

англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 3. Даффи Дж. А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. 4. Мхитарян Н. М. Гелиоэнергетика. Системы, технологии, применение. – К.: Наук. думка, 2002. 5. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 6. Smerdov A., Bondarenko B., Polyakov M., Brykun A. Stochastic models in solar energy // Proc. 4-th Res. and Devel. Conf. of Central and Eastern European Inst. of Agricultural Engin. – Moscow: VIESH, 2005. – P. 134–139. 7. Смердов А.А., Брикун А.Н. Описание случайных процессов генерации и потребления энергии в системах солнечной энергетики // Матеріали VI Міжнар. конф. “Відновлювана енергетика ХХІ століття”. – АР Крим. – 2005. – С. 44–47. 8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. – М.: Сов. радио, 1966.

УДК 621.3.011.72

П.Г. Стахів, Ю.Я. Козак, Ю.П. Франко
Національний університет “Львівська політехніка”

СТРУКТУРА МАКРОМОДЕЛІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПАРАМЕТРИЧНУ ІДЕНТИФІКАЦІЮ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

© Стахів П.Г., Козак Ю.Я., Франко Ю.П., 2009

Описано порівняльний аналіз затрат машинного часу і якість отриманої макромоделі залежно від вибраної форми макромоделей у вигляді нелінійного дискретного рівняння стану. Зазначене питання є важливим при автоматизації побудови макромоделей з використанням оптимізації, оскільки невдалий вибір математичного представлення, зокрема апроксимація нелінійних характеристик, часто приводить до значних чисельних затрат аж до зациклювання оптимізаційного процесу.

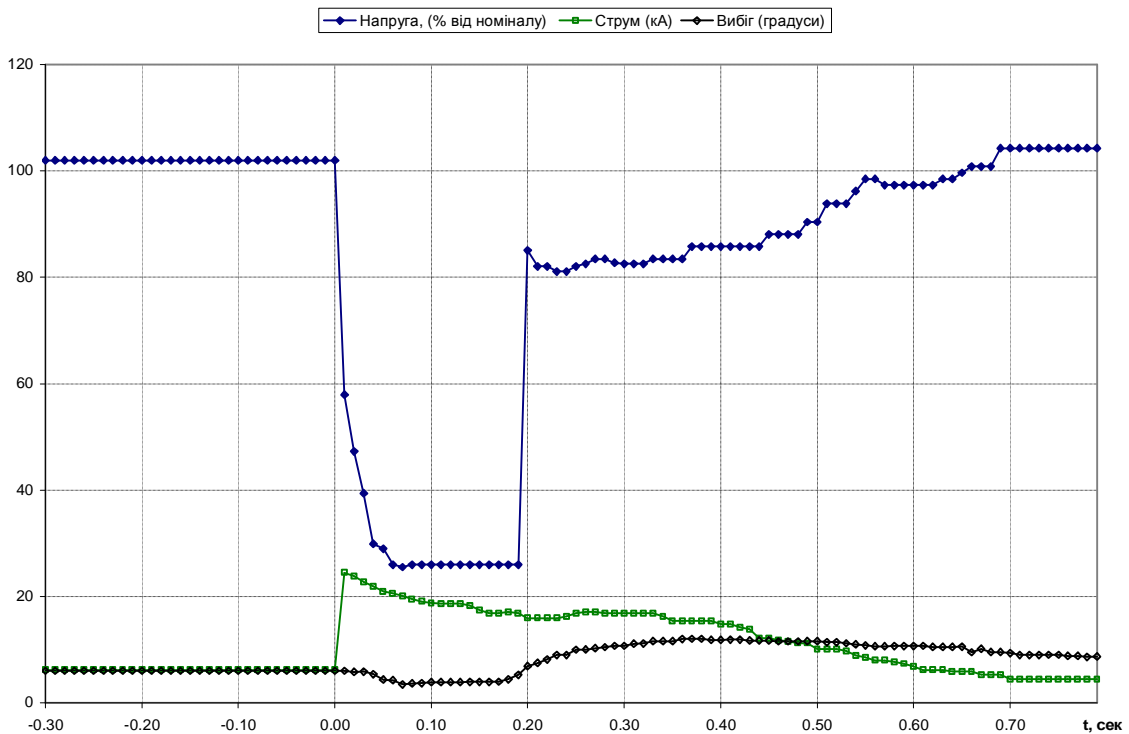
This paper is devoted to comparative analysis of computer time consumption and obtained model quality as dependence on selected form of developed macromodel using nonlinear discrete state equation. Mentioned question is an important one during automation of macromodel creation procedure using optimization algorithms because wrong choice of mathematical representation form (especially approximation of nonlinear characteristics) often leads to considerable numerical efforts up to optimization process failure.

Постановка проблеми. Задача математичного моделювання нелінійних динамічних систем є складною задачею з багатьма розв’язками. У задачах такого типу важливим є вибір оптимального розв’язку, який би забезпечував задану точність моделі і до того ж час мінімізував час її ідентифікації. [6] Універсального підходу до розв’язку цієї задачі не існує тому доцільним є розробка швидких алгоритмів ідентифікації макромоделей для певної групи об’єктів. У нашому випадку такою групою моделювання об’єктів є електромагнітні системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування оптимізаційного підходу до побудови динамічних макромоделей дозволило певною мірою уніфікувати процедуру ідентифікації параметрів моделі на основі концепції “чорної скриньки” [1]. Однак така уніфікація, яка цілком ігнорує особливості модельованого об’єкта, приводить до значних затрат комп’ютерного часу під час реалізації процедур оптимізації, зокрема внаслідок великої кількості змінних оптимізації [5]. Пришвидшення процесу обчислень шляхом розпаралелення є доволі складним і не завжди дає позитивний результат [2, 4]. Тому перспективним є підхід до побудови дискретних макромоделей, який на етапі структурної ідентифікації, дозволяє вибрати оптимальну форму математичної моделі.

Задача досліджень. Метою досліджень, викладених у цій статті, є оптимальний вибір форми дискретного нелінійного рівняння стану в якості математичної макромоделі, на основі певної апіорної інформації про об'єкт шляхом експертного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо побудову динамічної макромоделі турбогенератора АСТГ–200. В якості апіорної інформації для побудови макромоделі використовувалися перехідні характеристики (див. рисунок) взяті з натурального експерименту, проведеного на Бурштинській ГЕС в складі планового дослідження режиму раптового короткого замикання в енергосистемі. Під час експерименту відбувалося короткочасне (0.2 с) коротке замикання на лінії передачі.



Вихідні дані для побудови макромоделі

Не обмежуючи загальності розглядатимемо макромоделю у формі дискретних рівнянь стану, оскільки ця форма є найбільш зручною для використання на ЕОМ [1]:

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

Вхідною змінною \mathbf{v} тут є амплітудне значення напруги статора, а вихідними \mathbf{y} – струм статора та вибіг ротора.

Побудова макромоделі відбувалася з використанням оптимізаційного підходу [0], суть якого полягає ось у чому. Припустимо, що вибрана нами математична форма (1) представлення моделі динамічної системи характеризується деяким набором невідомих параметрів λ , якими є елементи матриць \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{C} , \mathbf{D} та коефіцієнти вектор-функції $\Phi(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)})$. Введемо критерій оцінювання точності моделі $Q(\lambda, \dots) > 0$, який відображає похибку відтворення моделлю поведінки системи на відомих нам часових інтервалах. Тоді побудова моделі зводиться до знаходження такого значення λ^* , при якому функція Q буде мінімальною. Варто зауважити, що функція мети, як часто називають функцію Q , може відобразити не лише точність відтворення поведінки системи, а також враховувати деякі бажані критерії самої моделі, наприклад її складність.

Задача пошуку точки мінімуму нелінійної функції Q є доволі складним завданням, якому присвячено багато праць [0, 0]. Не вдаватимемося в детальний розгляд цього питання, згадаємо лише що сьогодні вже існують доволі хороші методи розв'язання цієї задачі, які успішно використовуються на практиці. Автори використовували модифікований метод напрямного конуса Растрігіна [0], який добре працює у випадку “ярового” характеру функції мети, що характерно для випадку побудови макромоделей при наявному заданні функції Q .

Значення невідомих параметрів вектора $\hat{\lambda}$ одержували оптимізацією, починаючи з нульових початкових значень змінних. Функцією мети вибираємо середньоквадратичне відхилення поведінки моделі від поведінки модельованого об'єкта

$$Q(\hat{\lambda}) = \sum_k \left| \mathbf{y}^{\mathbf{r}} - \mathbf{y}^{\mathbf{r}*} \right|^2, \quad (2)$$

де $\mathbf{y}^{\mathbf{r}}$ – перехідні характеристики розраховані за допомогою макромоделі, $\mathbf{y}^{\mathbf{r}*}$ – характеристики модельованого об'єкта подані на рисунку.

Об'єктом нашого дослідження є вибір нелінійної функції $\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)})$, і вплив форми її математичного представлення разом з процедурою знаходження відповідних коефіцієнтів матриць на час побудови макромоделі і її якість.

Розглянемо три способи побудови вектор-функції $\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)})$.

Апроксимація квадратичним поліномом. У цьому випадку

$$\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)}) = \mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)} \cdot A_1 \cdot \mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)} + \mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)} \cdot A_2 \cdot \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)} + \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)} \cdot A_3 \cdot \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)}, \quad (3)$$

де A_1, A_2, A_3 – матриці невідомих коефіцієнтів відповідного розміру.

Цей підхід просто алгоритмізується, проте як ми побачимо нижче, може давати незадовільні результати.

В другому підході вважаємо, що на основі певної апріорної інформації ми можемо визначити форму функції $\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)})$ близьку до оптимальної. Ця інформація може базуватися на певних фізичних властивостях чи конструктивних особливостях, наприклад, характері нелінійних залежностей, кореляції окремих змінних. Визначивши форму функції $\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)})$ її коефіцієнти знаходитимемо з використанням оптимізації аналогічно до попереднього способу.

Результат цього підходу істотно залежить від правильності вибраної форми моделі. Для нашого аналізу візьмемо форму, отриману в підході, описаному нижче, проте опустимо проміжні етапи, а просто знайдемо невідомі коефіцієнти за допомогою оптимізації:

$$\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)}) = a_1 \left(\mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)} \right)^2 + a_2 \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)} \mathbf{x}_I^{\mathbf{r}(k)} + a_3 \left(\mathbf{x}_I^{\mathbf{r}(k)} \right)^2. \quad (4)$$

Варто відзначити, що ця форма має набагато менше невідомих коефіцієнтів (приблизно на порядок) порівняно з апроксимацією поліномом, описаною в першому способі.

Багатоетапна експертна побудова макромоделі. Цей підхід є розширенням попереднього підходу можливістю коректувати форму представлення $\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)})$ під час проведення оптимізації. Доволі часто форма моделі, яка здавалася оптимальною перед запуском оптимізації, виявляється недосконалою після знаходження коефіцієнтів. Порівняння реакції отриманої неточної макромоделі і модельованого об'єкта дає багато інформації для коректування форми $\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)})$.

На практиці форма $\Phi(\mathbf{x}^{\mathbf{r}(k)}, \mathbf{v}^{\mathbf{r}(k)})$ може уточнюватися шляхом введення додаткових доданків чи заміни одних доданків іншими. Знайдені коефіцієнти макромоделі можуть виступати першим наближенням для подальшої оптимізації. Ще одним способом багатоетапної побудови моделі є введення деякої проміжної задачі, яка є простішою і розв'язання якої спрощує побудову шуканої макромоделі. Для нашого прикладу спростимо задачу шляхом введення деяких допоміжних

величин в вектор вхідних змінних, враховуючи, що струм статора в момент короткого замикання раптово зростає, при цьому напруга, яка є вхідним параметром, в цей момент падає не миттєво. Отже, має сенс припущення, що вираз для струму буде містити похідну від напруги. Для спрощення оптимізаційної задачі, введемо в вектор вхідних змінних \mathbf{v} різницю між біжучим значенням вхідної напруги і її попереднім значенням. Це зменшить необхідну кількість компонент вектора змінних стану на одиницю, і, відповідно, значно спростить оптимізаційну задачу. Також, як це очевидно з рисунка, в момент зняття короткого замикання різкої зміни струму не спостерігається. Тому логічним є вважати, що залежність струму від приросту напруги, який ми ввели в вектор \mathbf{v} в попередньому пункті, є нелінійною. Для подальшого спрощення оптимізаційної задачі, введемо в вектор вхідних змінних \mathbf{v} нелінійну функцію цього приросту вигляду $f(x)=x-x^2/K$, де K підібрано так, щоб значення $f(x)$ в момент зняття короткого замикання дорівнювала нулю. Отже, наша проміжна макромодель матиме три вхідні величини: напругу, її приріст і згадану нелінійну функцію приросту, а також і дві вихідні величини: струм статора та вибіг ротора. Введення згаданих допоміжних величин значно спрощує побудову проміжної макромоделі. У нашому випадку вдалося отримати достатньо точну модель, обмежившись лінійною моделлю з трьома компонентами вектора змінних стану \mathbf{x} . Побудувавши проміжну макромодель, зможемо підставити відповідні вирази для введених нами допоміжних вхідних величин і отримати повну макромодель турбогенератора.

У цій статті упустимо деталі проведення побудови і саму макромодель, оскільки вони наведені в статті [5]. Підсумуємо лише результати.

Результати аналізу ефективності побудови макромоделі при використанні різних способів знаходження $\Phi(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)})$

Спосіб знаходження $\Phi(\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{v}^{(k)})$	Досягнута точність	Кількість ітерацій
1. Апроксимація квадратичним поліномом	Оптимізаційний алгоритм зациклюється	
2. Експертний аналіз для знаходження форми	20%	20000
3. Багатоетапна експертна побудова	15%	20000

Висновки. Результати, наведені в таблиці, надані для прикладу побудови макромоделі турбогенератора, проте якісно аналогічна картина спостерігається і при побудові макромоделей більшості нелінійних динамічних об'єктів з використанням оптимізації.

Як бачимо, при використанні класичної апроксимації оптимізаційна задача виявляється занадто складною для використовуваного оптимізаційного алгоритму. Основною причиною її ускладнення є велика кількість невідомих величин, що характерно для апроксимації вектор-функції поліномом. Проте навіть якби вдалося знайти задовільну точку мінімуму функції мети, внаслідок відсутності обмеження на характер нелінійності отримана макромодель з великою імовірністю буде достатньо точно відтворювали лише ті режими роботи, які представлені в апіорній інформації, що використовувалася в оптимізації. Фактично при забезпеченні “математичної” точності моделі на достатньому рівні може не відтворюватися фізика процесів. Така модель є некоректною, і бракується на етапі перевірки, оскільки неправильно відтворює інші режими, що не увійшли до набору режимів, на основі яких робилася оптимізація.

Цей негативний результат можна поширити і на інші види апроксимації, оскільки згадані фактори будуть характерними для будь-якого її вигляду.

Експертний аналіз для знаходження оптимальної форми моделі як і багатоетапна експертна побудова дали змогу побудувати макромодель задовільної точності. Багатоетапна експертна побудова є найскладнішим, найменш формалізованим і одночасно найефективнішим способом побудови макромоделей.

Як зрозуміло, вибір форми відображення нелінійності для побудови макромоделей нелінійних динамічних об'єктів з використанням оптимізації є складним, недосить вивченим і важливим питанням, яке існує під час автоматизації розглядуваного методу побудови макромоделей.

1. Стахів П.Г., Козак Ю.Я. Побудова макромоделей електромеханічних компонент із використанням оптимізації // *Технічна електродинаміка*. – 2001. – № 4. – С. 33–36. 2. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. – М.: Мир, 1974. – 396 с. 3. Растрюгин Л.А., Рипа К.К., Тарасенко Г.С. Адаптация случайного поиска. – Рига: Зинатне, 1978. – 242 с. 4. Козак Ю.Я. Модифікація методу направляючого конуса Растрюгіна // *Електроніка і зв'язь*. – Темат. вып.: *Проблеми фізической и биомедицинской электроники*. – 1997. – С. 424. 5. Kozak Y., Sehedo M., Stachiv P. *Mathematical macromodel of turbogenerator based on experimental data* // *Proceedings of VI-th Scientific and Technical Conference SIECI 2008*, pp. 411-414. 6. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 431 0441.

УДК 681.5.017

П.Й. Тарасевич

Інститут електродинаміки НАН України

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ НАПРУГОЮ 110–750 КВ, ЩО ВІДМОВИЛИ

© Тарасевич П.Й., 2009

Наведені статистичні дані про ймовірність виникнення відмови високовольтних вимикачів напругою 110–750 кВ на розподільчих пристроях підстанцій. Запропоновано новий спосіб виявлення вимикачів, що відмовили, та результати порівняння його із способом, який широко застосовують нині на розподільчих пристроях підстанцій.

The statistical information of probability of the high-voltage switch failures of 110-750 kV on the substations are submitted. The new way of detecting of the failures switches and results of comparison with way widely used on substations at present is offered.

Вимоги до надійності високовольтних вимикачів, які встановлені на розподільчому пристрої підстанції, є першочерговими. Від вдалого проведення комутаційних операцій залежить робота не тільки підстанції, де встановлені вимикачі, але й часто всієї енергосистеми. Для підвищення показників безвідмовної роботи вимикачів на підстанціях використовують пристрої резервування відмови вимикачів (ПРВВ), а також системи сигналізації вимикачів, які відмовили. Наявність цих пристроїв та систем дозволяє зменшити негативні наслідки, які зумовлені відмовами, завдяки оперативній оцінці та своєчасному впливу на ситуацію, яка виникла.

Для підстанцій з приєднаннями, на яких встановлені високовольтні вимикачі, застосування системи сигналізації відмовленого вимикача є обов'язковою вимогою. Обслуговуючий персонал завдяки системі сигналізації, може оперативнo визначити відмовлений вимикач та прийняти відповідні заходи для поновлення живлення ліній, які відключені ПРВВ.

Сьогодні завдання визначення вимикачів, які відмовили, на розподільчих пристроях підстанцій вирішують винятково за допомогою систем сигналізації. Такий підхід характеризують зайві матеріальні витрати порівняно зі способом, який запропоновано в цій роботі. Дослідження показують, що ефективне виявлення вимикачів, які відмовили, є досить актуальним завдяки ось чому.