

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОБУДОВИ ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ТА ЇХНЯ АДАПТАЦІЯ ДО ПРОГРАМ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

О.П. Гоголюк^{1*}, канд.техн.наук, Ю.Я. Козак^{1**}, канд.техн.наук, Є. Росоловські^{2***}, докт.техн.наук, П.Г. Стахів^{1****}, докт.техн.наук

¹- Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, e-mail: spg@polynet.lviv.ua

²- Вроцлавський технологічний університет, Вибжеже Виспянського, 27, Вроцлав, 50-370, Польща, e-mail: eugeniusz.rosolowski@pwr.edu.pl

Запропоновано удосконалений алгоритм побудови дискретних макромоделей, що описують складові технічних систем різної природи, зокрема електротехнічних, з використанням експертного аналізу, розпаралелення та еволюційних підходів, який дає змогу суттєво зменшити обчислювальну складність процедури їхньої побудови. Окреслено можливості адаптації даного алгоритму до комп'ютерних програм, призначених для аналізу електротехнічних систем, компоненти яких є дискретними макромоделями. Бібл. 8, рис 1.

Ключові слова: математична макромодель, програмне забезпечення, оптимізація, алгоритм.

Вступ. Математичні макромоделі сьогодні відіграють ключову роль у програмних засобах, які використовуються для аналізу електротехнічних систем. Обчислювальна складність існуючих алгоритмів є досить високою, що зумовлює суттєві затрати часу. Важливим етапом у моделюванні динамічних систем є визначення параметрів і структури будованої моделі, тобто її структурна та параметрична ідентифікація. Задача структурної ідентифікації є найскладнішою й потребує великих затрат інтелектуальних й обчислювальних ресурсів, а правильний вибір структури моделі великою мірою визначає успіх побудови адекватної моделі системи [1–4]. У даній статті зроблена спроба розв'язання зазначеної проблеми шляхом паралелізації обчислень, та завдяки застосуванню еволюційного підходу.

Особливе місце серед методів моделювання посідають методи побудови моделей, які ґрунтуються на використанні принципу “чорної скриньки”, оскільки саме вони володіють низкою переваг, а саме:

- дають можливість будувати достатньо прості моделі для складних об'єктів (макромоделі);
- не вимагають знання внутрішньої будови модельованого об'єкта;
- універсалізують процедуру побудови моделі (тобто дають можливість застосовувати один підхід для побудови моделей об'єктів різної фізичної природи).

Для побудови таких моделей доцільним є використання методів оптимізації для знаходження оптимальних математичної форми моделі та набору значень її коефіцієнтів. Критерієм оптимальності в даному випадку є деяка функція мети, яка відображає відхилення поведінки моделі об'єкта від поведінки реального об'єкта моделювання. Цей підхід уможливує побудову моделі практично в будь-якій математичній формі, що описується скінченним набором коефіцієнтів та дає можливість використовувати будь-яку інформацію про модельований об'єкт.

Метою досліджень є підвищення ефективності алгоритмів і програмних засобів побудови дискретних макромоделей електротехнічних систем завдяки розпаралеленню та еволюційним підходам, а також адаптації макромоделей як компонент електричних кіл до існуючих програмних середовищ розрахунку динамічних режимів електротехнічних систем.

Засади підходу до побудови дискретних макромоделей та їхньої адаптації до існуючих програмних засобів. З погляду зручності та потреби моделювання систем електротехнічного характеру вибрано форму опису дискретних макромоделей згідно з методом змінних стану у вигляді “чорної скриньки” у наступному математичному записі [6, 7]:

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

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

Найбільш вживаною програмою для побудови дискретних макромоделей є пакет MATLAB/Simulink, який дає змогу будувати лінійні макромоделі згідно з алгоритмом Хо-Калмана. Нами створений програмний комплекс *Macromodel*, який базується на оптимізаційному підході та дає можливість будувати як лінійні, так і нелінійні макромоделі. Однак у процесі експлуатації цього комплексу з метою побудови макромоделей складних нелінійних електротехнічних об'єктів було виявлено суттєве зменшення точності макромоделі, зумовлене високою обчислювальною складністю процедури ідентифікації. З метою усунення цього недоліку нами запропоновано використання еволюційного підходу, який поєднується з паралельними обчисленнями й експертним аналізом.

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

- структурного аналізу – на основі фізичної структури досліджуваного об'єкта визначити структуру математичної моделі;
- 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;
- 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'єкта;
- вибору оптимального варіанта та стратегії побудови моделі.

З метою покращення якості макромоделі доцільно застосовувати еволюційні алгоритми, які дають змогу видозмінити її форму, звівши до максимально простої або бажаної з врахуванням необхідності подальшої адаптації до комп'ютерних програм та здійснити їхню реалізацію на паралельних обчислювальних засобах з можливістю вибору кращого варіанта моделі.

Як альтернативний підхід авторами розроблено програмне середовище *Macromodel*, яке дає можливість здійснювати побудову динамічних макромоделей об'єктів різної фізичної природи (електротехнічних, економічних тощо) у вигляді дискретних рівнянь стану із використанням оптимізації. Призначення середовища – створення макромоделі у вигляді нелінійного дискретного рівняння стану (1) з n вхідними та m вихідними сигналами. Програмне середовище написано мовою Delphi.

Процедура побудови макромоделі складається з етапів, схематично відображених на рисунку. Середовище *Macromodel* використовується в даному процесі як інструмент для проведення усіх розрахунків та відображення отриманих результатів. У ньому реалізовано:

- алгоритм направляючого конуса Растрігіна з процедурою адаптації довжини кроку пошуку та кута розкриття направляючого конуса, а також із процедурою швидкого проходження пологих ділянок [7], який виявився найбільш ефективним для практичного вирішення оптимізаційних задач;
- розпаралелення обчислень у разі виконання оптимізації на усі обчислювальні ядра ЕОМ, який дає прискорення в процесі оптимізації в декілька разів залежно від кількості обчислювальних ядер;
- алгоритм еволюційного підбору форми моделі, за допомогою якого вдається вирішити задачу структурної ідентифікації моделі;
- розпаралелення обчислень на декількох ЕОМ із синхронізацією через мережу інтернет, який пришвидшує виконання структурної ідентифікації моделі в багато разів залежно від кількості залучених ЕОМ.

Крім того, середовище *Macromodel* надає зручний інтерфейс, що сприяє його ефективному використанню, а саме:

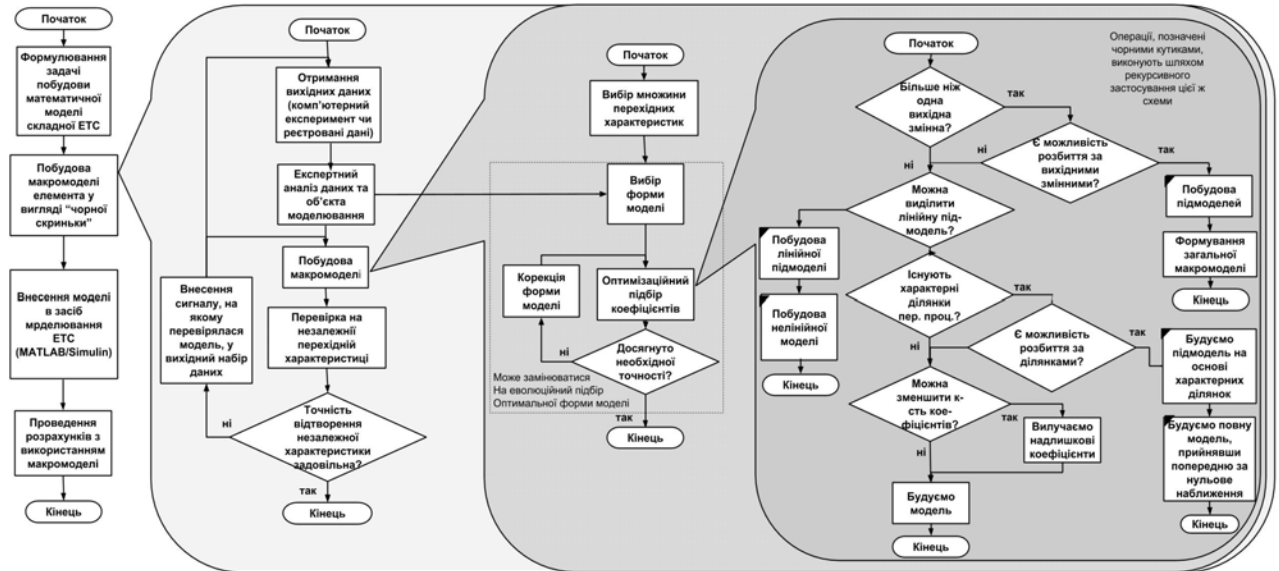
- зручна графічна оболонка, що дає можливість задавати набір перехідних характеристик, на основі яких будується модель, її форму, а також параметри оптимізації, зокрема оптимізаційного алгоритму та критеріїв оцінювання моделі;
- можливість перегляду перехідних характеристик у графічній формі;
- можливість спостерігати за процесом оптимізації та аналізувати проміжні результати в графічній та числовій формі, не зупиняючи оптимізаційну процедуру, а також змінювати параметри оптимізаційного алгоритму під час його виконання;
- можливість у ручному режимі встановлювати множину коефіцієнтів моделі, що підлягають оптимізації та змінювати їхнє початкове значення;
- аналіз та експорт коефіцієнтів отриманої макромоделі.

У випадку необхідності покращення роботи моделі можуть бути записані проміжні підмоделі з застосуванням еволюційних алгоритмів та експертного аналізу. Файл “проекту” має текстовий формат, що дає змогу у разі необхідності використовувати інструменти порівняння текстових файлів.

У процесі побудови макромоделі можна спостерігати за ходом оптимізації, не зупиняючи її виконання. Для реалізації функції спостереження за ходом оптимізації усі обчислення проводяться в фонових потоках, у той час як головний потік програми обслуговує взаємодію з користувачем. Доступ до даних, що змінюються в

процесі обчислень, як і їхнє прийняття в таких випадках, організовано з використанням засобів синхронізації, зокрема критичних секцій.

Аналогічно до можливості спостерігати за ходом оптимізації, не зупиняючи її виконання, є можливість змінювати параметри оптимізаційного алгоритму під час його роботи. Дана функція виявилася зручною разом із можливістю спостереження за ходом оптимізації, оскільки дає змогу підібрати оптимальні параметри алгоритму на основі швидкої візуальної оцінки швидкості роботи алгоритму. Для зручності отримання результатів побудови коефіцієнти будованої моделі можна переглянути у декількох формах представлення з можливістю скопіювати їх у буфер обміну Windows.



У програмі реалізовано декілька алгоритмів оптимізації, зокрема алгоритм градієнтного спуску як найчастіше згадуваний у задачах оптимізації, алгоритм направляючого конуса Растрігіна з процедурою адаптації довжини кроку пошуку та кута розкриття конуса, та процедурою швидкого проходження пологих ділянок [7, 8]. Програмна реалізація різних алгоритмів виконана з використанням об'єктно-орієнтованого програмування, зокрема поліморфізму. Ідентифікація моделі здійснюється з використанням безстатевої еволюції [1, 3, 4, 7]. Підтримувані мутації форми моделі дещо обмежені та включають лише дозвіл чи заборону застосування коефіцієнтів моделі. Структурна ідентифікація моделі з використанням еволюції потребує значно більше обчислювальних ресурсів у порівнянні з параметричною ідентифікацією [8]. Для забезпечення ефективності в обчисленнях такого типу програмний пакет підтримує розпаралелення з залученням багатьох ЕОМ. У цьому випадку кожна з ЕОМ проводить оцінку однієї з альтернативних форм представлення моделі. Сам еволюційний алгоритм виконується на тій ЕОМ, за якою працює оператор.

За використанням даного середовища розроблено адекватні нелінійні макромоделі одно- та трифазного трансформатора, вентильного та асинхронного двигунів, лінії електропередавання, а також моделі коротко- та довготермінового прогнозування навантаження [7]. Для забезпечення ефективного проведення обчислень з використанням усіх наявних обчислювальних ядер сучасних ЕОМ у програмному пакеті реалізовано підхід [7], який дає змогу здійснювати паралелізацію обчислень.

Адаптація дискретних макромоделей до сучасних програмних середовищ полягає в модернізації вхідної мови до опису дискретних макромоделей. Найбільш зручним програмним середовищем для цього є середовище MATLAB/Simulink, в якому передбачені дискретні макромоделі водночас з діакоптичною процедурою чисельного інтегрування. Однак у цьому випадку потрібно передбачити узгодження кроків інтегрування для окремих макромоделей. У програмі АТР/ЕМТР для адаптації дискретних макромоделей потрібно модернізувати процедуру опису вхідної інформації, додавши макромоделі як нові компоненти, а також організувати діакоптичні процедури розрахунку [5].

Запропоновані підходи розширюють можливості розглянутих програм і створюють бібліотеку макромоделей користувача. Дискретні макромоделі можна адаптувати до середовища Simulink з використанням S-функцій шляхом програмування математичних виразів, відповідних до структури лінійної та нелінійної частин макромоделі. У програмі АТР дискретні макромоделі багатополосних елементів у формі "вхід-вихід" програмується мовою MODELS із застосуванням модулів спеціального типу.

Висновки. Описані процедури і засоби, використані для побудови макромоделей у формі змінних стану із використанням модифікованих алгоритмів, що базуються на розпаралеленні обчислень та використанні еволюційного підходу, дали змогу зменшити обчислювальну складність задачі до 70 %. У зв'язку з великою розмірністю оптимізаційних задач застосування альтернативного програмного забезпечення дає можливість підвищити точність розрахунку та зменшити часові затрати на побудову макромоделей. Практика показує, що

час побудови моделі на сучасній 4-процесорній ЕОМ зменшується як мінімум втричі, як було показано, зокрема, при побудові макромоделі енергоострова «Бурштин-Альбертірша» [7].

Застосування еволюційного підходу до структурної ідентифікації макромоделі знижує обчислювальні затрати на перебір альтернативних форм представлення моделі. Для прикладу, при побудові макромоделі асинхронного електродвигуна [7] оптимальну форму моделі було отримано за ~100 поколінь еволюції, тобто було проаналізовано ~2000 форм представлення моделі, в той час як для прямого перебору альтернативних форм моделі слід було б проаналізувати ~2⁶⁰ альтернативних варіантів.

1. Ashlock D. Evolutionary Computation for Modelling and Optimization. New York: Springer, 2006. 578 p.
2. Butenko S., Pardalos P.M., Shylo V. Optimization methods and Application. New York: Springer, 2018. 639 p.
3. Chong E.K.P., Zak S.H. An Introduction to Optimization, 4th Edition, Wiley, 2013. 640 p.
4. Fletcher R. Practical Methods of Optimization, 2nd Edition, Wiley, 2000. 456 p.
5. Rosolowski E., Stakhiv P., Hoholyuk O. Transformer Discrete Macromodel for Simulation in ATP-EMTP Programme. *Proceedings of the International Conference EPNET'2016 (Electric Power Networks)*, Szklarska Poręba, Poland, September 19-21, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPNET.2016.7999378>
6. Salinelli E., Tomarelli F. Discrete Dynamical Models. Springer International Publishing, Switzerland 2014. 394 p.
7. Stakhiv P., Kozak Yu., Hoholyuk O. Discrete macromodeling in electrical engineering and related fields. Monography. Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2014. 260 p. (Ukr)
8. Stakhiv P., Byczkowska-Lipińska L., Kozak Yu. The Impact of Calculation Precision on the Process of Mathematical Model Construction with the Use of Optimization. *Przegląd elektrotechniczny*. 2013. No 3a. Pp. 283-285.

УДК 621.372.061

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОЗДАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ МАКРОМОДЕЛЕЙ И ИХ АДАПТАЦИЯ К ПРОГРАММАМ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

О.П. Гоголюк¹, канд.техн.наук, **Ю.Я. Козак¹**, канд.техн.наук, **Е. Росоловски²**, докт.техн.наук, **П.Г. Стахив¹**, докт.техн.наук

¹- Национальный университет “Львовская политехника”,
ул. С. Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина,

e-mail: spg@polynet.lviv.ua

²- Вроцлавский технологический университет,
Выбжеже Выспяньского, 27, Вроцлав, 50-370, Польша,

e-mail: eugeniusz.rosolowski@pwr.edu.pl

Предложен усовершенствованный алгоритм создания дискретных макромоделей, описывающих составляющие технических систем различной природы, в том числе электротехнических, с использованием экспертного анализа, распараллеливания и эволюционных подходов, позволяющий существенно снизить вычислительную сложность процедуры их создания. Очерчены возможности адаптации данного алгоритма к компьютерным программам, компоненты которых являются дискретными макромоделями. Библ. 8, рис. 1.

Ключевые слова: математическая макромодел, программное обеспечение, оптимизация, алгоритм.

INCREASING OF THE EFFECTIVENESS OF ALGORITHMS IMPLEMENTATION FOR DEVELOPMENT OF DISCRETE MACROMODELS AND THEIR ADAPTATION TO ELECTRIC CIRCUITS SIMULATION PROGRAMS

O. Hoholyuk¹, **Yu. Kozak¹**, **E. Rosolowski²**, **P. Stakhiv¹**

¹- Lviv Polytechnic National University,

12, str. S. Bandera, Lviv, 79013, Ukraine,

e-mail: spg@polynet.lviv.ua

²- Wrocław University of Technology,

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland, e-mail: eugeniusz.rosolowski@pwr.edu.pl

In the paper an improved algorithm for development of discrete macromodels describing technical system components of different nature, including electrical, using the expert analysis, parallel calculations and evolution technique is proposed. The algorithm makes it possible to reduce computational complexity of the macromodels creation essentially. The possibilities of the proposed algorithm adaptation to computer programs for electrical systems simulation which components are discrete macromodels were discussed. References 8, figure 1.

Key words: mathematical macromodel, program software, optimization, algorithm.

Надійшла 02.03.2018

Остаточний варіант 16.01.2019