

УДК 519.87

ПОБУДОВА ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУР З АКТИВНИМ ОПОРОМ

Протасов С.Ю.

Черкаський державний технологічний університет

Стаття присвячена побудові діагностичних моделей структур з активним опором, що є одним із методів неруйнуючого контролю складних динамічних об'єктів. Структури з активним опором представляють собою об'єкти із розподіленими параметрами, що призводить до необхідності застосування рівнянь з частинними похідними або двовимірних інтегральних рівнянь, і в багатьох випадках при розв'язуванні практичних задач призводить до труднощів отримання якісних і кількісних результатів. Запропонований метод побудови заснований на переборі можливих типів диференціальних рівнянь з використанням еквівалентних інтегральних рівнянь. Для класифікації структур з активним опором використовується не лише порядок (структура) диференціальних рівнянь, а і значення їх параметрів. Актуальність методу підтверджують результати обчислювальних експериментів.

Ключові слова: динамічна модель, структура з активним опором, перехідна теплова характеристика, інтегральна модель, інтегральна діагностика.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Останніми роками інтенсивно розробляються і знаходять все більш широке застосування методи неруйнуючого контролю технічних виробів на базі ефектів нелінійності, інерційності і флуктування їх фізичних параметрів [1, 2, 3]. На основі цих методів можна визначити діагностичні параметри і ознаки фізичного стану виробів. До таких методів неруйнуючого контролю, виконаних на основі подачі спеціальних випробувальних сигналів, відносяться методи інтегральної діагностики, що засновані на розрахунку параметрів динамічних моделей безперервних об'єктів. Суть інтегральної діагностики полягає в тому, що об'єкт діагностування розглядається в цілому без розкриття його внутрішньої структури. Інтегральна діагностика ґрунтується на аналізі перехідних або нелінійних характеристик елемента (перехідна теплова, вольт-амперна, вольт-фарадна характеристики тощо). Діагностична інформація отримується із безперервного вихідного сигналу при подачі на вхід динамічного об'єкта спеціальної тестової дії, що виявляє зміни його фізичного стану. З метою діагностики використовуються два типи перехідних характеристик – перехідна (отримана при подачі на вхід об'єкта тестового сигналу у формі одиначного стрибка) і імпульсна перехідна (при подачі

сигналу у вигляді дельта-функції) [4]. Переважною є перехідна характеристика зважаючи на її практичну доступність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Окремі питання в галузі побудови та застосування динамічних моделей розкриті в наукових працях: А.Г. Алексеєнко, С.М. Басана, А.Е. Баскакова, Н.І. Борисова, А.Г. Бутковського, А.Ф. Верланя, О.О. Ситника, С.Ю. Протасова та інших.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Прикладом структури з активним опором може бути резистор типу МЛТ, складовими частинами якого є: керамічна основа, резистивний шар, контактний вузол, захисне покриття та виводи [5] і представляє собою елемент з розподіленими параметрами, що призводить до необхідності застосування рівнянь в частинних похідних або двовимірних інтегральних рівнянь. Однак застосування таких динамічних моделей представляє собою досить трудомістку задачу. Тому на практиці вважають доцільним за рахунок спрощення та припущень обійтися отриманням і застосуванням одномірних динамічних моделей у вигляді звичайних диференціальних рівнянь або моделей у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерра [6]. На користь такого підходу свідчить розглядання резистора як скалярного об'єкта, вхідним сигналом якого є струм (або на-

пруга), а вихідним – динамічна зміна опору при джоулевому нагріванні.

Метою даної статті є ілюстрація методу побудови адекватних і ефективних одномірних діагностичних моделей структур з активним опором у вигляді звичайних диференціальних та інтегральних рівнянь.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як об'єкт досліджень у даній статті розглядаються структури з активним опором для побудови діагностичних моделей постійного недротяного резистора при ступінчастій тестовій дії.

Характерною особливістю для структур з активним опором є те, що в них можна виділити дві підсистеми, які істотно відрізняються між собою – підсистему активного провідного шару резистора і підсистему конструктивного виконання. Підсистема активного провідного шару створює основний вплив на перехідні електричні характеристики резисторів [7].

Підсистема конструктивного виконання в основному визначає перехідні теплові характеристики, оскільки вона відображає відведення теплової енергії в навколишнє середовище, таким чином забезпечуючи нормальну роботу приладу по температурних характеристиках. В даному випадку основний вплив створюють теплопровідність на межі активної підсистеми, що діагностується із системою конструктивного виконання дисипативної підсистеми, теплопровідність найконструктивнішої підсистеми, теплообмін конструктивного оформлення з навколишнім середовищем та інші технологічні чинники.

Для матеріалів з активним опором характерною є зміна їх провідності в часі при зовнішній випробувальній дії типу стрибка. Зміна значення опору є складною функцією вигляду

$$\delta R(t) = f[u(t), R_0, \tilde{n}, h, \alpha, t],$$

де у ролі аргументів функції $\delta R(t)$ виступають функція зміни опору від часу, теплоємність c , коефіцієнт теплопередачі або теплових втрат h , інтегральний коефіцієнт опору α та інші чинники, що представляють в інтегральному вигляді феноменологічні параметри дисипативних підсистем. Дана залежність є складною для практичного використання. Спрощення вказаної залежності може бути досягнуто виключенням з неї тих чинників, які дають невеликий вплив у загальну залежність або є малоінформативними.

Оскільки, як початкові дані для аналізу перехідної функції приймаються теплофізичні параметри, тому її називають перехідною тепловою характеристикою (ПТХ). Вона є інформативною і може бути використана для розрахунку параметрів динамічних об'єктів.

Для обґрунтування одномірних динамічних моделей використовується наступні припущення і дані.

Параметри моделі приймаються постійними під час перехідного процесу у зв'язку із його невеликою тривалістю, враховується одна направлена зміна теплової енергії, що і дає фізичне обґрунтування для переходу від розподілених властивостей параметрів до зосереджених. При цьому враховується, що тепла енергія виділяється тільки на межах зерен з яких створені активні шари недротяних елементів з активним опором, зважаючи на мінімальні розміри самих зерен. При

необхідності ці припущення визначають початкові умови двовимірної моделі елементів з активним опором при переході до одновимірної.

Приймаємо, що дотримуються умов ізотермічності, які призводять в даній динамічній моделі до простору початкових умов (початкової температури), а також постійними значення коефіцієнтів теплоємності, теплових втрат та інтегрального температурного коефіцієнта опору.

Виходячи з прийнятих припущень, зміна температури в довільній точці поверхні резистора може бути описана звичайними диференціальними рівняннями першого порядку на основі тепло-енергетичного балансу між енергією джоулевого нагрівання та випромінюванням у навколишнє середовище.

При повнішому обліку динаміки процесів, що виникають внаслідок енергетичного стрибка, порядок диференціального рівняння може бути збільшений, тобто найбільш загальною формою динамічної моделі є диференціальне рівняння вигляду

$$\sum_{i=0}^n q_i(t) y^{(i)}(t) = f(t), t \in [0; T],$$

де коефіцієнти $q_i, i=1, n$ утворюють систему параметрів моделі. Якщо об'єктом діагностування є резистивна недротяна структура, то ці коефіцієнти є постійними. При розв'язанні задач інтегральної діагностики можна чисельно визначити вказані коефіцієнти, тобто відновити параметри математичної моделі резистора і віднести останній до класу придатних або непридатних об'єктів.

Вхідний тестовий сигнал представляється у вигляді:

$$f(t) = \tilde{n} \cdot l(t), \text{ де } \tilde{n} = \text{const},$$

а як вихідний сигнал візьмемо значення ПТХ $y_j, j=1, N$ виміряний через деякий проміжок часу (крок вимірювань).

Розглянемо застосування розробленої методики при розрахунку параметрів динамічних моделей для побудови діагностичних моделей структур з активним опором. Метод заснований на переборі можливих типів диференціальних рівнянь з використанням еквівалентних інтегральних рівнянь [8]. Мінімізуючи функціонал незв'язки вигляду

$$\Phi = \sum_{i=1}^m [y(t_i) + \sum_{j=1}^n q_j \left(\int_0^{t_i} \frac{(t_i - s)^{j-1}}{(j-1)!} y(s) ds - \sum_{k=0}^{n-j-1} c_k \frac{t_i^{k+j}}{(k+j)!} \right) - \int_0^{t_i} \frac{(t_i - s)^{n-1}}{(n-1)!} f(s) ds - \sum_{j=0}^{n-1} c_j \frac{t_i^j}{j!}]^2, \quad (1)$$

знаходимо значення невідомих параметрів. Потім отримуємо розв'язок диференціального рівняння на усьому інтервалі спостережень за допомогою реалізації еквівалентного інтегрального рівняння.

Першим кроком побудови моделі структури з активним опором є використання диференціального рівняння першого порядку вигляду

$$y'(t) + qy(t) = f(t), y(0) = c_0.$$

Потім порядок рівняння поступово збільшується на кожному наступному кроці алгоритму. При цьому знаходиться невідоме значення параметра q , що задовольняє мінімум функціоналу (1). У послідовному чисельно реалізується інтегральна модель, а оцінений перехідний процес порівнюється з реальними початковими даними.

Якщо похибка виявляється більше заданої, розглядається рівняння вигляду

$$y''(t) + q_1 y'(t) + q_2 y(t) = f(t), y(0) = c_0, y'(0) = c_1, \text{ і так далі.}$$

Повторюючи ці розрахунки, знаходимо оптимальні значення параметрів і структури моделі, що задовольняють мінімум функціоналу (1).

На рис. 1, представлені найбільш характерні типи ПТХ металоелектричних резисторів.

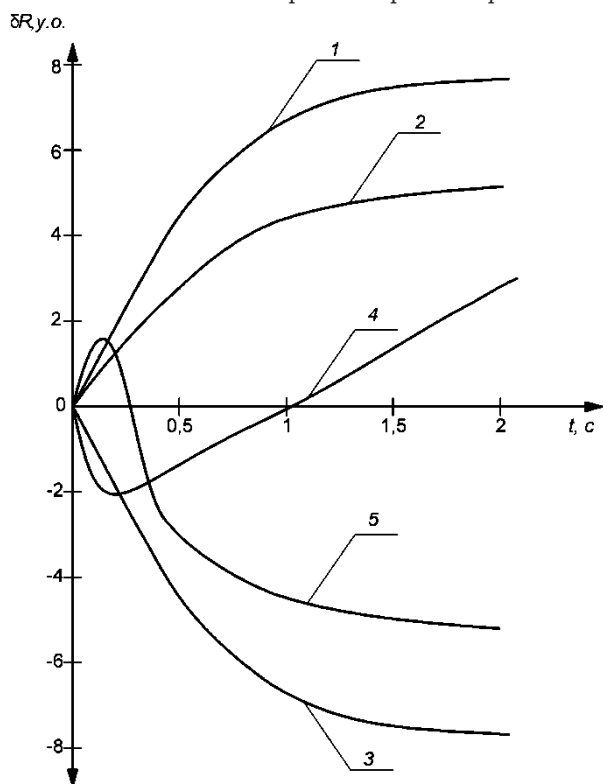


Рис. 1. Перехідні теплові характеристики структур з активним опором

На основі запропонованої методики були побудовані діагностичні моделі резисторів. Криві 1,

2, 3 добре апроксимуються розв'язанням диференціального рівняння першого порядку з максимальною відносною похибкою ($\delta < 2\%$). Гірше апроксимуються крива типу 5 особливо на початку інтервалу вимірювань, де похибка може досягати 10%. Крива типу 4 погано апроксимуються з використанням диференціальних моделей 1-го і 2-го порядків ($\delta < 24\%$).

Значення параметрів, контрольних розрахункових величин реального вихідного сигналу, що отримані за допомогою моделі, для кривих 1,2 приведені в табл. 1. Згідно концептуальної моделі монотонні криві 1, 2, 3 відповідають придатним резисторам, а відхилення від монотонності свідчать про наявність різного роду дефектів, наприклад, дефектів струмопровідного шару, плям, подряпин тощо.

Для класифікації резисторів можна використовувати не лише порядок (структуру) диференціального рівняння, але також і значення параметрів рівняння. Технологія комп'ютерної діагностики повинна передбачати збереження значень коефіцієнтів диференціального рівняння і допустимі відхилення їх розв'язків від характеристик еталонного резистора, тобто для кожного конкретного вигляду ПТХ визначається структура і значення параметрів диференціального рівняння. За допомогою отриманих значень параметрів визначається максимальна похибка апроксимації і якщо вона менше допустимої, то резистор вважається за придатний.

Висновок. Таким чином, актуальною є науково-технічна задача побудови та розрахунку параметрів діагностичних моделей, що підвищує ефективність методів моделювання динамічних об'єктів з розподіленими параметрами. Розглянутий в статті метод є одним із етапів розв'язання загальної задачі діагностики структур з активним опором і дає можливість підвищити їх якість і надійність, тим самим дозволяючи розширити коло ефективно розв'язуваних дослідницьких і проектних задач.

Таблиця 1

Результати обчислень за допомогою діагностичної моделі

q = 1,61498				q = 0,9995			
t _i , c	δR _i , y.o.	δR̄ _i , y.o.	δR _i - δR̄ _i	t _i , c	δR _i , y.o.	δR̄ _i , y.o.	δR _i - δR̄ _i
0,1	1,0	0,9910	0,009	0,1	1,0	0,9950	0,0050
0,2	1,7	1,7092	0,0092	0,2	1,8	1,8130	0,0130
0,3	2,3	2,3778	0,0078	0,3	2,5	2,5032	0,0032
0,4	2,9	2,8363	0,0063	0,4	3,2	3,2960	0,0960
0,5	3,3	3,3782	0,0028	0,5	3,9	3,9340	0,0340
0,6	3,7	3,8326	0,0052	0,6	4,5	4,5110	0,0110
0,7	4,1	4,2137	0,0064	0,7	5,0	5,0340	0,0340
0,8	4,5	4,5332	0,0016	0,8	5,5	5,5060	0,0060
0,9	5,0	5,0257	0,0026	0,9	5,9	5,9300	0,0300
1	5,2	5,2140	0,0014	1	6,3	6,3100	0,0100

Список літератури:

1. Васильев В. В. Моделирование динамических систем: Аспекты мониторинга и обработки сигналов / В. В. Васильев, Г. И. Грездов, Л. А. Симак. – Киев: НАН Украины, 2002. – 344 с.
2. Млицкий В. Д. Испытание аппаратуры и средства измерений на воздействие внешних факторов / В. Д. Млицкий, В. Х. Беглария, Л. Г. Дубицкий. – Москва, 2003. – 567 с.
3. Федоров В. К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. К. Федоров, Н. П. Сергеев, А. А. Кондрашин. – Москва: Техносфера, 2005. – 502 с.
4. Протасов С. Ю. Динамические характеристики линейных объектов с переменными параметрами / С. Ю. Протасов // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». – Вип. 56. – К.: ІПМЕ, 2010. – С. 64-71.
5. Достанко А. П. Пленочные токопроводящие системы СВИС / А. П. Достанко, В. В. Баранов, В. В. Шаталов. – Минск: Высшая школа, 2003. – 238 с.
6. Сытник А. А. Применение интегральных динамических моделей при решении задачи идентификации параметров электрических цепей / А. А. Сытник, К. Н. Ключка, С. Ю. Протасов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4: Энергетика. – С. 103-106.
7. Грановский В. А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения / В. А. Грановский. – Ленинград: Энергоатомиздат., 1984. – 224 с.
8. Протасов С. Ю. Методи та засоби формування і комп'ютерної реалізації інтегральних макромоделей стаціонарних динамічних об'єктів з розподіленими параметрами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи» / Протасов С. Ю. – Черкаси, 2012. – 20 с.

Протасов С.Ю.

Черкасский государственный технологический университет

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУР С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Аннотация

Статья посвящена построению диагностических моделей структур с активным сопротивлением, что является одним из методов неразрушающего контроля сложных динамических объектов. Структуры с активным сопротивлением представляют собой объекты с распределенными параметрами, что приводит к необходимости применения уравнений в частных производных или двумерных интегральных уравнений, и во многих случаях при решении практических задач приводит к трудностям получения качественных и количественных результатов. Предложенный метод построения основан на переборе возможных типов дифференциальных уравнений с использованием эквивалентных интегральных уравнений. Для классификации структур с активным сопротивлением используется не только порядок (структура) дифференциальных уравнений, а и значение их параметров. Актуальность метода подтверждают результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: динамическая модель, структура с активным сопротивлением, переходная тепловая характеристика, интегральная модель, интегральная диагностика.

Protasov S.Yu.

Cherkasy State Technological University

BUILDING DIAGNOSTIC MODELS OF STRUCTURES WITH ACTIVE RESISTANCE

Summary

The article is devoted to the construction of diagnostic models of structures with active resistance, which is one of the methods of nondestructive testing of complex dynamic objects. Structures with active resistance are objects with distributed parameters, which necessitates the application of partial differential equations or two-dimensional integral equations, and in many cases when solving practical problems leads to difficulties in obtaining qualitative and quantitative results. The proposed construction method is based on a search of possible types of differential equations using equivalent integral equations. To classify structures with active resistance, we use not only the order (structure) of the differential equations, but also the value of their parameters. The relevance of the method is confirmed by the results of computational experiments.

Keywords: dynamic model, structure with active resistance, transient thermal characteristic, integral model, integral diagnostics.