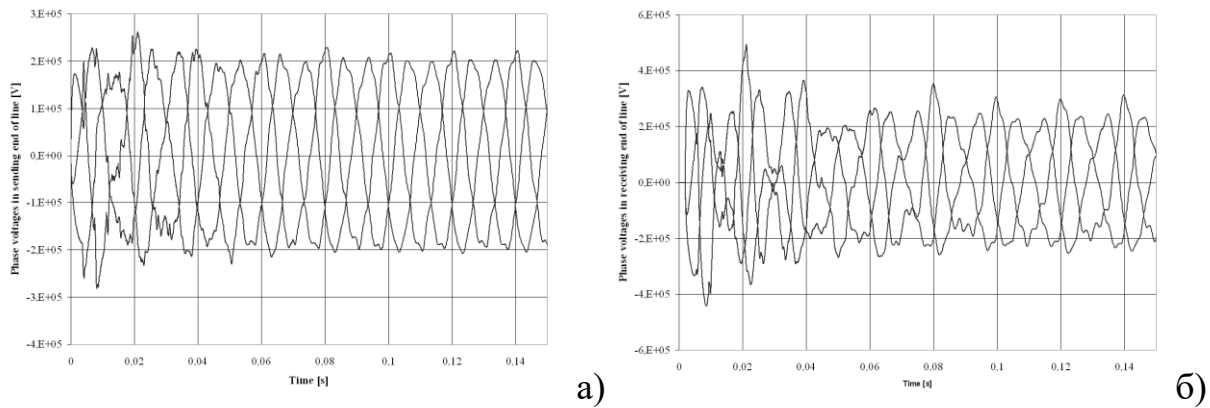


Рис. 6.8. Фазні напруги на початку (а) та в кінці (б) трифазної лінії електропередавання.

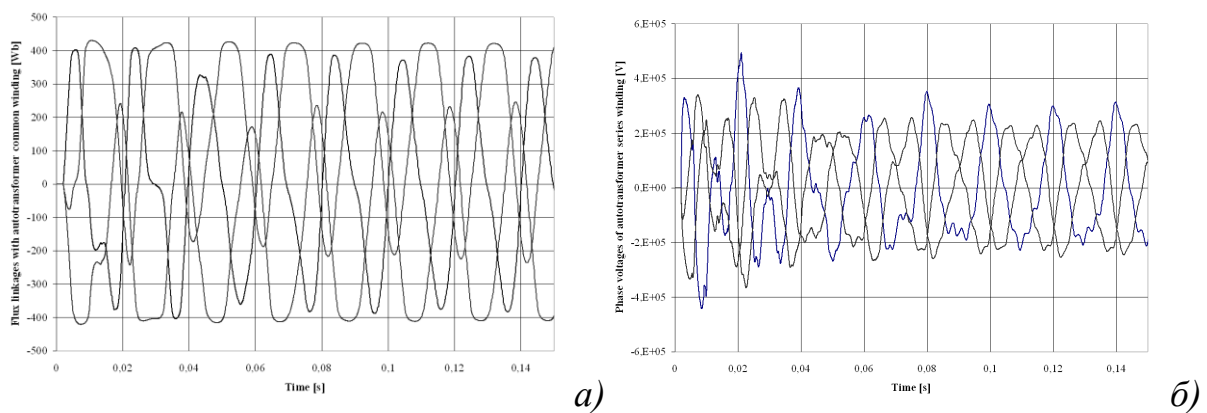


Рис. 6.9. Потокозчеплення (а) та фазні напруги (б) трансформаторної обвитки автотрансформатора

Отримана модель є придатною для отримання наборів перехідних характеристик як апіорної інформації для побудови дискретних макромоделей у вигляді "чорної скриньки".

Висновки до розділу 6

1. Розглянуто проблеми адаптації дискретних макромоделей до комп'ютерних середовищ моделювання перехідних процесів, запропоновано рекомендації та способи їх реалізації в середовищах MATLAB/Simulink та ATP.

2. Описано особливості адаптації макромоделей елементів електротехнічних систем до середовища MATLAB/Simulink на основі використання програмованих блоків S-функцій.

3. Описано особливості адаптації макромоделей елементів електротехнічних систем до середовища ATP/EMTP на основі використання програмованих блоків цього середовища та їх програмування на мові MODELS.

4. Вперше адаптовано дискретну макромодель лінії електропередавання до середовища MATLAB/Simulink, що дозволило виконати дослідження динамічних режимів ЕТС у вигляді “джерело живлення-лінія електропередавання навантаження” на її основі.

5. Вперше адаптовано дискретну макромодель трансформатора до середовища ATP, що дозволило виконати дослідження динамічних режимів електричного кола у вигляді “джерело живлення-трансформатор-навантаження” на її основі.

6. Подано практичні рекомендації щодо сумісного застосування математичних моделей та макромоделей у середовищах MATLAB/Simulink та ATP.

РОЗДІЛ 7

ЗАСТОСУВАННЯ МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕГОСПОЖИВАННЯ

7.1 Прогнозування енергоспоживання та методи його реалізації

Оптимального розвиток ЕЕС забезпечують три аспекти: планування, прогнозування та функціонування. В умовах ринку електроенергії на точність прогнозів електроспоживання впливають як технологічні, так економічні показники енергосистеми. Ефективність управління є однією з основних умов для успішного функціонування підприємств. Це досягається, зокрема, плануванням і контролем розподілу електроенергії та прогнозуванням електроспоживання.

Прогнозування електричного навантаження забезпечує основну інформацію для прийняття рішень під час керування електротехнічними системами та планування їх нормальних режимів. Усі електричні мережі характеризуються частими змінами навантаження, які можуть мати як добовий чи сезонний характер, так і випадковий – тобто залежати від потреб споживання, і змінюватися протягом короткого проміжку часу [2, 11, 12, 150, 290]. У зв'язку з цим виникають значні проблеми зі забезпеченням споживачів електроенергією, розробленням систем моніторингу та прогнозування навантаження.

На основі прогнозування навантаження розраховують початкові й оптимальні режими електроенергетичних систем і їхні техніко-економічні показники тощо.

Навантаження ліній електропередачі залежить від обсягу споживання електроенергії. У випадку перевантаження ЛЕП може вийти з ладу, що викличе важкі наслідки для енергосистеми. Стале постачання комунальної сфери та промислових підприємств електроенергією зумовлює необхідність надійного захисту ліній електропередачі від аварій, і тому прогнозування електропостачання в цьому аспекті є також важливою задачею енергетики.

Функціонування енергосистем можливе лише за умови неперервності технологічного процесу виробництва, пересилання та використання електричної енергії. Ефективне керування виробництвом електроенергії та раціональне використання енергоресурсів можливе на підставі прогнозів її споживання.

Розрізняють три основні види прогнозування:

- 1) довготермінове прогнозування, яке використовується для передбачення енергоспоживання системи на довготривалі терміни;
- 2) середньотермінове прогнозування, що застосовується для передбачення енергоспоживання на тижневий, місячний чи річний період;
- 3) короткотермінове прогнозування, що застосовується для передбачення навантаження на однодобовий чи кількาดобовий період.

Переважає більшість праць, присвячених прогнозуванню електричного навантаження, не враховує склад, специфіку й технологічні особливості електроспоживачів, а також багаторівневу структуру енергоспоживання, що зумовлює необхідність розроблення комплексного підходу до розв'язання цієї проблеми [2, 11, 70, 75].

Досі прогнозування енергоспоживання, зазвичай, здійснюється на основі методу експертного оцінювання, що не може забезпечити необхідну точність прогнозу. Точне прогнозування електроспоживання сприятиме оптимальному розподілу навантаження між споживачами.

Більшість алгоритмів прогнозування енергоспоживання є комбінацією різноманітних статистичних процедур. Існують методи прогнозування в яких виділяється базова та змінна складові навантаження. Крім цього, також застосовують методи, в яких зміна навантаження розглядається як випадковий процес. Важливим також є той факт, що наявні методи прогнозування не можуть функціонувати з неповними та зашумленими даними, в той час як саме вони і, мають такий характер. Проте, передбачення електричного навантаження базується на врахуванні певних відомих властивостей прогнозованого процесу.

Слід зазначити, що змінам навантаження енергосистем може бути притаманний випадковий характер. Унаслідок природних змін навантаження та впливу стохастичних факторів періодичність у графіках навантаження відсутня. Таким чином, застосування деяких методів зумовлює виникнення значних похибок в оцінюванні прогнозованих величин, а інші через труднощі математичних методів не отримали широкого застосування для розв'язування практичних задач електроенергетики.

Постановка та розв'язання задачі прогнозування електричного навантаження традиційними способами складається з двох етапів [39]:

- 1) побудова математичної моделі, за допомогою якої обробляються дані про навантаження за минулий період часу;
- 2) отримання прогнозу на основі отриманої моделі.

Для виконання умови достовірності й адекватності математичні моделі, призначені для прогнозування енергоспоживання, повинні враховувати:

- 1) передісторію системи (інформацію про стан системи, який передую моделюванню);
- 2) зміни астрономічних факторів (коливання світлової тривалості доби), що спричиняють зміни астрономічної складової електричного навантаження;
- 3) вплив зовнішніх факторів і атмосферних проявів;
- 4) вплив сезонності навантаження мережі та тривалості робочого дня;
- 5) структурні зміни в промисловому навантаженні;
- 6) соціальні та політичні фактори.

Залежно від застосовуваного методу прогнозування енергоспоживання може бути змодельоване як детермінований процес чи процес з імовірнісним характером електроспоживання. Тому математичні методи можна розділити на три групи: аналітичного прогнозування, ймовірнісного прогнозування та методи статистичної класифікації [1, 11, 159, 160].

Існує низка методів і моделей, призначених для прогнозування навантаження [22, 38, 39, 150, 251], а саме:

- 1) моделі 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 [100] й інші;
- 2) причинно-наслідкові моделі, де навантаження моделюється як функція деяких екзогенних факторів (на основі передатних функцій Бокса й Дженкінса), оптимізаційні моделі та моделі непараметричної регресії) [247].

Пропонується загальна класифікація моделей, призначених для вирішення задачі прогнозування енергоспоживання, яка враховує види моделей, детально проаналізовані в [11, 39, 70, 148, 153, 160], а також [171, 206, 254] наведена на рис. 7. 1.

На практиці найбільш широкого використання набули лінійні регресійні моделі та моделі, які розподіляють навантаження на базову (регулярну) й залежну від погоди складові. Однак, вони є, зазвичай, лінійними моделями, однак ряди навантажень є нелінійними функціями зовнішніх змінних. У праці [148] описано побудову ієрархічної багатофакторної математичної моделі електричного навантаження для вирішення задачі короткотермінового прогнозування з метою коректнішого врахування впливу астрономічних і метеорологічних факторів.

Ефективність застосовуваних до прогнозування підходів може бути перевірена шляхом оцінювання найменшої похибки прогнозування, працездатності алгоритму за умови неповної інформації та його завадостійкості. Саме тому розроблення нових підходів, методів і алгоритмів для прогнозування енергоспоживання, які б враховували розмаїття неточних чи неповних даних, сьогодні є актуальною науковою та прикладною проблемою. Розроблена математична модель навантаження повинна точно математично представити взаємозв'язок між енергоспоживанням і факторами, які на нього впливають (час, погода, економічні фактори тощо) й тому важливо вибрати відповідні математичні методи залежно від виду прогнозування.



Рис. 7.1. Класифікація моделей прогнозування енергоспоживання

Серед розроблених моделей із використанням рядів для прогнозування широкого застосування набули [11, 38, 39, 252]: метод ковзного середнього, авторегресійні моделі, метод експонентного згладжування.

Метод ковзного середнього може бути використаний у вигляді двох модифікацій, а саме методу простого ковзного середнього та методу зваженого ковзного середнього. Суть методу простого ковзного середнього полягає у тому, що прогнозоване енергоспоживання може бути розраховане як його усереднене значення за декілька попередніх часових відліків утакому вигляді:

$$f_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{k-i}, \quad (7.1)$$

де f_k – прогноз енергоспоживання на момент часу t_k , N – кількість попередніх часових моментів, використаних під час розрахунку, x_{k-1} – реальне значення показника енергоспоживання в момент часу t_{k-1} .

Метод зваженого ковзного середнього дозволяє врахувати той факт, що дані за попередні часові інтервали мають неоднаковий вплив на результуючий показник енергоспоживання. Результатне енергоспоживання може бути розраховане з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$f_k = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_{k-1} x_{k-i}}{\sum_{i=1}^N \omega_{k-1}}, \quad (7.2)$$

де ω_{k-1} – ваговий коефіцієнт показника x_{k-1} .

Перевагою застосування цього методу є те, що під час визначення ковзних середніх зменшується вплив випадкових відхилень прогнозованих значень, оскільки значення динамічного ряду показників замінюється середніми арифметичними всередині вибраного часового інтервалу. До недоліків методу можна віднести неможливість урахування специфіки даних і динаміки коливань часових значень. За малої кількості спостережуваних значень можна отримати спотворений результат прогнозування спостережуваної величини.

Авторегресійні моделі – це моделі часових рядів у яких значення часового ряду в даний момент лінійно залежать від попередніх значень того ж ряду [1, 70]. За допомогою авторегресійних моделей можна моделювати сезонність енергоспоживання. У цьому разі кількість коефіцієнтів моделі відповідатиме кількості циклічно змінних факторів, які приймаються до уваги. Авторегресійний процес порядку p визначається таким чином:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (7.3)$$

де a_1, \dots, a_p – параметри моделі (коефіцієнти авторегресії), c – стала (часто для спрощення її приймають рівною нулеві), а ε_t – білий шум.

З метою прогнозування навантаження доцільно застосовувати таку форму авторегресійної моделі :

$$L(t, d) = \sum_{k=1}^4 a_k L_k(t, d), \quad (7.4)$$

де a_k – лінійні ваги, які забезпечують оптимальну комбінацію чотирьох окремих прогнозів, $L_1(t, d)$ – прогноз $L(t, d)$ на основі авторегресійної моделі першого порядку з затримкою на 1 годину, $L_2(t, d), L_3(t, d), L_4(t, d)$ – те ж саме з затримкою в одну добу, тиждень і рік відповідно. За умови застосування цього методу середньоквадратична похибка добового прогнозування електричного навантаження не перевищують 4 % [70].

Метод експонентного згладжування, що може застосовуватися для прогнозування погодинного навантаження. У випадку розрахунку за цим методом застосовується формула

$$f_k = f_{k-1} + l(x_{k-1} - f_{k-1}), \quad (7.5)$$

де l – стала згладжування, деяке число з інтервалу $(0;1)$, яке визначає міру згладжування, f_{k-1} – прогноз енергоспоживання на момент часу t_{k-1} , x_{k-1} – реальне значення показника енергоспоживання в момент часу t_{k-1} .

Визначальний вплив під час застосування цього методу має правильність вибору прогнозу f_1 в перший використаний часовий відлік і сталої згладжування l . Вибір початкових даних залежить від досвіду виконавця та наявності вхідних даних. Стала згладжування вибирається емпіричним шляхом, що базується на послідовному наближенні прогнозу енергоспоживання до реальних даних.

Новими підходами, що застосовуються для вирішення проблеми прогнозування є методи нечіткої логіки та нейронних мереж (чи їх поєднання у вигляді нечітких нейронних мереж). Вони передбачають використання

апріорної інформації та дозволяють урахувати нові дані під час побудови моделі та властивості модельованого процесу [202].

Метод нейронних мереж піддається навчанню та є достатньо наочним для спостерігача. Основним елементом нейронної мережі є штучний нейрон. Штучні нейронні мережі є множиною сполучених і взаємодійних між собою штучних нейронів, для працездатності яких необхідно виконувати процедуру навчання. Нейронні мережі здатні виявляти складні залежності між вхідними та вихідними даними й виконувати узагальнення наявних, проте прихованих, властивостей і взаємозв'язків. Саме з цього випливає здатність навченої нейронної мережі до прогнозування, передбачати майбутнє значення певної послідовності на основі декількох попередніх значень чи наявних у даний момент факторів [153]. Такий спосіб застосування нейронних мереж для прогнозування енергоспоживання буде працездатним навіть за умови неповної вхідної інформації.

Застосування систем з нечіткою логікою, кі чітко не визначають їхню належність до певної множини, дозволяє усунути недоліки штучних нейронних мереж. Моделювання зі застосуванням нечітких множин є доцільним у разі дослідження складної технічної системи чи процесу, а також неможливості адекватно інтерпретувати апріорну інформацію й, зазвичай, неможливості застосування відомих кількісних методів.

Нечітка нейронна мережа є одним з видів штучного інтелекту, що поєднує у собі основні властивості, притаманні нейронним мережам і системам з нечіткою логікою. Існує значна кількість програмних комплексів, які надають можливості формування моделей прогнозування на базі штучних нейронних мереж. У середовищі MATLAB/Simulink наявний модуль Neural Network Toolbox, призначений для створення та навчання нейронних мереж, який може використовуватись для прогнозування навантаження.

Однак точне моделювання на основі всіх перерахованих методів є утрудненим через нелінійні та складні співвідношення між навантаженнями, випадкові впливи й інші фактори, від яких воно залежить. У зв'язку з цим

пропонується використання методу макромодельовання як альтернативний засіб вирішення задачі прогнозування навантаження з можливістю врахування всіх факторів, що складно піддаються врахуванню та математичному описанню в традиційних моделях.

7.2. Автономні макромоделі як засіб прогнозування енергоспоживання

Побудова макромоделі енергоспоживання здійснюється за декілька етапів (рис. 7.2), алгоритм побудови якої є складовою універсального алгоритму побудови макромоделей, поданого на рис. 2.1. На першому етапі здійснення процедури прогнозування передбачається реєстрація, збирання й оброблення даних про енергоспоживання певного об'єкту.

Реєстрація даних здійснюється за допомогою сучасних апаратно-вимірювальних комплексів (SCADA), що передбачає їхню фіксацію та зберігання протягом тривалого періоду часу. Системи SCADA чи їхні аналоги, що забезпечують швидке збирання інформації й облік електроенергії, впроваджені на усіх електроенергетичних підприємствах України.

Як засіб моніторингу стану енергосистеми комплекси SCADA дозволяють здійснювати обмін даними між пристроями зв'язку й об'єктом, виконувати оброблення інформації в реальному часі, вести базу даних реального часу з технологічною інформацією та забезпечувати екстренні повідомлення в разі аварійної ситуації.

З погляду використання даних для подальшого математичного моделювання станів чи параметрів електроенергетичних систем такі комплекси дозволяють генерувати звіти про збережені дані та хід технологічного процесу, а також здійснювати пересилання даних і забезпечувати зв'язок зі зовнішніми редакторами масивів даних.

Попереднє оброблення даних передбачає вибір періоду часу, для якого здійснюється прогнозування та періоду для подальшої верифікації даних, а також фільтрацію в разі їх значної кількості з метою вибору форми моделі та спрощення процедури прогнозування (рис. 7. 2).

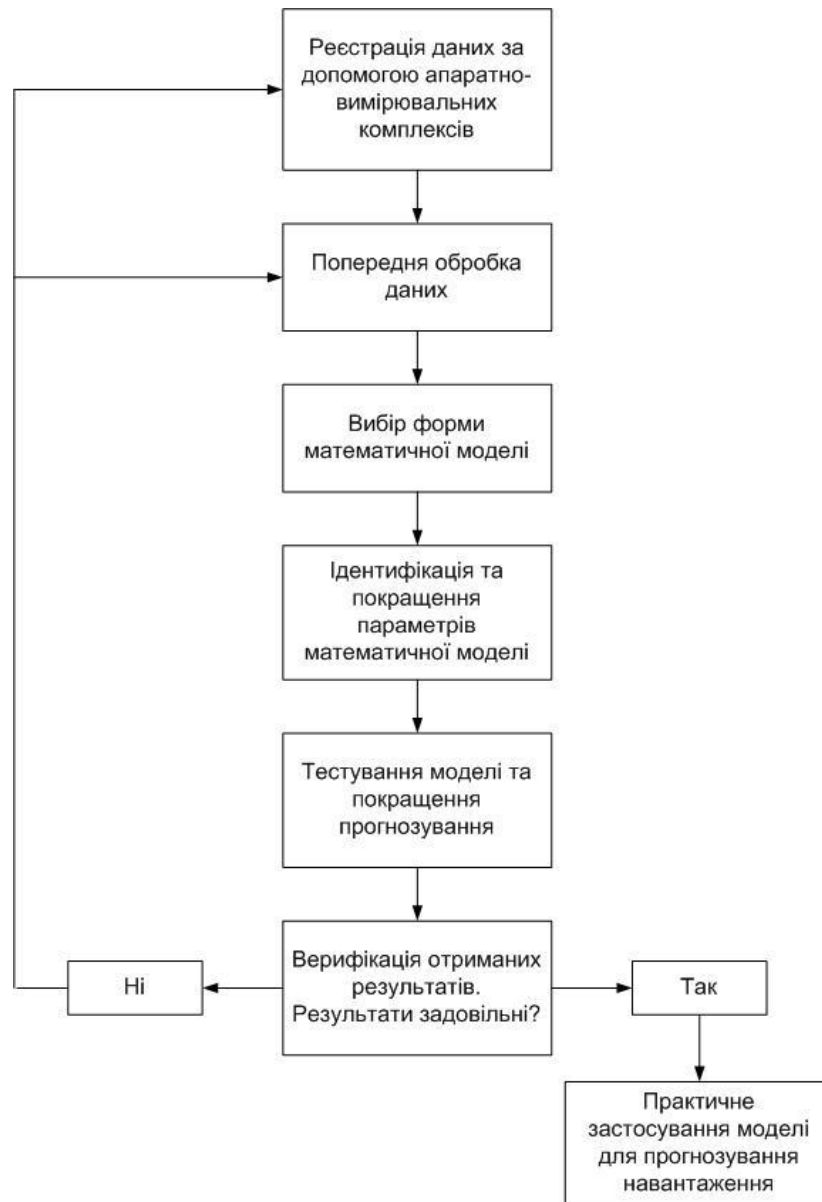


Рис. 7. 2. Алгоритм побудови макромоделі для прогнозування навантаження

Тому, під час вибору форми моделі альтернативою може стати математичне макромодельовання з використанням дискретних автономних макромоделей у вигляді "чорної скриньки".

Таке моделювання здійснюється на основі аналізу реєстрованих характеристик споживання енергії та його взаємозв'язку зі структурою досліджуваного об'єкту шляхом використання диференціальних чи різницевих рівнянь стану у вигляді [125]:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}), \\ \vec{y} = \vec{g}(\vec{x}) \end{cases}, \quad (7.6)$$

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \vec{f}(\vec{x}^{(k)}) \\ \vec{y}^{(k+1)} = \vec{g}(\vec{x}^{(k)}) \end{cases} \quad (7.7)$$

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

Роз'язок рівнянь (7.6) і (7.7) залежить від початкових значень змінних стану $\vec{x}(0) = \vec{x}_0$. У такому разі початкові значення змінних стану вводяться в модель як певні збурення, які зумовлюють однозначно визначений динамічний процес $\vec{x}(t)$ чи $\vec{x}^{(k)}$, на основі якого можна ідентифікувати параметри та структуру відповідних рівнянь (7.6) та (7.7), що описують відповідну динамічну систему. Макромодель у такій формі, яка враховує певний початковий стан динамічної системи, є зручною для прогнозування енергоспоживання протягом різних часових інтервалів. Однак, незалежно від їх тривалості, необхідною умовою є сталість параметрів системи в часі.

Такий підхід через відсутність вектора вхідних впливів набув назви "автономного макромодельовання", а самі моделі можна назвати автономними макромоделями. 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:

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(k)} + \Phi(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}), \\ \vec{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(k+1)}, \end{cases} \quad (7.8)$$

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

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 врахувати 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 запропонованої 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 треба 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:

$$\vec{x}^{(0)} = \vec{f}(\vec{y}^{(1)}, \vec{y}^{(2)}, \dots, \vec{y}^{(l)}) \quad (7.9)$$

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 $\vec{x}^{(0)}$, додані до набору невідомих коефіцієнтів $\vec{\lambda}$, необхідно замінити на коефіцієнти виразу (7.9), тобто фактично ввести цей вираз у макромодель, яку ще потрібно побудувати. Якщо модель має вигляд (7.8), то отримаємо:

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = \mathbf{F}\vec{x}^{(k)} + \vec{\Phi}(\vec{x}^{(k)}), \\ \vec{y}^{(k+1)} = \mathbf{C}\vec{x}^{(k+1)}, \\ \vec{x}^{(0)} = \vec{f}(\vec{y}^{(1)}, \vec{y}^{(2)}, \dots, \vec{y}^{(l)}). \end{cases} \quad (7.10)$$

Альтернативним методом до ідентифікації співвідношення (7.9) є підбір оптимального вектора $\bar{x}^{(0)}$ для наявних значень вектора \vec{y} , що дає змогу знайти оптимальне початкове значення вектора змінних стану на основі наявних даних. На практиці оптимальний вектор $\bar{x}^{(0)}$ знаходять шляхом оптимізації, уточнюючи його значення в процесі надходження нових даних.

Таким чином, зважаючи на особливості реєстрації первинних експериментальних даних і вибір математичного методу для побудови моделі енергоспоживання, процедура побудови та верифікації автономної макромоделі досліджуваного об'єкту може здійснюватися за шість етапів:

- 6) реєстрація характеристик режимів і процесів за допомогою апаратно-вимірювальних комплексів, їх систематизація та зберігання;
- 7) вибір набору експериментальних даних і форми макромоделі, яка б достатньо точно описувала об'єкт моделювання;
- 8) вибір незалежних початкових умов і створення лінійної макромоделі шляхом оптимізації її коефіцієнтів;
- 9) доповнення лінійної макромоделі нелінійною функцією спеціального виду;
- 10) проведення остаточної оптимізації макромоделі, де процедурі оптимізації підлягають усі коефіцієнти;
- 11) перевірка остаточної макромоделі як відгук на сигнали, які використовувались для її побудови чи на незалежному масиві даних.

На проміжних етапах створення макромоделі можна контролювати її точність, тоді як під час загальної побудови моделей енергоспоживання точність отриманої моделі відома лише після завершення всього процесу її побудови. Оптимізаційний підхід дозволяє зменшувати похибку шляхом додавання даних, які не містилися в масиві даних, використаних для побудови початкової макромоделі.

7.3. Побудова макромоделей для прогнозування енергоспоживання на основі тестових даних систем моніторингу й оперативного контролю

Побудова дискретних макромоделей енергоспоживання є дуже зручним

підходом для створення математичних моделей, призначених для короткотермінового енергоспоживання, оскільки вони не потребують статистичного накопичування даних протягом тривалого періоду. З метою перевірки працездатності запропонованого підходу побудовано макромодель добового енергоспоживання енергорайону ПС-330 кВ Яворів [206]. Для побудови автономної макромоделі цього об'єкту використано дані за 2016-2017 роки. Дані подобового енергоспоживання за два тижні січня 2016 року наведено на рис. 7.3.

Дискретну макромодель енергоспоживання цього об'єкту створено у вигляді такого співвідношення:

$$\begin{aligned}\bar{x}^{(i+1)} &= \mathbf{F}\bar{x}^{(i)}, \\ \bar{y}^{(i+1)} &= \mathbf{C}\bar{x}^{(i+1)}.\end{aligned}\tag{7.11}$$

Для побудови макромоделі використано дані добового енергоспоживання протягом одного місяця. Початкове значення змінних стану визначалося на основі лінійної залежності від рівня споживання електроенергії в довільно вибраних часових відліках, а саме о 11-й, 16-й і 20-й годинах. Таким чином вираз (7.9) в цьому разі запишеться так:

$$\bar{x}^{(0)} = S \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{16} \\ y_{20} \end{pmatrix}.\tag{7.12}$$

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

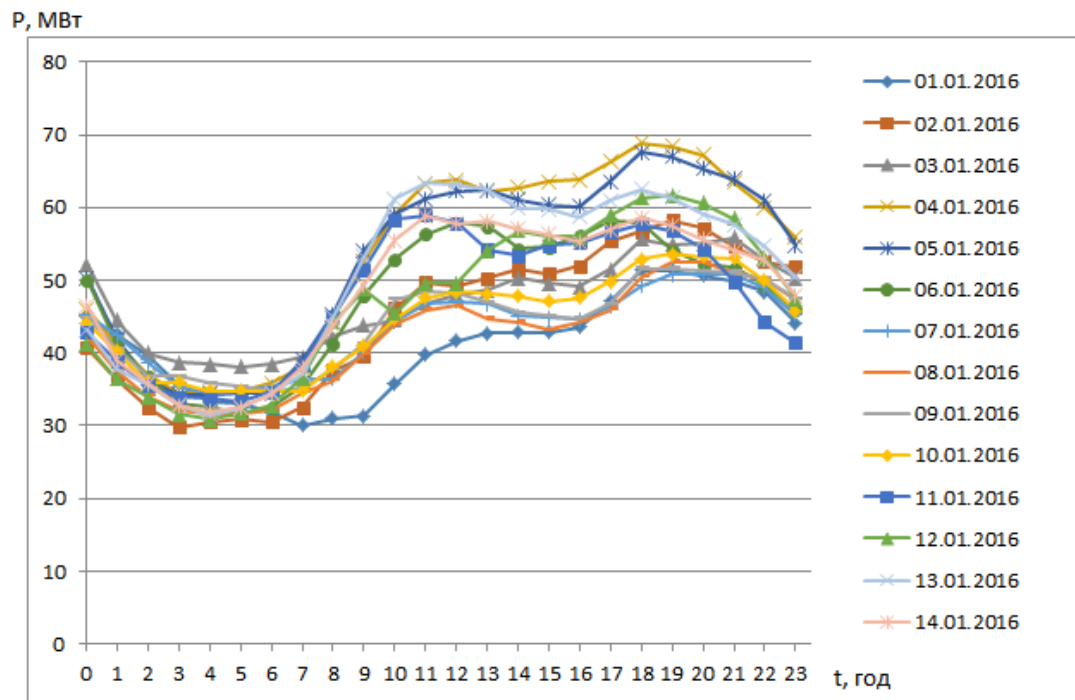


Рис. 7.3. Подобове енергоспоживання ПС-Яворів 330, січень 2016 року

Коефіцієнти: отриманої макромоделі для зручності записано в стрічковому вигляді:

а) матриця **F**:

$$\mathbf{F} = [1.08712867300868, -0.333656088236486, 0.377702465365002, -0.401888477587388, 0.135464807482804, 1.06480243424865, 0.303137789418794, -0.0340189234496291, -0.162410235848749, 0.179513634755865, 0.937018439673723, 0.327818844857979, 0.399195876624525, 0.234494661146424, 0.709041320163308, 1.06197061356276];$$

б) матриця **C**:

$$\mathbf{C} = [-0.656408151617705, 0.396536805258674, 0.0359504597229763, -0.472136808243554];$$

в) матриця **S**

$$\mathbf{S} = [-0.130265851755876, 0.207476063526039, -0.64854384467938, 0.344316383155521, 0.0820333652678428, 0.0833109388872479, 0.504461559889613, 0.206438572426263, -0.341374450534575, -0.0997316280239683, -0.307423308620541, -0.0689622743215084];$$

Реакцію створеної макромоделі на вхідні дані протягом двох вибраних діб з масиву даних місяця, які використовувались для побудови макромоделі, зображено на рис. 7.4 (а, б).

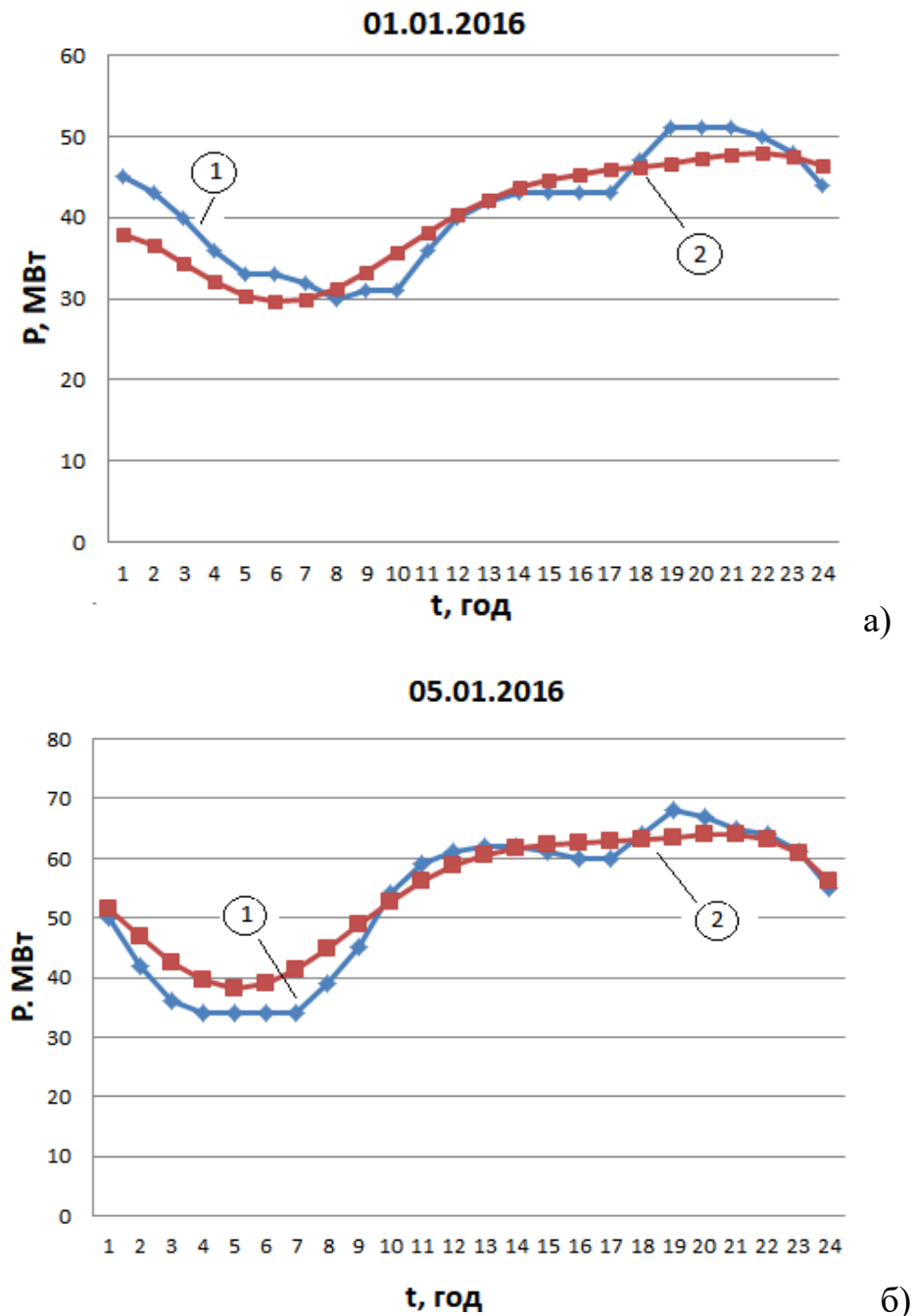


Рис. 7. 4 Вхідні дані та відгук макромоделі, січень 2016 р.

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, 01.01. 2016 р.
 б) вхідні дані та реакція на сигнал, використаний для побудови, 05.01. 2016 р.

Верифікація автономної макромоделі здійснювалась на незалежному наборі даних. Для цього використано дані енергоспоживання за лютий 2016 р. Результати верифікації для довільно вибраного дня лютого цього року наведено на рис. 7.5, де крива (1) – графік добового енергоспоживання незалежного сигналу, який не використовувався для побудови моделі, (2) – відгук створеної макромоделі на тестовий сигнал.

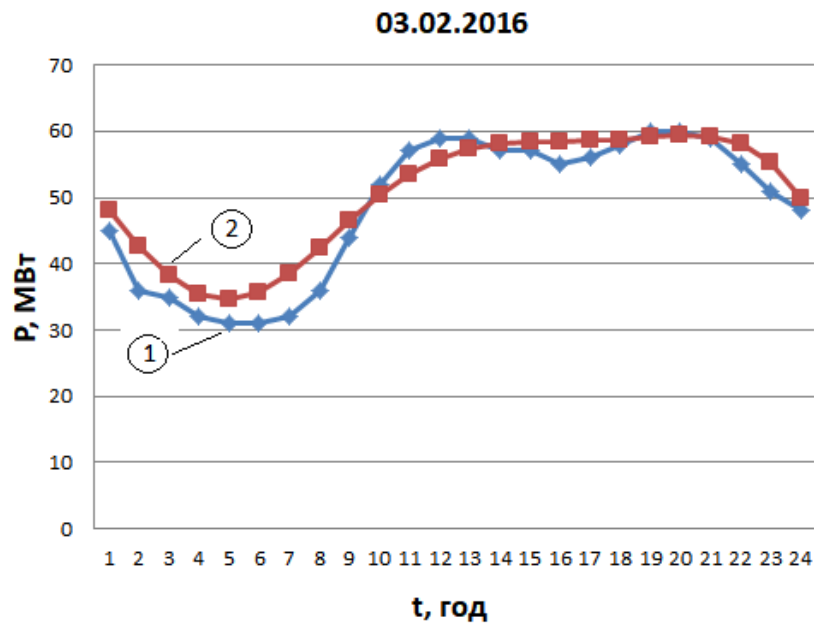


Рис. 7. 5. Вхідні дані та реакція макромоделі, лютий 2016 р.

На підставі отриманих результатів робимо висновок, що підхід автономного макромодельовання може використовуватися для побудови математичних моделей прогнозування навантаження з достатньо високою точністю. Запропонований підхід дозволяє розробляти детерміністичні моделі енергоспоживання й уникати процедури фільтрації астрономічних і випадкових факторів, притаманних іншим моделям, а також усуває необхідність відтворювати динамічні процеси статичними моделями.

Як приклад довгострокового енергоспоживання побудовано дискретну автономну макромодель річного енергоспоживання ПАТ "Київенерго" за 2007 рік [254]. На рис. 7.6 зображено криві: графік фактичного річного енергоспоживання та відтворений за допомогою макромоделі. Середньоквадратична похибка моделі складає 6 %.

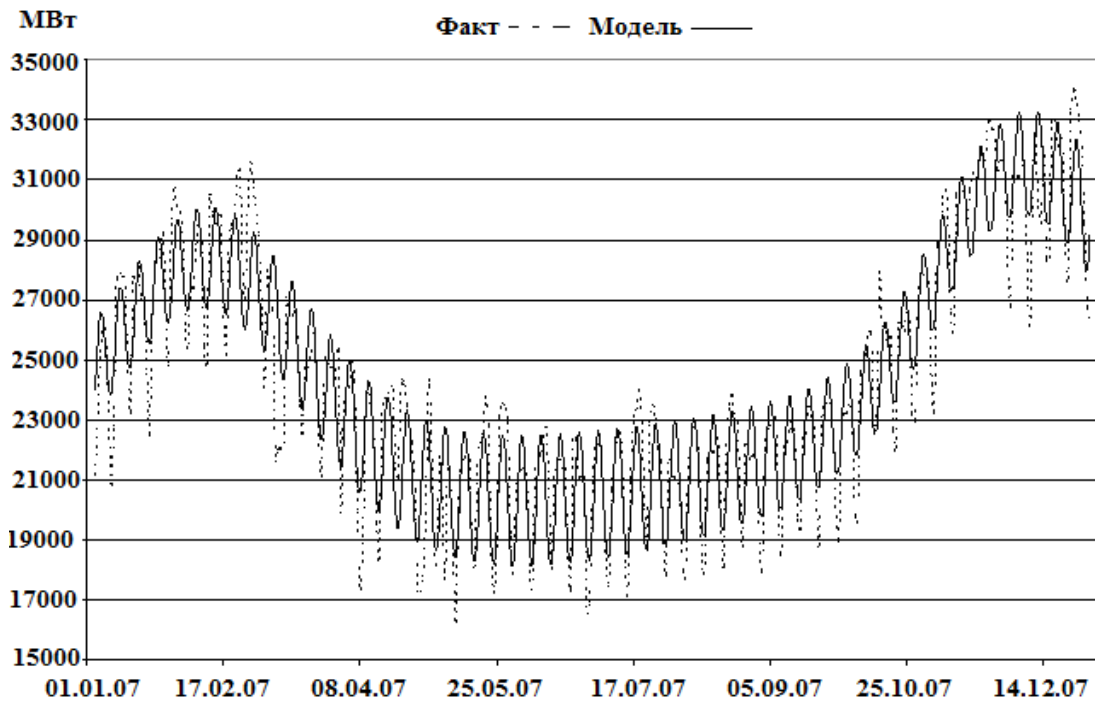


Рис. 7.6. Подобове енергоспоживання ПАТ "Київенерго" та відтворене за допомогою макромоделі

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

$$\begin{cases} x_1^{(k+1)} = 0.6166x_1^{(k)} + 0.8x_4^{(k)} \\ x_2^{(k+1)} = 1.001x_2^{(k)} - 7.79 \cdot 10^{-4} x_1^{(k)}x_3^{(k)} - 7.6 \cdot 10^{-3} x_2^{(k)}x_4^{(k)} \\ x_3^{(k+1)} = 0.3335x_3^{(k)} + 1.22 \cdot 10^{-3} (x_2^{(k)})^2 - 0.1191x_2^{(k)}x_4^{(k)} + 0.4745x_2^{(k)}x_3^{(k)}, (7.13) \\ x_4^{(k+1)} = -0.8109x_1^{(k)} + 0.6491x_4^{(k)} - 0.2054x_2^{(k)}x_3^{(k)} \\ \bar{y}^{(k+1)} = 0.42x_1^{(k)} + 1.474x_2^{(k)} + 0.8777x_4^{(k)} \end{cases}$$

де

$$x^{(0)} = \begin{pmatrix} 0.25 \\ 1.43 \\ -1.427 \\ 0.215 \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

Як показує процес побудови даної макромоделі, оптимізаційний підхід на основі автономного макромоделювання є застосовним для прогнозування

довготермінового енергоспоживання. Незважаючи на наявність суттєвого рівня шумів у вхідних даних, які спричинені випадковими факторами, точність відтворення перехідного процесу, який підлягав моделюванню отриманою макромоделлю, є досить високою, хоча отримана макромоделю є досить складною.

Зокрема, присутній періодичний процес, зумовлений тижневими коливанням рівня споживання. Отже, запропонований підхід може бути використаний для побудови моделей реальних автономних об'єктів і прогнозування їхніх характеристик. Зокрема, метод автономного макромоделювання є застосовним для прогнозування енергоспоживання об'єктів цивільного призначення [171].

Висновки до розділу 7

1. Розглянуто найбільш широко вживані математичні підходи коротко-, середньо- та довготермінового прогнозування, визначено сфери їх застосування, оцінено точність і складність математичної реалізації.
2. Запропоновано і обґрунтовано доцільність використання автономного макромоделювання як ефективного методу прогнозування енергоспоживання, який базується на методі змінних стану, для побудови адекватних макромоделей енергоспоживання без поетапної обробки даних, характерної для класичних методів прогнозування.
3. Вперше розроблені автономні макромоделі коротко- та довготермінового прогнозування енергоспоживання конкретних елементів електротехнічних систем у вигляді "чорної скриньки" у формі дискретних рівнянь стану.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена науково-прикладна проблема вдосконалення методів аналізу й синтезу математичних моделей електротехнічних систем і пристроїв на основі макромоделювання 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 макромоделювання 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 електропередавання, 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 багатополюсних елементів у формі “вхід-вихід” у програмі АТР 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авраменко В. М., Крилов В. О., Прихно В. Л., Черненко П. О. Методики і програмні засоби для забезпечення автоматичного та диспетчерського керування електроенергетичними системами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2010. Вип. 26. С. 31–38.
2. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под общей ред. Ю. Н. Руденко и В. А. Сомова. Москва: Изд-во МЭИ, 2000. 648 с.
3. Банди Б. Методы оптимизации : Вводный курс / Пер. с англ. Москва : Радио и связь, 1988. 128 с.
4. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. Москва: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1969. 118 с.
5. Бенькович Е. С., Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Практическое моделирование динамических систем. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2002. 464 с.
6. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем : Пер. с польск. Москва : Энергоиздат. 1982. 312 с.
7. Бессонов А. А. Методы и средства идентификации динамических объектов. Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. 280 с.
8. Белов Ю. А., Касьянюк В. С. Математичні методи і алгоритми обробки задачі інтерпретації непрямих вимірювань. Київ : Науковий світ, 2000. 79 с.
9. Блажкевич Б. І. Топологічні методи аналізу електричних кіл. Київ : Наукова думка, 1971. 312 с.
10. Букашкин С. А. Адаптивные алгоритмы синтеза нелинейных электронных схем. Киев : Знание, 1989. 24 с.

11. Бэнн Д. В., Фармер Е. Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки : Перевод с английского. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
12. Варецький Ю. О., Наконечний Т. І., Федонюк М. Д., Комар В. О. Архітектура інтелектуальної системи моніторингу несинусоїдних режимів електричної мережі. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2010. № 1. С. 1–10. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/188/464>
13. Васильев В.В., Симак Л.А., Рыбникова А.М. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK : учеб. пособие для студентов и аспирантов. Київ : НАН Украины, 2008. 91 с.
14. Васильков Ю. В., Василькова Н. Н. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании: учеб. пособие . Москва : Финансы и статистика, 2002. 256 с.
15. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. Москва : Высш. школа, 1976. 479 с.
16. Веников В. А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / под ред. В. А. Веникова. Изд 2-е, перераб. и доп. Москва : Высш. школа, 1981. 288 с.
17. Веприк Ю. Н. Компьютерное моделирование режимов работы электрических систем: монография. Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. 304 с.
18. Верлань А. Ф., Москалюк С. С. Математическое моделирование непрерывных динамических систем. Київ : Наукова думка, 1988. 287 с.
19. Верлань А. Ф., Федорчук В. А. Моделі динаміки електромеханічних систем. Київ : Наук. думка, 2013. 222 с.
20. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем : пер. с англ. Москва : Радио и связь, 1988. 560 с.

21. Воеводин В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах. Москва : Наука, 1986. 296 с.
22. Волошко А., Лутчин Т., Кладько О. Короткострокове прогнозування графіків електричних навантажень на основі вейвлет-перетворення. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 6. С. 35–42.
23. Гергель В. П., Стронгин Р. Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. Нижний Новгород : Из-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2003. 184 с.
24. Герман-Галкин С. Г. MATLAB&Simulink: Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург : КОРОНА-Век, 2014. 368 с.
25. Гилат А. MATLAB: теория и практика. Москва: ДМК Пресс, 2016. 416 с.
26. 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.
27. 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.
28. Гоголюк О., Корецький Р., Пташник В. Дослідження ЕЕС на основі діакоптического підходу та макромоделювання в сучасних комп'ютерних середовищах. *Матеріали міжнародної конференції молодих вчених ERECS"2009 "Енергетика та системи керування"* (Львів, 14–16 травня 2009 р.), Львів, 2009. С. 1213.
29. Голов П.В., Шаров Ю.В., Строев В.А. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах. *Электричество*, 2007. № 5. С. 2–11.
30. Горячко В.І. Математичні моделі елементів системи електропередачі : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.09.05. Львів, 2002. 19 с.
31. Гроп Д. Методы идентификации систем. Москва : Мир, 1979. 302 с.

32. Гулятьев А. К. Имитационное моделирование в среде Windows: практ. пособие. Санкт-Петербург : КОРОНАПринт, 1999. 288 с.
33. Гусев А. С., Сверчков С. В., Плодистый И. П. Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения. *Известия ВУЗов. Электромеханика*. 2006. № 3. С. 92–95.
34. Демирчян К. С., Бутырин П. А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. Москва : Высш. шк., 1988. 335 с.
35. Джала В. Р. Алгоритм статистической глобальной оптимизации с адаптацией шага поиска. *Проблемы управления и информатики*. 1997. № 2. С. 94–99.
36. Директор С., Рорер Н. Введение в теорию систем : пер. с англ. Москва, 1974. 464 с.
37. Діалоговий автоматизований комплекс аналізу режимів ДАКАР.
URL: <http://www.dakar.eleks.com/>
38. Доманов В. И., Билалова А. И. Анализ прогнозирования энергопотребления с различными информационными базами. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16, № 4(3). С. 535–537.
39. Доманов В. И., Билалова А. И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации. Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. 2016. Т. 16. № 2. С. 59–65. DOI: [10.14529/power160208](https://doi.org/10.14529/power160208)
40. Дунаевский С. Я. Моделирование элементов электромеханических систем. Москва : Энергия, 1971. 288 с.
41. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. Москва : ДМК Пресс, 2012. 768 с.
42. Жученко А. И., Кваско М. З., Кубрак Н. А. Ідентифікація динамічних характеристик. Комп’ютерні методи. Київ : Вир. відділ КЛТКМ та М, 2000. 182 с.

43. Зозулин Ю.В. Математическая модель асинхронизированного турбогенератора. Киев, 1991. 38 с.
44. Ивахненко А. Г., Юралковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. Москва : Радио и связь, 1986. 119 с.
45. Иващенко Д. С., Супруновская Н. И. Переходные процессы в электрических цепях со стохастической нагрузкой, характеризующейся непрерывной случайной величиной. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 17–19.
46. Іванков В. Ф., Басова А. В., Хімюк І. В. Методи моделювання трансформаторів та реакторів : монографія. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2017. 490 с.
47. Казовский Е. Я., Лернер Л. Г., Сидельников А. В Синтез схем замещения электрических машин переменного тока по переходным процессам и частотным характеристикам. *Электротехника*. 1979. № 5. С. 6 – 13.
48. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем / Под ред. Я. З. Цыпкина. Изд. 2-е, стереотипное. Москва : Эдиториал УРСС, 2004. 400 с.
49. Капустин Г.В., Финкельштейн В.Б. Нелинейная математическая модель асинхронной машины, учитывающая продольные и поперечные токи в магнитопроводе короткозамкнутого ротора. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 5. С. 46–51.
50. Кириленко О. В., Сегеда М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т.А. Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник. Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2010. 608 с.
51. Козак Ю.Я. Модифікація методу направляючого конуса Растрігіна. *Електроніка и связь. Тематический выпуск "Проблемы физической и биомедицинской электроники"*. 1997. С. 424.
52. Козак Ю.Я., Стахів П. Г., Струбицька І. П. Розпаралелення алгоритму оптимізації параметрів дискретних динамічних моделей на масивно-

- паралельних процесорах. *Відбір і обробка інформації*. 2010. Вип. 32 (108). С. 125–130.
53. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Москва : Высшая школа, 1987. 248 с.
54. Коротков Б. А., Попков Е. Н. Алгоритмы имитационного моделирования переходных процессов в электрических системах. Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 280 с.
55. Костинюк Л.Д., Мороз В. І. Математичні та структурні моделі асинхронних двигунів, побудованих на основі однофазних заступних схем. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”*. 2008. № 615. С. 46–50.
56. Краснощеков П. С., Петров А. А. Принципы построения моделей. Москва : Изд-во МГУ, 1983. 264 с.
57. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. Москва : Наука, 1972. 544 с.
58. Крылов В.В. Построение моделей внутренней структуры динамических систем по входу-выходным соотношениям (теория абстрактной реализации). I. Обзор. *Автоматика и телемеханика*. 1974. № 2. С. 1–17.
59. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие. Москва : Издательство Омега-Л., 2013. 384 с.
60. Кустовська О. В. Методологія системного підходу та наукових досліджень : курс лекцій. Тернопіль : Економічна думка, 2005. 124 с.
61. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в Matlab. Учебный курс Санкт-Петербург: Питер; К. : издательская группа ВHV, 2005. 512 с.
62. Ланнэ А.А. Нелинейные динамические системы. Синтез, оптимизация, идентификация. Ленинград : ВАС, 1985. 240 с.
63. Лебедев А. Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. Москва : Радио и связь, 1989. 224 с.
64. Лежнюк П. Д., Бевз С. В. Методи оптимізації в електроенергетиці: критеріальний метод : навч. посіб. Вінниця : ІЗДТУ, 1999. 177 с.

65. Литвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. Москва : Патент, 1996. 291 с.
66. Лотов А. В. Введение в экономико-математическое моделирование. Москва : Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1984. 392 с.
67. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. Москва : Наука, 1991. 432 с.
68. Максимович Н. Г. Линейные электрические цепи и их преобразования. Москва – Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. 264 с.
69. Максимович Н. Г. Методы топологического анализа электрических цепей. Львов : Изд-во Львовского ун-та, 1970. 258 с.
70. Манусов В.З., Бирюков Е.В. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами. *Известия Томского политехнического университета*. 2006. Т. 309. №6. С. 153–158.
71. Матвійчук Я. М. Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія та практика. Львів : Видавн. центр Львів. нац. ун-ту ім. Івана Франка, 2000. 215 с.
72. Матвийчук Я. М., Петрив В. Ф. Построение линейной макромодели в форме уравнений состояния по временным характеристикам. *Теоретическая электротехника*. 1986. Вып. 40. С. 3–5.
73. Моделирование динамических систем: Аспекты мониторинга и обработки сигналов / Васильев В. В., Грездов Г. И., Симак Л. А. и др. Киев : НАН Украины, 2002. 344 с.
74. Молчанов А. А. Моделирование и проектирование сложных систем: учеб. пособие для вузов. Київ: Вища школа, 1988. 359 с.
75. Мороз А.Н., Черемисин Н.М., Черкашина В.В., Холод А.В. Нейро-сетевое моделирование в задачах прогнозирования режимов работы электрических сетей. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. № 1. С. 65–68. DOI: [10.20998/2074-272X.2016.1.12](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.1.12).

76. Морозов В.К., Рогачев Г. Н. Моделирование информационных и динамических систем: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва : Издательский центр «Академия», 2011. 384 с.
77. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. Изд. 3-е, исправл. Москва : КомКнига, 2007. 192 с.
78. Новаш И. В. Математическая модель трехфазного трехстержневого трансформатора на базе второй теории рассеяния. *Изв. вузов. Энергетика*. 1986. № 5. С. 36–39.
79. Основы имитационного и статистического моделирования : учеб. пособие / Ю.С. Харин и др. Минск: Дизайн ПРО, 1997. 288 с.
80. Паливно-енергетичний комплекс України в контексті глобальних енергетичних перетворень / А.К. Шидловський та ін. Київ : Українські енциклопедичні знання, 2004.
81. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: учеб. пособие / А. В. Боресков и др. Москва: Издательство Московского университета, 2015. 336 с.
82. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики. – 3-е вид., перероб. і доп. Львів : Вища шк., 1989. 464 с.
83. Перхач В. С., Фильц Р. В., Лысяк Г.Н., Гаврилюк Р.Б., Малиновский А. А., Шелепеть Т. М. Уравнения электромагнитного состояния трансформатора и их решение. *Теоретическая электротехника*. 1974. Вып. 17. С. 60 – 67.
84. Перхач В.С., Шелепеть Т. М., Горячко В. І. Квазіеталонна математична та цифрова модель автотрансформатора як елемента електропересильні надвисокої напруги. *Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”*. 1999. Вип. 372. С. 154–158.
85. Пешель М. Моделирование сигналов и систем : пер. с нем. под ред. Я. И. Хургина. Москва : Мир, 1981. 300 с.

86. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем. Львов : Вища шк., Изд-во при Львов. ун-те, 1986. 164 с.
87. Поворознюк Н.І., Бобрівник К.Е. Вимірювання параметрів і обробка інформації в інтелектуальній системі електроживлення (smart grid). *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*: збірник наукових праць. 2012. № 62 (968). С. 162-168. URL: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/16597/1/2012.pdf>.
88. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. Москва : Мир, 1974. 396 с.
89. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. Москва : Наука, 1983. 384 с.
90. Пухов Г. Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных Т-преобразований. Київ : Наук. думка, 1988. 210 с.
91. Растрингин Л. А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
92. Рендзіняк С., Гоголюк О., Бугрин Ю. Розрахунок перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області діакоптичними методами. *Матеріали II –ої міжнародної конференції молодих вчених EPECS"2010 "Енергетика та системи керування"* (Львів, 25–27 листопада 2010 р.). Львів, 2010. С. 76–77.
93. Рендзіняк С., Гоголюк О., Самойлова С. Розрахунок перехідних процесів систем керування в електроенергетиці з використанням сучасних комп'ютерних середовищ. *Збірник тез II науково-практичної конференції "Проблеми електроніки та інформаційні технології"* (сmt. Чинадієво, Закарпатська обл., Україна, 2 – 5 вересня 2010 р.). Чинадієво. С. В17 – В18.
94. Росоловські Є., Стахів П., Козак Ю., Гоголюк О. Побудова макромоделі силового трансформатора. *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*

- "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*. Львів, 2003. № 485. С. 131–138.
95. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. Москва : Наука. Физматлит, 1997. 320 с.
 96. Сегеда М. С. Математичне моделювання в електроенергетиці : навч. посіб. Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2002. 300 с.
 97. Седов А.В. Моделирование объектов с дискретно-распределенными параметрами. Москва : Наука, 2010. 433 с.
 98. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 211 с.
 99. Сивокобыленко В. Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: учеб. пособие. Донецк : РВА ДонНТУ, 2005. 350 с.
 100. Сеницын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева: Учеб. пособие. Москва : Университетская книга. Логос, 2006. 640 с.
 101. Смит Д. М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей : пер. с англ. Москва : Машиностроение, 1980. 271 с.
 102. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Высш. шк., 2001. 343 с.
 103. Современные методы идентификации систем / П.М. Эйкхофф, А. Ванечек., Е. Савагари и др.: пер. с англ. Москва : Мир, 1983. 400 с.
 104. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холла и Дж. Уатта: пер. с англ. Москва : Мир, 1979. 312 с.
 105. Соловьева Е.Б. Модифицированный метод макро моделирования электронных схем на основе теории расщепления. Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 1992. Т. 35, № 1. С.9-13.

106. Стахив П. Г., Козак Ю. Я., Франко Ю. П. Прогнозирование энергетических показателей на основании динамических моделей. *Энергетика и электрификация*. 2007. № 9. С. 9–13.
107. Стахив П.Г. Анализ динамических режимов в электронных схемах с многополюсниками. Львов : Вища шк., Изд-во при Львов. ун-те, 1988. 154 с.
108. Стахив П.Г., Козак Ю. Я., Гоголюк О. П. Макромодель трехфазного силового трансформатора. *Электронное моделирование*. 2005. Т. 27, № 6. С. 91 – 100.
109. Стахив П.Г., Мельник Б.К., Джала В.Р. Построение дискретных макромоделей нелинейных динамических объектов с многими входами. *Электронное моделирование*. 1996. Т. 18, № 3. С. 89–91.
110. Стахів П. Г. Моделювання та діакоптика як засіб підвищення ефективності розрахунків складних електротехнічних систем. *Технічна електродинаміка, Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”*. Київ, 2000. Ч. 6. С. 9–14.
111. Стахів П. Г., Васильчишин І. І. Макромоделювання динамічних процесів в асинхронних машинах. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 6. С. 31–35.
112. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Ієрархічне макромоделювання для розрахунку електроенергетичних систем. *Праці Інту електродинаміки НАНУ* : зб. наук. пр. НАН України, Від-ня фіз.-техн. пробл. енергетики. Київ, 2011. Спецвип., ч. 2. С. 137–141.
113. 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.
114. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Математичне моделювання електропередачі в середовищі Matlab/Simulink. *Тези доповідей Ювілейної наукової конференції, присвяченої 40-річчю кафедри радіофізики*. (Львів, Україна, 7 – 8 жовтня 2004 р.). Львів, 2004. С. 62–63.

115. Стахів П. Г., Гоголюк О. П. Математичне моделювання електропересильні з неявнополюсними синхронними генераторами. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*. 2007. № 597. С. 166 – 171.
116. 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.
117. 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.* Київ, 2010. Спец. вип. С. 78–81.
118. 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.
119. 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.
120. Стахів П. Г., Козак Ю. Я., Франко Ю. П. Структура макромоделі та її вплив на параметричну ідентифікацію параметрів дискретної моделі турбогенератора. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*. 2012. № 637. С. 87 – 91.
121. Стахів П. Г., Козак Ю.Я., Селепина Й. Р. Вдосконалення алгоритму оптимізації для ідентифікації параметрів макромоделей електромеханічних систем. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*. 2010. № 666. С. 98–102.

122. Стахів П. Г., Рендзіняк С. Й., Козак Ю. Я. Паралельні діакоптичні методи моделювання електричних кіл. *Технічна електродинаміка: тем. випуск*. Київ, 2004. Ч. 1. С. 52–57.
123. Стахів П.Г., Гоголюк О. П. Математичне моделювання низькочастотних перехідних процесів електричних систем. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”*. 2001. – № 421. С. 196–201.
124. Стахів П.Г., Козак Ю. Я. Побудова макромоделей електромеханічних компонент із використанням оптимізації. *Технічна електродинаміка*. 2001. № 4. С. 33–36.
125. Стахів П.Г., Козак Ю. Я., Гоголюк О. П. Дискретне макромоделювання в електротехніці та суміжних областях: монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 260 с.
126. Стогній Б. С., Буткевич А. Ф., Зорин Е. В., Левконюк А. В., Чижевский В. В. Проблемно-ориентированный мониторинг режимов энергообъединения. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 6. С. 52–59.
127. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Буткевич О. Ф., Сопель М. Ф., Рибіна О. Б. Система збору та обробки інформації, що реєструється комплексами "Регіна-Ч". *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 29. С. 35–46.
128. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Жуйков В. Я., Баталов А. Г. Особливості ОЕС України та науково-технічні проблеми забезпечення її розвитку. *Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки*. 2010. Ч. 1. С. 25–30.
129. Стогній Б.С., Кириленко О. В., Буткевич О. Ф., Сопель М. Ф. Інформаційне забезпечення задач керування електроенергетичними системами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2012. № 1. С. 13–22.
130. Стогній Б.С., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення. *Технічна*

- електродинаміка*. 2010. № 6. С. 44–50.
131. Стогній Б.С., Сопель М. Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 62–69.
 132. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Створення технічних засобів в системі моніторингу перехідних режимів енергосистем та їх метрологічне забезпечення. *Пр. Інституту електродинаміки НАНУ*. Зб. наук. праць. Київ. 2007. № 1 (16). Ч. 1. С. 16–22.
 133. 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.
 134. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / пер. с англ. под ред. Я. З. Цыпкина. Москва : Наука, Главная ред. физ.–мат. лит-ры, 1985. – 296 с.
 135. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В.. Курс методов оптимизации. Москва : Наука, 1986. 328 с.
 136. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов. Минск: Дизайн-ПРО, 2004. 640 с.
 137. Теория систем. Математические методы и моделирование / под ред. С.В. Емельянова. Москва : Мир, 1989. 384 с.
 138. Терещук В.І. Основи теорії інформації : конспект лекцій. URL: [https://www.scribd.com/doc/87541396/ Основи теорії інформації](https://www.scribd.com/doc/87541396/Основи_теорії_інформації)
 139. Тесленко О.И., Ширинский С. В. К расчету параметров схемы замещения магнитной цепи ярем статора ротора неявнополюсной синхронной машины. *Электричество*. 1995. №11. С. 39–42.
 140. Тиховод С. М. Моделирование переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения. *Електротехніка та електроенергетика*. 2014. № 2 . С. 59–68.
 141. Тиховод С. М. Модификация магнитоэлектрических схем замещения электромагнитных устройств для анализа переходных процессов.

- Электричество*. 2014. № 2. С. 53–60.
142. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва : Наука, 1986. 288 с.
 143. Фильц Р. В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. Київ : Наук. думка, 1979. 208 с.
 144. Фильц Р. В., Лябук Н. Н. Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин. Львов: Свит, 1991. 178 с.
 145. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений : пер. с англ. – Москва : Мир, 1980. 279 с.
 146. Хемминг Р. В. Теория кодирования и теория информации. Москва : Радио и связь, 1983. 214 с.
 147. Чабан В. Математичне моделювання електромеханічних процесів. Львів : Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”, 1997. 342 с.
 148. Черненко П. П., Мартинюк О. В. Підвищення ефективності короткострокового прогнозування електричного навантаження енергооб'єднання. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 1. С. 63–70. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/62061>
 149. Чуа Л.О. Лин Пен–Мин Машинный анализ электронных схем : пер. с англ. Москва : Энергия, 1980. 638 с.
 150. Чумаченко Е.И., Горбатюк В.С. Алгоритм решения задачи прогнозирования. *Штучний інтелект*. 2012. № 2. С. 24–31.
 151. Шакиров М. А. Теоретические основы электротехники. Новые идеи и принципы. Схемоанализ и диакоптика. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГТУ, 2001. 212 с.
 152. Шидловський А. К., Перхач В. С., Скрипник О. І. Енергетичні системи з електропередачами та вставками постійного струму. – Київ : Наук. думка, 1992. 288 с.
 153. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б., Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении

- электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. Екатеринбург: УрО РАН, 2008, 89с.
154. Щерба А. А., Супруновська Н. И., Петриченко С. В. Динамические процессы в электроразрядных установках. Киев: Про формат, 2017. 460 с.
 155. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления : пер. с англ. Москва : Мир, 1975. 680 с.
 156. Якименко Ю. И., Прокопенко В. В., Денисюк С. П., Закладний О.М. SMART системи як одна із основних складових сталого розвитку енергетики. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2012. № 1. С. 4–13.
 157. Abdel–Salam M., Abdel–Aziz E. Corona power loss determination on multi–phase power transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 2001. Vol. 58. P. 123–132.
 158. Aghmasheh R., Rashtchi V., Rahimpour E. Gray Box Modeling of Power Transformer Windings for Transient Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. Vol. 32, № 5. P. 2350 – 2359.
 159. Alfares H. K., Nazeeruddin M., Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *International Journal of Systems Science*. 2002. No. 33. P. 23–34.
 160. Almeshaiei E., Soltan H. A Methodology for Electric Power Load Forecasting. *Alexandria Engineering Journal*. 2011. Vol. 50. P. 137–144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.015>
 161. Alternative Transients Program, ATP-EMTP, 2016. URL: <http://www.eeug.org>.
 162. Ametani A. A general formulation of impedance and admittance of cables. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1980. Vol. 99, № 3. P. 902–910.
 163. Ametani A., Nagaoka N., Noda T., Matsuura T. A simple and efficient method for including frequency–dependent effects in transmission line transient analysis. *Electrical Power&Energy Systems*. 1997. Vol. 19, № 4. P. 255–261.

164. Anderson B.D.O. Vongranitlerd S. Network analysis and synthesis: a modern system theory approach. Dover, 2006. 560 p.
165. 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](https://doi.org/10.1109/MSSC.2015.2495858)
166. Annakkage U. D., Nair N. K., Y. Liang and others Dynamic System Equivalents: A Survey of Available Techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*. January, 2012. Vol. 27, No. 1. P. 411– 420.
167. Arrillaga J., Watson N. Power systems electromagnetic transients simulation. London : The Institution of Electrical Engineers. 421 p.
168. Arturi G. Transient simulation and analysis of a three–phase five–limb step–up transformer following and out–of–phase synchronization. *IEEE Transactions on Power Delivery*. January, 1991.– Vol. 6, № 1. P. 196–207.
169. Ashlock D. Evolutionary Computation for Modelling and Optimization. New York : Springer, 2006. 578 p.
170. ATPDraw – Graphical Preprocessor to ATP – EMTP. Windows version. URL: <http://www.ece.mtu.edu/atp/ATPDraw/ATPDraw.html>
171. 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.
172. Brandwain V., Dommel H., Dommel I. Matrix representation of three–phase N–winding transformers for steady–state and transients studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. June, 1982. Vol. PAS–101, № 6. P. 1369–1378.
173. 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)
174. 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). Kostryna, 2011. P. 37.
 175. Byczkowska-Lipińska L., Stakhiv P., Hoholyuk O., Vasylychshyn I. Evaluation of discrete modeling efficiency of asynchronous electric machines. *Przegląd elektrotechniczny*. 2012. № 3a. P. 58–60.
 176. Byczkowska-Lipinska L., Stakhiv P., Kozak Yu. Acceleration of the parameters identification for dynamic models construction using parallelization. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2012. Vol. 2, № 2. C. 7–10.
 177. CAPE: Computer Aided Software Engineering. URL: <https://www.electrocon.com/capeintro.php>
 178. Chen X. A., Venkata S. Three-phase three-winding core-type transformer model for low-frequency transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April, 1997. Vol. 12, № 2. P. 775–782.
 179. Cherry C. The duality between interlinked electric and magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuits. *Proceedings of the Physical Society*. February, 1949. Part 62. P. 101–110.
 180. Chimkai S., Marti J. Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 1995. Vol. 10, № 3. P. 1316–1324.
 181. Computer analysis of electric power systems transients: selected readings / Edited by Juan A. Martinez-Velasco. NJ: IEEE PUB Piscataway, 1997. 619 p.
 182. Correia de Barros M., Almeida M. A general purpose transmission line model and its interface with an electromagnetic transient programme. *Electrical Power&Energy Systems*. 1997. Vol. 19, № 4. P. 249–254.

183. Correia de Barros M., Almeida M. Computation of electromagnetic transients on nonuniform transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April, 1996. Vol. 11, № 2. P. 1082 – 1091.
184. CYME Power Engineering Software. URL: <http://www.cyme.com/software/>
185. de Leon F., Semlyen A. Simple representation of dynamic hysteresis losses in power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. January, 1995. Vol. 10, № 1. P. 315–321.
186. de Leon F., Semlyen A. Complete transformer model for electromagnetic transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*. January, 1994. Vol. 9, № 1. P. 231–239.
187. Dick E., Watson W. Transformer models for transient studies based on field measurement. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. January, 1981. Vol. PAS–100, № 1. P. 409–418.
188. DigSILENT Power System Software & Engineering. URL: <http://www.digsilent.de>
189. Dommel H. Transformer models in the simulation of electromagnetic transients. *Proceedings of 5th Power Systems Computation Conference* (Cambridge, England, September 1–5. 1975). Cambridge, 1975. Vol. 3.1/4. P. 1–16.
190. Dommel H.W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multi-phase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1969. No. 88 (2). P. 734 – 771.
191. Dommel H.W., Electromagnetic transients program reference manual: EMTP theory book. Bonneville Power Administration, Portland OR, August 1986. URL: <http://een.iust.ac.ir/profs/Shahrtash/2014/Electrical%20Power%20System%20Transients/EMTP%20Theory%20Book.pdf>
192. Dube L., Bonfanti I. MODELS: a new simulation tool in EMTP. *European Transactions on Electrical Power*. September, 1992. Vol. 2, Issue 1. P. 45 – 50.

193. Filipovic-Grcic D., Filipovic-Grcic B., Uglesic I. High-Frequency Model of the Power Transformer Based on Frequency-Response Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. February, 2015. Vol. 30, Issue 1. P. 30-42
194. Electrical Power System Analysis & Operation Software. URL: <http://www.etap.com>
195. Esfandiari R. S. Lu B. Modeling and Analysis of Dynamic Systems. Second Edition. New York: CRC Press. 2014. 536 p.
196. Etxeberria-Otadui I., Manzo V., Bacha S., Baltes F. Generalized average modelling of FACTS for real time simulation in ARENE. *Proceedings of 28th Annual Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON)* (Seville, Spain, November 2002). Seville, 2002. Vol. 2. P. 864–869.
197. Guide for numerical electromagnetic analysis methods: application to surge phenomena and comparison with circuit theory based approach / edited by Cigré WG C4.501, 2013. URL: https://infoscience.epfl.ch/record/187423/files/CigreTB_543.pdf.
198. Gustavsen B. Frequency dependent transmission line modeling utilizing transposed conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 2002. Vol. 17, № 3. P. 834–839.
199. Gustavsen B., Sletbak J., Henriksen T. Calculation of electromagnetic transients in transmission cables and lines taking frequently dependent effects accurately into account. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April, 1995. Vol. 10, № 2. P. 1076–1084.
200. Hamola O., Hoholyuk O., Kozak Yu., Stakhiv P. Comparing of effectiveness of transient processes calculation in electrotechnical devices using discrete models. *Proceedings of Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2017 18th International Conference on* (Kutna Hora, Czech Republic, 11-13 September 2017). Kutna Hora, 2017. DOI: [10.1109/CPEE.2017.8093046](https://doi.org/10.1109/CPEE.2017.8093046)
201. Hinamoto T., NACKAVA S. Approximation of polynomial state-affine discrete-time systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1984. Vol. CAS-31,

- № 8. P. 713–721.
202. Hippert, H.S.; Pedreira, C.E.; Souza, R.C. Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*. February, 2001. Vol. 16, № 1. P. 44–55.
 203. 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. 11–14.
 204. Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models of transformers for electromagnetic transient process simulation. *Proceedings of 9th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering"* (Alushta, Crimea, Ukraine, September 16-20, 2008). Alushta, 2008 P. 17–19.
 205. Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models of transformers for electromagnetic transient process simulation. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. № 6. P. 278–280.
 206. 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. 2017. P. 25–32.
 207. Hurley W., Wilcox D. Calculation of leakage inductance in transformer winding. *IEEE Transactions on Power Electronics*. January, 1994. Vol. 9, № 1. P. 121–126.
 208. Ishii M. Multistory transmission tower model for lightning surge analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 1991. Vol. 6, № 3. P. 1327–1335.
 209. Isidori A. Direct Construction of minimal bilinear realization from nonlinear input-output maps. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1973. Vol. AC-18, № 6. P. 626–631.
 210. Jain S. Modeling and Simulation Using MATLAB-Simulink, Second Edition. Wiley India Pvt. Ltd. 2004. 720 p.
 211. Ju P., Ni L. Q., Wu F. Dynamic equivalents of power systems with online measurements. Part 1: Theory. *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib.*

- March, 2004. Vol. 151, № 2. P. 175–178.
212. Ju P., Ni L. Q., Wu F. Dynamic equivalents of power systems with online measurements. Part 2: Theory. *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib.* March, 2004. Vol. 151, № 2. P. 179–182.
213. Kayssi A. Macromodel Construction and Verification. *Circuits and Devices Magazine, IEEE*. May, 1998. Vol. 14, Issue 3. P. 34–39.
214. Keyhani A., Tsai H., Pilluta S., Abur A. Identification of high frequency transformer model parameters. *Electric Power Systems Research*. 1997. Vol. 42. P. 127–133.
215. Kizilcay M. Low order network equivalents for electromagnetic transients transietns. *European Transactions on Power Engineering*. March/April 1993. Vol. 3, No. 2. P. 123–129.
216. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. New York: CRC Press. 2011. 815 p.
217. Linstone H., Turoff M. The Delphi Method: Techniques and Applications. Addison-Wesley Pub. Co. 2002. 618 p.
218. Mahseredjian J., Dinavahi V., Martines J. A. Simulation Tools for Electromagnetic Transients in Power Systems: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 2009. Vol. 24, No. 3. P. 1657–1669.
219. Mamis M., Koksal M. Transient losses of nonuniform lossy transmission lines with frequency dependent parameters. *Electric Power Systems Research*. 1999. Vol. 52. P. 223–228.
220. Marti J., Castellanos F., Santiago N. Wide-band corona circuit model for transient simulations. *IEEE Transactions on Power Delivery*. May, 1995. Vol. 4, № 2. P. 1003 – 1013.
221. Marti L. Simulation of transients in underground cables with frequency–dependent modal transformation matrices. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 1988. Vol. 3, № 3. P. 1099–1110.
222. Martinez–Velasco J. A. Transient Analysis of Power Systems: Solution

- Techniques, Tools and Applications / Edited by Juan A. Martinez–Velasco. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. 625 p.
223. McNutt W., Blalock T., Hinton R. Response of transformer windings to system voltages. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. March/April 1974. Vol. PAS – 93, № 2. P. 457–467.
 224. Mombello E., Möller K. New power transformer model for the calculation of electromagnetic resonant transient phenomena including frequency–dependent losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*. January, 2000. Vol. 15, № 1. P. 167–174.
 225. Morched A. A., Marti L., Ottenvangers J. High frequency transformer model for the EMTP. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 1993. Vol. 8, № 3. P. 1615–1620.
 226. Morched A. S., Ottevangers J. H., Marti L. Multi-Port Frequency dependent network equivalents for the EMTP. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 1993. Vol. 8, No. 3. P. 1402–1412.
 227. Morched A. S., Brandwajn V. Transmission network equivalents for electromagnetic transients studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. September, 1983. Vol. 102, No. 9. P. 2984–2994.
 228. Morched A., Gustavsen B., Tartibi M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July, 1999. Vol. 14, № 3. P. 1032–1038.
 229. Moroz, A., Cheremisin N., Cherkashina V., Kholod A. Нейро-сетевое моделирование в задачах прогнозирования работы электрических сетей. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. № 1. - С. 65-68. DOI : [10.20998/2074-272X.2016.1.12](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.1.12).
 230. NEPLAN Electricity. URL: <https://www.neplan.ch/neplanproduct/en-electricity/>
 231. Okoli C., Pawlowski S. The Delphi Method as a Research Tool: An Example, Design Considerations and Applications. Information&Management.

- December, 2004. Vol. 42. Issue 1. P. 15–29.
232. Ong, Chee–Mun Dynamic simulation of electric machinery. New Jersey : Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 1997. 626 p.
 233. Otero A. F., Vilachá C., Moreira J. C., and Míguez E. Electrodynamics Simulation of Overhead Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April 2012. Vol. 27, No. 2. P. 560–567.
 234. Paladin Real Time Suite. URL: <https://www.poweranalytics.com/paladin-software/>
 235. Power Tools – Electrical Software for Windows. URL: <http://www.skm.com>
 236. PowerWorld Simulator. URL: <http://www.powerworld.com>
 237. PSS®E – high-performance transmission planning and analysis software: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/services/transmission-on-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software.html>
 238. Prikler L., Hoidalén H.K. ATPDraw version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista User’s Manual, EEUG, Nov. 2009. URL: <http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/ATPDMan56.pdf>
 239. PSCAD: Free Version. URL: <https://hvdc.ca/pscad/freeversion>
 240. Ramirez A., Naredo J., Moreno P., Guardado L. Electromagnetic transients in overhead lines considering frequency dependence and corona effect via the method of characteristics. *Electric Power and Energy Systems*. 2001. Vol. 23. P. 179 – 188.
 241. Ravlyk O., Ravlyk N. Digital Complex for Modeling Processes in Electric Circuits with Protection and Automatic Devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 23–28.
 242. Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing and Analysis / IEEE Task Force on Real-Time Simulation of Power and Energy Systems. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. June 2015. Vol. 2. № 2. P. 63–73.
 243. Rendzinyak S., Stakhiv P., 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). Zakopane, 2004. P. 79 – 80.
244. Rosolowski E. Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych. Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009. 386 s.
245. 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* (Szkliarska Poręba, Poland, September 19-21, 2016). Szkliarska Poręba, 2016. DOI: [10.1109/EPNET.2016.7999378](https://doi.org/10.1109/EPNET.2016.7999378)
246. 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, February 23–26, 2016). Lviv-Slavsko, 2016. P. 55–57. DOI: [10.1109/TCSET.2016.7451966](https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7451966)
247. Singh A. K., Ibraheem S. K. and M. Muazzam An Overview of Electricity Demand Forecasting Techniques. *Network and Complex Systems*. 2013. Vol. 3, No. 3. P. 38–48.
248. Slemon G. Equivalent circuits for transformers and machines including non-linear effects. *Proceedings of the IEE: Institution monographs*. 1953. Part IV. Vol. 100. P. 129–143.
249. Snelson J. Propagation of travelling waves on transmission lines – frequency dependent parameters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. January/February, 1972. Vol. 91, № 1. P. 85–91.
250. Sokol, Y., Rezinkina M., Gryb O., Vasilchenko V., Zuev A., Bortnikov A., Sosina E. Методика комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины с целью повышения безопасности ее функционирования. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. № 2. С. 65–70. DOI : [10.20998/2074-272X.2016.2.12](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.2.12).
251. Soliman, S.A. Electrical load forecasting: modeling and model construction.

- Burlington Butterworth-Heinemann, 2016. 414 p.
252. Soliman A. H., Abdel-Aal H. M. Modern Optimization Techniques with Application to Power Systems. Springer-Verlag New York. Inc. 2012. 432 p.
 253. Soysal A. State equation approximation of transfer matrices and its application to the phase domain calculation of electromagnetic transients. *IEEE Transactions on Power Systems*. February, 1994. Vol.9, № 1. P.420–428.
 254. Stakhiv P, Hoholyuk O, Yu. Kozak Effectiveness Evaluation of Discrete Macromodelling to Forecast Power Consumption of Electric Power Systems Component Elements. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 45–48.
 255. 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”* (Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 – March 1, 2014). Lviv-Slavske , 2014. P. 62 – 64.
 256. Stakhiv P., Hoholyuk O. Electrical Transmission Transient Processes Simulation. *Proceedings of VII International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”* (Odessa, Ukraine, August 27 – 30, 2006). Odessa, 2006. P. 205–207.
 257. Stakhiv P., Hoholyuk O. Features of Calculation Procedures Used for Transient Processes Simulation in Electric Systems and Their Components Described by Macromodels. *Proceedings of the XIV th International Conference TCSET'2018* (Lviv-Slavsko, Ukraine, February 20 – 24, 2018). Lviv-Slavsko, 2018. DOI: [10.1109/TCSET.2018.8336222](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336222)
 258. 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)* (Lviv, Ukraine, September 2-5, 2015). Lviv, 2015. P. 200–203.
 259. 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). Wroclaw, 2015. (electronic publication) ISBN: 978-83-935801-4-9.
260. Stakhiv P., Hoholyuk O. Mathematical modeling of electrical transmission in MATLAB/Simulink environment. *Konferencja Naukowo-Techniczna SIECI'2004* (Wroclaw, Polska, 15-17 Września, 2004). Wroclaw. S. 395 – 402.
261. Stakhiv P., Hoholyuk O. Mathematical Modeling of transmission line transients in MATLAB/Simulink environment. *Acta Technica CSAV*. 2004. Vol. 49. P. 89–105.
262. 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, Ukraine, February 23– 26, 2010). Lviv–Slavske, 2010. P. 315.
263. Stakhiv P., Hoholyuk O. Simulation of Electrical Transmission Transient Processes Using Matlab/Simulink. *Proceedings of III International Symposium "Modern Electric Power Systems"* (Wroclaw, Poland, 6-8 September, 2006). Wroclaw, 2006. P. 447 – 452.
264. 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.
265. Stakhiv P., Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models and macromodels of electric power transformers. *Przeglad Electrotechniczny*. 2011. № 5. P. 163 – 165.
266. Stakhiv P., Hoholyuk O. Mathematical modeling of electrical transmission systems with synchronous non-salient pole machines using Matlab/Simulink.

- Proceedings of International Conference Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering AMTEE '07* (Pilsen, Czech Republic, September 10 – 12, 2007). Pilsen, 2007. ISBN 978-80-7043-564-9 (electronic publication)
267. Stakhiv P., I. Strubytska, Kozak Yu. Parallelization of calculations using GPU in optimization approach for macromodels construction. *Przegląd Electrotechniczny*. 2012. № 3a. P. 7–9.
268. 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, Ukraine, February 28–March 4, 2006). Lviv–Slavske, 2014. P. 125–126.
269. Stakhiv P., Kozak Yu. Discrete dynamic macromodels and their usage in electrical engineering. *Міжнародний науковий журнал "Комп'ютинг"*. 2011. Том 10. С. 278 – 284.
270. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Construction of macromodels of nonlinear dynamic systems using optimization. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2011. № 1. P. 95 – 102.
271. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Discrete mathematical macromodel of electric transmission line. *Proceeding of XIII-th International Workshop CPEE'2012 "Computational Problems of Electrical Engineering"*. (Grzybow, Poland, September 5-8, 2012). Grzybow, 2012. P. 3.
272. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Discrete mathematical macromodel of electric transmission line. *Przegląd Electrotechniczny*. 2013. № 4. P. 272–274.
273. Stakhiv P., Kozak Yu., Vasylchyshyn I. Peculiarities of construction of electromechanical converters' macromodels with the use of optimization process. *Proceedings of XI-th International Conference "Modern Problems of Radioengineering, Telecommunications and Computer Science"*. – Lviv-Slavske, 2012. – P. 441 – 443.
274. 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.
275. 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.
276. Stakhiv P., Rendzinyak S., Krupskyy B. Parallelization of Diacoptic Methods for Multiprocessor Computing Systems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. 2003. Vol. 51. No. 4. P. 381 – 394.
277. Stakhiv P., Rosolowski E., Hoholyuk O. Features of electrical power systems modeling with components described by discrete macromodels in ATP environment. *Технічна електродинаміка, тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”*. Київ, 2002. Ч. 1. С. 23 – 28.
278. Stankovic A. M., Saric A. T. Transient power system analysis with measurement-based gray box and hybrid dynamic equivalents. *IEEE Transactions on Power Systems*. Feb. 2004. Vol. 19, № 1. P. 455–462.
279. State-of-the-art Engineering Software for Electric Utilities. URL: <http://www.aspeninc.com/web/>
280. Transient Processes: Theory and Applications, Second Edition / Ametani A. and others. CRC Press, 2016. 574 p.
281. Tykhovod S. Моделювання динамічних процесів в нелінійних магнітоелектричних колах з використанням діакоптики і паралельних обчислень. *Електротехніка та електроенергетика*. 2010. 1. С. 46-52. DOI: [10.15588/1607-6761-2010-1-6](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2010-1-6).
282. Ubolli A., Gustavsen B. Multiport Frequency-Dependent Network Equivalencing Based on Simulated Time-Domain Responses. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April, 2012. Vol. 27, № 2. P. 648 – 657.
283. Verpyk Y. Пути повышения эффективности компьютерного моделирования режимов работы электрических систем на основе

- уравнений в фазных координатах. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017. N 1. С. 63–66. DOI: [10.20998/2074-272X.2017.1.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.1.10).
284. Wilcox D. Theory of transformer modelling using modal analysis. *IEE Proceedings*. March, 1991. Vol. 138, Pt. C, № 2. P. 121–128.
285. Wilcox D., Conlon M., Hurley W. Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings. *IEE Proceedings*. September 1989. Vol. 136, Pt. C, № 5. P. 308–314.
286. Writing S-functions, by *The MathWorks, Inc, 1998 – 2002*. URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/./sfunctions.pdf.
287. Yamada T. Experimental evaluation of a UHV tower model for lighting surge analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*. January, 1995. Vol. 10, № 1. P. 393 – 402.
288. Yang X.-S., Deb S. Engineering optimization by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*. 2010.–Vol. 1, Issue 4. – P. 330–343.
289. Yu Y.-N, El-Sharkawi Estimation of external dynamic equivalents of a thirteen-machine system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. March, 1981. Vol. PAS-100, №. 3. P. 1324–1332.
290. Yamnenko, J., Tereshchenko T., Klepach L., Palii D. Forecasting of electricity consumption in SmartGrid. *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017*. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 15-17 Nov., 2017, DOI: [10.1109/MEES.2017.8248891](https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248891)
291. Zirka S., Moroz Y., Arturi C., Bonnman D. Топологічні моделі трифазного п'ятистрижневого трансформатора . *Електротехніка та електроенергетика*. 2017. № 2. С. 18-25. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-2>.

ДОДАТКИ

Список 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", тематичний випуск "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 макромодельовання для розрахунку електроенергетичних систем. *Праці Інту 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 модельовання 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, No. 1, pp. 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, 2017. P. 11–14.

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 Elektrotechniczny*. 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 Elektrotechniczny*. 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 Elektrotechniczny*. 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 Elektrotechniczny*. 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 у 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 у 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. ISSN 2708-5341.

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 доповідей Ювілейної наукової конференції, присвяченої 40-річчю кафедри радіофізики*. Львів, Україна, 7 – 8 жовтня 2004 р. 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*, September 12-14, 2005. Pilsen, Czech Republic. – 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"* (Feb. 28 – March 4, 2006), Lviv–Slavske, 2006. – Ukraine. – 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, Ukraine, August 27 – 30, 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. P. 447 – 452.

[31] Hoholyuk O., Byczkowska-Lipinska L. Mathematical models of transformers for electromagnetic transient process simulation. *Proceedings of 9th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering"*, Alushta (Crimea), Ukraine, September 16-20, 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 міжнародної конференції молодих вчених ЕРЕС"2009 "Енергетика та системи керування"*, 14 –16 травня 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, Ukraine February 23– 26, 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 науково-практичної конференції "Проблеми електроніки та інформаційні технології"*, смт. Чинадієво, Закарпатська обл., Україна, 2 – 5 вересня, 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. P. 42.

[36] Рендзіняк С., Гоголюк О., Бугрин Ю. Розрахунок перехідних процесів електроенергетичних систем у часовій області діакоптичними методами. *Матеріали II –ої міжнародної конференції молодих вчених ЕРЕС"2010 "Енергетика та системи керування"*, Львів, 25-27 листопада 2010 – с. 76 – 77.

[37] Byczkowska-Lipińska L, Stakhiv P., Hoholyuk O., Vasylchyshyn 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, Poland, (electronic publication) ISBN: 978-83-935801-4-9. (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. – pp. 200-203 (друков), ISBN: 978-617-607-804-3 (CD). (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, February 23 – 26, 2016, Pages: 55 – 57. (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)*, Szekliarska Poręba, Poland, September 19-21, 2016 (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. (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. (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 Macromodels. *Proceedings of the XIV th International Conference TCSET'2018*, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 20 – 24, 2018 (Scopus, Web of Science)

Додаток Б Матеріали, які підтверджують використання результатів дисертації

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної роботи

Національного університету "Львівська
політехніка"

О. Р. Давидчак

18" 04 2018 р.



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи

Гоголюк Оксани Петрівни

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему

“Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на основі макромоделювання” в навчальному процесі

Комісія у складі голови – директора Інституту енергетики та систем керування Національного університету “Львівська політехніка” А. О. Лозинського та членів: професора кафедри теоретичної і загальної електротехніки Національного університету “Львівська політехніка” В. С. Маляра, професора кафедри теоретичної і загальної електротехніки Національного університету “Львівська політехніка” С. Й. Рендзіняка склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі теоретичної і загальної електротехніки під час викладання дисциплін “Методи оптимізації та їх застосування в задачах електротехніки” та “Макромоделювання компонент електромеханічних систем” для магістрів та аспірантів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

У теоретичній частині курсів використовуються навчально-методичні матеріали щодо поєднання різних підходів при побудові дискретних макромоделей складових електричних кіл та систем у вигляді “чорної скриньки” у формі змінних стану, зокрема застосування експертного аналізу для побудови дискретних макромоделей, розбиття на підмоделі, а також їх способи їх адаптації до сучасних програмних середовищ, призначених для розрахунку перехідних процесів в складних електротехнічних системах.

У практичній частині курсів використовуються способи безпосереднього формування дискретних макромоделей у середовищі Simulink за допомогою блоків S-функцій шляхом програмування математичних виразів, відповідних до структури лінійної та нелінійної частин макромоделі та середовищі ATP з використанням мови програмування MODELS. Студенти отримують навички створення власних бібліотек користувача в цих середовищах, вбудовані моделі яких є одними з основних складових програмного забезпечення для прогнозування часових характеристик конкретних електротехнічних систем, а також проведення розрахунків в складних системах при одночасному використанні моделей різного типу, зокрема дискретних та неперервних.

В якості тестових прикладів на лабораторних заняттях демонструється побудова дискретних макромоделей елементів електричних кіл та систем із зосередженими та розподіленими параметрами (лінії електропередавання, підстанції "Альбертірша") та коротко- та довготермінове прогнозування енергоспоживання з використанням математичного апарату дискретного макромодельовання.

Голова комісії:

Директор Інституту енергетики
та систем керування



А. О. Лозинський

Члени комісії:

Проф. кафедри теоретичної
і загальної електротехніки



В. С. Маляр

Проф. кафедри теоретичної
і загальної електротехніки



С. Й. Рендзіняк



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи
Гоголюк Оксани Петрівни
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему
“Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на
основі макромоделювання”

Комісія у складі голови – начальника науково-дослідної частини, к.т.н., доцента Жук Л. В. та членів: зав. кафедри теоретичної та загальної електротехніки, д.т.н., проф. Стахіва П. Г., зав. відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г. В. і начальника планово-фінансової групи Чулой Т. М. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи к.т.н., доцента цієї кафедри Гоголюк О. П. використані у таких науково-дослідних роботах, які фінансувались за кошти держбюджету:

- “Розроблення діакоптичних методів розрахунку динамічних режимів електроенергетичних систем на паралельних обчислювальних засобах”, термін виконання: 2004 – 2006 р., номер державної реєстрації 0104U002307;
- “Математичне моделювання електроенергетичних систем з метою прогнозування їх часових характеристик”, термін виконання: 2007 – 2008 р., номер державної реєстрації 0107U001123;
- “Швидкий розрахунок часових характеристик електроенергетичних систем на основі діакоптичного підходу та макромоделювання”, термін виконання: 2009 – 2010 р., номер державної реєстрації 0109U001148;
- “Побудова макромоделей компонент електроенергетичних систем на основі експлуатаційних характеристик”, термін виконання: 2011 – 2012 р., номер державної реєстрації 0111U001224;

- “Дискретні макромоделі та їх застосування до прогнозування характеристик електроенергетичних систем”, 2013 – 2015 р., термін виконання: 2011 – 2012 р., номер державної реєстрації 0113U003194 .

Автором виконано:

- огляд стану розвитку, класифікацію та можливостей використання засобів математичного моделювання електричних кіл та електротехнічних систем з використанням сучасних інформаційних технологій, а також засобів моделювання їх перехідних процесів. Надано рекомендації щодо застосування комп'ютерних програм, зокрема середовищ MATLAB/Simulink та ATP, обгрунтовано їх вибір для створення та адаптації математичних моделей та макромоделей елементів електричних кіл та систем у їх структуру;
- розроблено методику збору апіорної інформації, необхідної для побудови макромоделей, та обгрунтовано застосування експертного аналізу для її обробки;
- удосконалено методику побудови дискретних макромоделей елементів різної природи у вигляді "чорної скриньки" у формі змінних стану;
- розроблено алгоритм побудови макромоделей автономних систем, який дозволяє здійснювати прогнозування параметрів ЕЕС;
- дискретних макромоделей елементів електричних кіл та систем із зосередженими та розподіленими параметрами (лінії електропередавання, підстанції "Альбертірша").

Голова комісії:

Начальник НДЧ



Жук Л. В.

Члени комісії:

Завідувач кафедри ТЗЕ



Стахів П. Г.

Завідувач відділу
науково-організаційного супроводу
наукових досліджень



Лазько Г. В.

Начальник планово-фінансової
групи



Чулой Т. М.

“ПОГОДЖУЮ”
Головний диспетчер –
начальник РДЦ Західного регіону

Федун В.А.
" 02 " 03 2018 р.

А К Т

про використання наукових результатів дисертаційної роботи Гоголюк Оксани Петрівни “Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на основі макромодельовання”

Даним актом підтверджуємо дослідне використання математичної макромоделі короткотермінового прогнозування енергоспоживання у формі дискретних рівнянь стану, створену на основі реальних реєстрованих експлуатаційних характеристик для прогнозування енергоспоживання енергорайону, що живиться від ПС 330 кВ Яворів.

Побудована дискретна автономна модель добового енергоспоживання на основі даних за січень 2016 року була верифікована на основі даних наступних місяців, які не використовувались для її побудови. Підхід автономного макромодельовання може бути використаний для побудови математичних моделей для прогнозування навантаження із достатньо високою точністю. Запропонований підхід дозволяє розробляти детерміністичні моделі енергоспоживання та уникати процедури фільтрації астрономічних та випадкових факторів, які утруднюють процедуру прогнозування енергоспоживання.

В подальшому планується розглянути можливість побудови дискретних макромоделей інших об'єктів, які знаходяться в експлуатації, а також їх використання для перевірки умов експлуатації та прогнозування енергоспоживання як на коротко та і довгостроковий період.

Начальник відділу електричних та енергетичних режимів РДЦ Західного регіону



Наконечний Т.І.

Керівник групи оптимізації електричних режимів ВЕтаЕР РДЦ Західного регіону



Калимон Ю.І.

Інженер з розрахунків та режимів 1 кат. групи оптимізації електричних режимів РДЦ Західного регіону



Смігуровська М.М.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”



А К Т

про використання наукових результатів дисертаційної роботи Гоголюк Оксани Петрівни “ Розвиток теорії та методів аналізу динамічних режимів електричних кіл на основі макромоделювання”

Даним актом підтверджуємо можливість використання в електричних мережах ПАТ "Вінницяобленерго" математичної та комп'ютерної моделі блоку електропередачі у вигляді "джерело живлення-макромодель лінії електропередачі -навантаження" для прогнозування перебігу перехідних процесів ЕЕС.

На підставі запропонованої моделі виконано аналіз електромагнітних перехідних процесів у елементах системи електропередачі. Запропоновану математичну модель застосовано для розрахунку перехідних процесів під час комутаційних режимів з метою перевірки умов роботи основного електроустаткування та аналізу поведінки захисту елементів електропередач. Математичні макромоделі у вигляді “чорної скриньки”, описані за допомогою дискретних рівнянь стану, дозволяють відтворювати перехідні процеси досліджуваних об'єктів із задовільною точністю та уможливають моделювання можливих аварійних режимів.

В подальшому планується розглянути можливість побудови дискретних макромоделей об'єктів, які знаходяться в експлуатації, а також їх використання для аналізу динамічних режимів з метою уникнення аварійних ситуацій.

Директор з інформаційних технологій
ПАТ "Вінницяобленерго"

Томашевський Ю.В.