

2. Імпульсні випробування ізоляції нейтралей обмотки ВН для трансформаторів з обмотками з'єднаними в «зірку» повинні проводитись з використанням імпульсної хвилі з параметрами «10,5/500».

3. Наявність робочої напруги на обмотках трансформатора за дії на нього в експлуатації імпульсних перенапруг розрахункової величини призводить до виникнення на обмотках трансформаторів внутрішніх коливань перенапруг, величина яких перевищує допустимі для поздовжньої ізоляції значення, що може призвести до його пошкодження.

1. Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. *Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик* // *Электричество*. – М., 2005. – № 5. 2. Конторович Л.Н., Молнар М.М., Никонець О.Л. *Математична модель трифазного трансформатора для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі* // *Новини енергетики*. – 2010. – № 3. 3. Олійник М.Й., Никонець О.Л., Ліщак І.В., Мальцева Н.Г. *Аналіз ефективності імпульсних випробувань трансформатора розподільчої мережі зі з'єднанням обмотки ВН за схемою «зірка»* // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. – 2010. – № 67: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – С. 76–80. 4. Долгинов А. И. *Перенапряжения в электрических системах*. – М., Л.: ГЭИ, 1962. – 512 с. 5. ГОСТ 1516.3-96 *Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции*. – К.: Госстандарт Украины, 1999. 6. Сапожников А.В. *Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности*. – М.: Энергия, 1969. – 269 с.

УДК 621.372

С.Й. Рендзіняк, Ю.Я. Козак

Національний університет «Львівська політехніка»,  
кафедра ТЗЕ

## ЗАСТОСУВАННЯ ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ ПІДСИСТЕМ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ДІАКОПТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

© Рендзіняк С.Й., Козак Ю.Я., 2011

Запропоновано застосування діакоптичного підходу до аналізу перехідних процесів у різномірних електричних колах, які складаються з нелінійних динамічних підсхем, поданих дискретними макромоделями, і підсхем з компонентами з зосередженими параметрами. Цей метод реалізовано у програмному комплексі, адекватність результатів чисельних експериментів показано на тестовому прикладі.

**Ключові слова:** діакоптика, нелінійна динамічна система, дискретна макромодель.

**In the paper the diakoptic approach to the transient analysis in heterogeneous electrical circuits consisting of nonlinear dynamic subcircuits submitted discrete macromodels and subcircuits with lumped parameters is proposed. This method is implemented in software system, the adequacy of numerical experiments are shown in the test example.**

**This paper is devoted to the solving task of property prediction on the basis of analogical inference.**

**Key words:** diakoptic, nonlinear dynamic system, macromodel.

### Вступ

Проектування і аналіз сучасних динамічних систем, які містять велику кількість компонент часто різної фізичної природи, вимагає значних обчислювальних ресурсів. Це зумовлено як

великою кількістю компонент проектованої системи, так і різноманітністю фізичних явищ, які необхідно враховувати у математичній моделі. Використання дискретних макромоделей у таких умовах дозволяє істотно зменшити обчислювальні затрати, оскільки дає змогу не враховувати неістотні явища для конкретного виду аналізу. При цьому макромоделями можна описати як окремі компоненти проектованої системи, так і підсистеми значного розміру з елементами різної фізичної природи. З іншого боку, наявність математичних моделей різнорідних підсистем вимагає застосування діакоптичного підходу для розрахунку динамічних режимів системи загалом. Такий стан речей вимагає розроблення універсальних і ефективних підходів для побудови макромоделей складних нелінійних динамічних об'єктів у зручній для подальшого використання формі.

### Аналіз результатів останніх досліджень і задачі досліджень

Сьогодні існує ціла низка підходів і методів, які можуть бути використані для побудови макромоделей нелінійних динамічних систем [1, 2], проте сфера їх застосування обмежена, що зумовлено складністю поставленої задачі. Однак діакоптичний підхід передбачає застосування макромоделі нелінійної динамічної підсистеми як частини повного електричного кола [3]. Тоді розв'язок кожної підсистеми на певному часовому інтервалі знаходиться відповідними чисельними методами. Такий підхід дозволяє інтегрувати нові макромоделі до наявних програмних комплексів, у яких реалізовано розрахунок динамічних режимів діакоптичними методами. У цій статті проводиться аналіз проблем, які виникають на шляху побудови макромоделей нелінійних динамічних систем та їх застосування у програмному комплексі DYNAPART, і даються рекомендації щодо їх можливого вирішення.

### Процедура побудови макромоделей нелінійних динамічних систем

Розглянемо побудову макромоделей за принципом «чорної скриньки». Такий підхід дає змогу абстрагуватися від внутрішньої структури модельованого об'єкта і, відповідно, дозволяє будувати максимально прості макромоделі.

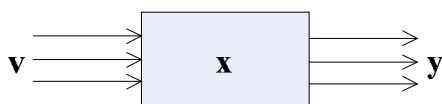


Рис. 1. Об'єкт макромодельовання

Об'єкт макромодельовання схематично зображено на рис. 1.

Вектором  $\mathbf{v}$  тут позначено вхідні величини, вектором  $\mathbf{y}$  – вихідні величини, вектором  $\mathbf{x}$  – величини, що описують внутрішній стан модельованого об'єкта, тобто змінні стану, які не мають певного фізичного змісту.

Задача макромодельовання полягає в тому, щоб знайти такий математичний оператор, за допомогою якого можна на основі відомих вхідних величин  $\mathbf{v}$  і початкового значення вектора  $\mathbf{x}$  через початкове значення вихідної величини  $\mathbf{y}$  розрахувати реакцію модельованого об'єкта у.

Однією з найзручніших форм подання макромоделі є дискретні рівняння стану:

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

де  $\mathbf{v}$  – вектор вхідних змінних;  $\mathbf{y}$  – вектор вихідних змінних;  $\mathbf{x}$  – вектор змінних, що описують стан об'єкта;  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$  – матриці коефіцієнтів макромоделі;  $\mathbf{F}$  – деяка нелінійна вектор-функція багатьох змінних;  $k$  – номер дискрети.

Дискретна форма є зручною під час обчислень на ЕОМ, оскільки дає змогу уникнути апроксимації вихідних даних, і є практичнішою під час застосування. Форма рівнянь стану також зумовлена зручністю подальшого використання макромоделі об'єкта як компоненти складнішої динамічної системи.

Розглянемо деякий об'єкт, для якого будується макромодель у формі (1). Нехай відомий ряд його перехідних характеристик  $\{\mathbf{v}_i^{(k)}; \mathbf{y}_i^{(k)}\}$ , де  $k$  – номер дискрети,  $i$  – номер характеристики. Уведемо функцію мети, яка відображає похибку, з якою будована макромодель відтворює

поведінку модельованого об'єкта. У найпростішому випадку це може бути середньоквадратичне відхилення

$$Q(\lambda) = \sum_i \sum_k \left( y_i^{(k)} - y_i^{(k)} \right)^2, \quad (2)$$

де  $y_i^{(k)}$  – відгук об'єкта, розрахований за допомогою будованої макромоделі,  $\lambda$  – ряд параметрів макромоделі.

При побудові макромоделі у формі (1) вектор  $\lambda$  включатиме елементи матриць **F**, **G**, **C**, **D** і коефіцієнти вектор-функції **Φ**.

Оптимальним рядом коефіцієнтів макромоделі буде ряд  $\lambda^*$ , при якому функція мети (2) досягає свого мінімуму. Отже, ідентифікація коефіцієнтів макромоделі зводиться до знаходження точки глобального мінімуму функції (2).

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

Враховуючи складність оптимізаційної задачі, яка в нашому випадку є істотно нелінійною з великою кількістю невідомих коефіцієнтів і великим розкидом рівня залежності оптимізованої функції  $Q^*$  від різних параметрів, потрібно звернути увагу на вибір оптимізаційного алгоритму. Практика показує, що для таких задач найкраще використовувати стохастичні оптимізаційні алгоритми, які зокрема є значно менш чутливими до великої кількості локальних мінімумів, що виникають внаслідок похибок округлення і великої кількості обчислень. Автори використовували алгоритм направляючого конуса Растрігіна [4] з адаптацією довжини кроку пошуку і кута розкриття конуса.

### Інтеграція макромоделі динамічної підсистеми

#### у програмному комплексі розрахунку динамічних режимів DYNAPART

Програмний комплекс DYNAPART [3, 5, 6], призначений для розрахунку динамічних режимів аналогових різномірних електричних кіл діакоптичними методами, забезпечує максимальне використання переваг діакоптичного підходу за методом роздільного інтегрування і надає можливість додавати підсхеми, описані різними математичними моделями. Компонентами електричної схеми можуть бути, звичайно, пасивні двополюсники, джерела заданої напруги та заданого струму з різними формами сигналів, керовані джерела напруги і струму, які є елементами математичних моделей напівпровідникових елементів тощо. Тут використовуються також макромоделі частин схеми, які задано в окремій бібліотеці компонент електричної схеми. Сюди входять окрім моделей компонент з зосередженими параметрами моделі довгих ліній з розподіленими параметрами. Програмний комплекс забезпечує також ввід дискретних макромоделей багатополюсників. Між підсхемами встановлюють зв'язки за допомогою додаткових «фіктивних» пар джерел напруги і струму (рис. 2), параметри яких відповідають вхідним і вихідним змінним підсхем.

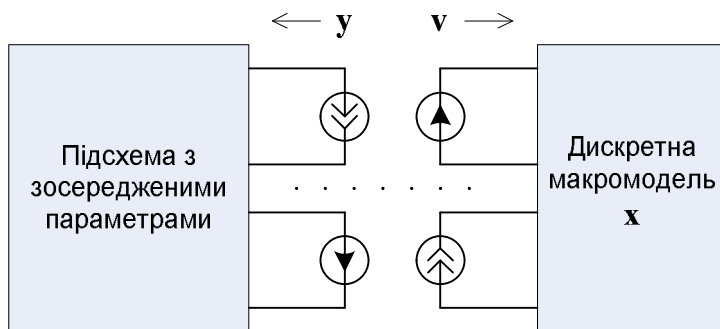


Рис. 2. Встановлення зв'язків між окремими підсхемами

Структуру блока моделювання подано на рис. 3. Тут моделювання підсхеми з дискретною нелінійною макромоделлю протягом одного кроку дискретизації відбувається у підпрограмі PNLD, яка також забезпечує моделювання підсхем з дискретизованими резистивними компонентами. Решта програмних блоків забезпечують моделювання інших підсхем відповідними чисельними методами з типовими для них кроками інтегрування.

У підпрограмі корекції змінних зв'язку COREJ відбувається розрахунок параметрів «фіктивних» джерел зв'язку з відомих внутрішніх змінних стану підсхем у момент узгодження змінних зв'язку підсхем. Оскільки для дискретної макромоделі задано певне значення кроку дискретизації, яке під час обчислень не змінюється на відміну від кроку інтегрування підсхем з зосередженими параметрами, то виникає проблема узгодження розв'язків підсхем, яка вирішується квантуванням часового кроку. Тобто всі часові інтервали, задіяні у процедурі розрахунку, пропорційні у ціле число разів певному дійсному числу.

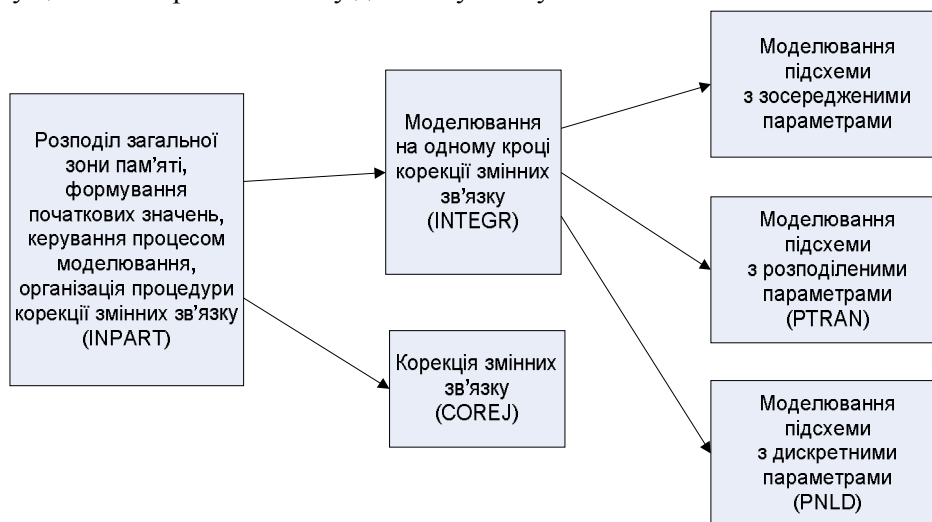


Рис. 3. Структура блока моделювання

На вхідною мовою програмного комплексу скорочений опис підсхеми з дискретною нелінійною макромоделлю подається такими операторами:

```

E ...=...; ... ! список внутрішніх незалежних джерел енергії
X 1=N (мс); X 2; X 3; ...; X n; ! перелік змінних стану, де N -
крок дискретизації
FE n (n1-n2); FJ n (n3-n4); ... ! список «фіктивних» джерел
f_n 1 ...=...; ! список можливих додаткових нелінійних компонент
DSCR EQU = A, An, AnXn, AnXn; ! матриці моделі
i_y k1x k2x k3x k1v k2v k3v K_yxv ...; ! коефіцієнти нелінійних компонент
EndP; ! кінець підсхеми
  
```

Такий опис відповідає математичній моделі у вигляді

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}^{(k+1)} \\ \mathbf{i}_E^{(k+1)} \\ \mathbf{y}^{(k+1)} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \mathbf{x}^{(k)} \\ \mathbf{E}^{(k)} \\ \mathbf{v}^{(k)} \end{pmatrix} + \mathbf{A} \mathbf{n} \cdot \mathbf{f}_n(\mathbf{x}_n^{(k)}) + \begin{pmatrix} \mathbf{F}^{(k)} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

де  $\mathbf{x}_n^{(k)} = \mathbf{A} \mathbf{X} \mathbf{n} \begin{pmatrix} \mathbf{x}^{(k)} \\ \mathbf{E}^{(k)} \\ \mathbf{v}^{(k)} \end{pmatrix} + \mathbf{A} \mathbf{n} \mathbf{X} \mathbf{n} \cdot \mathbf{f}_n(\mathbf{x}_n^{(k)})$  – аргументи певних нелінійних функцій  $\mathbf{f}_n^{(*)}$ ,

$\Phi_{iy}^{(k)} = K_{yxv} x_{k1x}^{(k)} x_{k2x}^{(k)} x_{k3x}^{(k)} v_{k1v}^{(k)} v_{k2v}^{(k)} v_{k3v}^{(k)}$  – компоненти специфічних нелінійних (степеневих) функцій

дискретної макромоделі,  $i_y, k1x, k2x, k3x, k1v, k2v, k3v$  – індекси відповідних компонент векторів  $\Phi^{(k)}, \mathbf{x}^{(k)}$  і  $\mathbf{v}^{(k)}$ . Рівність нулеві будь-якого індексу означає відсутність відповідного множника у добутку.

### Приклад аналізу перехідного процесу

Під час числового експерименту досліджувався перехідний процес в електричному колі з трансформатором, навантаженим на однопівперіодний випростувач з С-фільтром. До первинної обмотки приєднано джерело синусоїдної напруги. Дискретна нелінійна макромодель однофазного трансформатора [5] описується системою рівнянь

$$\begin{pmatrix} x_1^{(k+1)} \\ x_2^{(k+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.992 & 0 \\ 0 & 0.996 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^{(k)} \\ x_2^{(k)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.05 & 0 \\ 0 & 0.05 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1^{(k)} \\ u_2^{(k)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.048u_1^{(k)} - 0.00048x_1^{(k)} \\ 0 \end{pmatrix} (x_1^{(k)})^2;$$

$$\begin{pmatrix} i_1^{(k+1)} \\ i_2^{(k+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.001 & 0.0283 \\ 0.0153 & -0.00013 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^{(k+1)} \\ x_2^{(k+1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.0947 & -0.332 \\ 0.151 & 0.193 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1^{(k+1)} \\ u_2^{(k+1)} \end{pmatrix},$$

де  $x_1, x_2$  – деякі внутрішні змінні стану, які не мають певного фізичного сенсу,  $u_1, u_2$  – миттєві значення напруг первинної і вторинної обмотки,  $i_1, i_2$  – миттєві значення струмів первинної і вторинної обмоток,  $k$  – номер дискретизації. Крок дискретизації визначає числові параметри дискретної макромоделі і залежить від діапазону робочих частот компоненти.

Опис досліджуваної динамічної системи у програмному комплексі DYNAPART:

```
* однофазний трансформатор з випростувачем
E E (1a-0) sin=0,500,50; R 1 (1a-1)=1;
FJ i1 (1-0);
FJ i2 (2-0); R J (0-2)=100;
VD 1 .D220 (2-3);
C f 3-0=1u;
R n 3-0=5k;
EndP;
X 1=0.1; X 2; FE u1 (1-0); FE u2 (2-0);
Nonlinear comp L=
1 1 1 0 1 0 0 0.048m 1 1 1 1 0 0 0 -0.00048;
DSCR EQU =
0          992          0.05m          0
0          0.996          0          0.05m
0.001k     0.0283k     0.0947          -0.332
0.0153k    -0.00013k   0.151          0.193;
End;
Options=1; Tmax=100m;
EndS;
```

Розрахунок перехідного процесу проводився у двох режимах роботи трансформатора: номінальному режимі (рис. 4), який наближений до лінійного режиму, та режимі насичення (рис. 5), де амплітуда напруги первинної обмотки трансформатора збільшена у два рази. Результати розрахунку перехідних процесів цієї тестової схеми загальновідомі, і не викликають сумнівів в адекватності отриманих результатів.

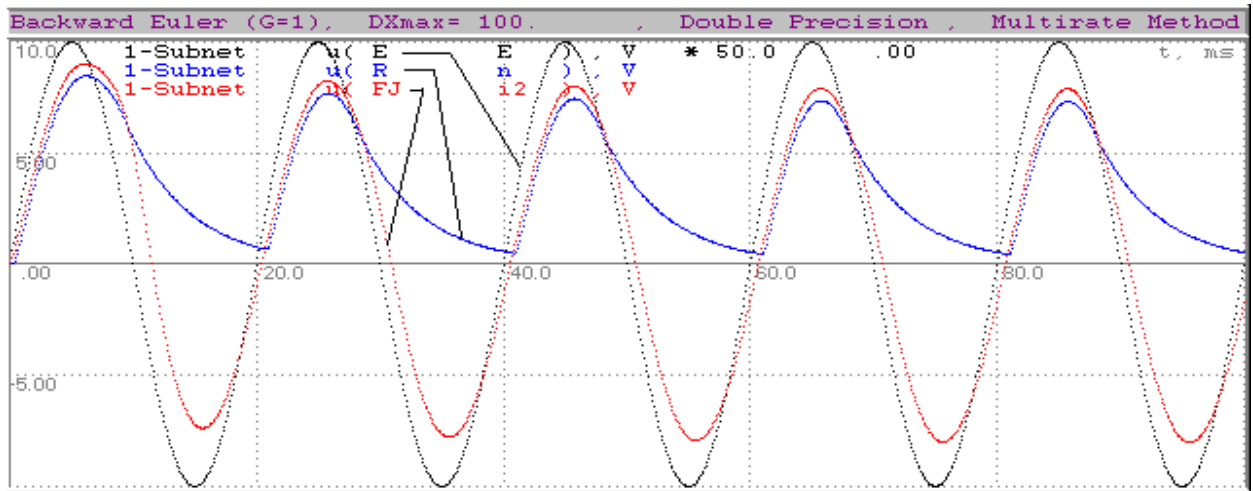


Рис. 4. Графіки миттєвих значень напруг первинної  $u(E E)$  і вторинної  $u(FJ i2)$  обмоток трансформатора та напруги на опорі навантаження  $u(R n)$  у номінальному режимі

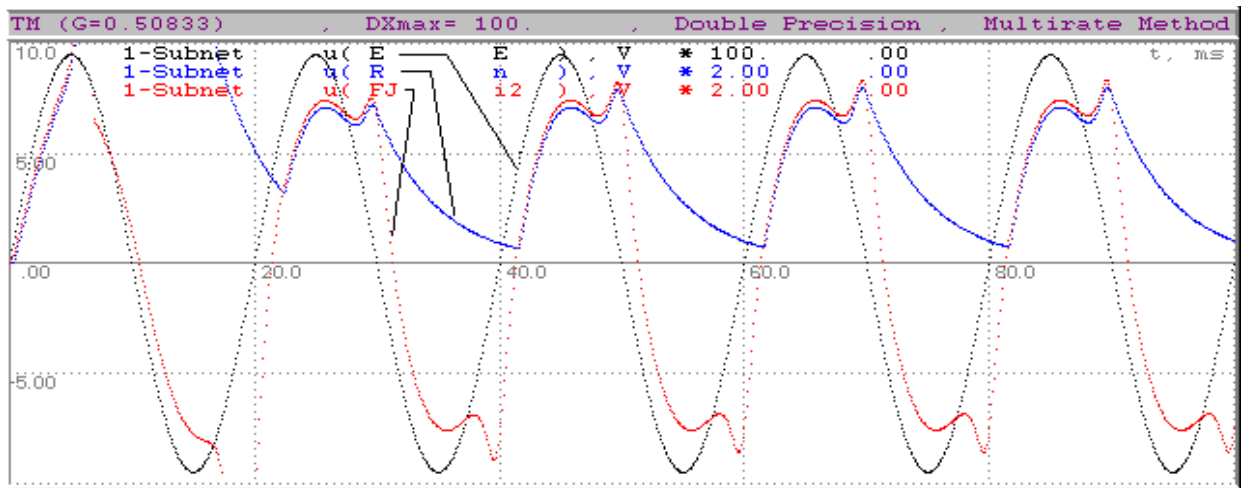


Рис. 5. Графіки миттєвих значень напруг первинної  $u(E E)$  і вторинної  $u(FJ i2)$  обмоток трансформатора та напруги на опорі навантаження  $u(R n)$  у режимі насичення

### Висновки

Потенційні можливості діакоптического підходу до розрахунку динамічних режимів нелінійних систем, складених з різнорідних частин, нині не вичерпано. Ефективне впровадження у програмному комплексі розрахунку електричних кіл діакоптичними методами нового математичного об'єкта, а саме дискретної макромоделі компоненти нелінійної динамічної системи підтверджує правильність обраного шляху удосконалення сучасних методів аналізу різнорідних систем.

1. Гроп Д. Методы идентификации систем / Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. 2. Калман Р., Фарб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем / Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. 3. Стахів П.Г., Рендзіняк С.Й. Застосування діакоптического підходу до розрахунку складних електротехнічних кіл з багатополосними елементами // Технічна електродинаміка: Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». Ч. 1. – К., 2003. – С. 45–46. 4. Козак Ю.Я. Модифікація методу направляючого конуса Растрігіна // Електроніка і зв'язь: Тем. вип. «Проблеми фізической и биомедицинской электроники». – К., 1997. – С. 424. 5. Стахів П.Г., Рендзіняк С.Й., Козак Ю.Я. Паралельні діакоптичні методи моделювання електричних кіл // Технічна електродинаміка: Тем. вип. Ч. 1. – К., 2004. – С. 52–57. 6. Рендзіняк С.Й. Застосування динамічних макромоделей підсхем у методі роздільного інтегрування // Теоретична електротехніка. – Л., 2007. – Вип. 59. – С. 23–32.